

DYNAMISCHE ADAPTIERUNG DER MENSCH-MASCHINE-INTERAKTION AUF DER BASIS MENTALER ZUSTÄNDE

Sven Fuchs

Vollständiger Abdruck der von der Fakultät für Informatik der
Universität der Bundeswehr München zur Erlangung des akademischen Grades eines

Doktors der Naturwissenschaften (Dr. rer. nat.)

genehmigten Dissertation.

Gutachter:

1. Prof. Dr. Michael Koch
2. Prof. Dr. Florian Alt

Die Dissertation wurde am 24. Oktober 2022 bei der Universität der Bundeswehr München eingereicht und durch die Fakultät für Informatik am 7. Februar 2023 angenommen. Die mündliche Prüfung fand am 1. März 2023 statt.

Danksagung

Ich möchte mich an dieser Stelle bei Allen bedanken, die mich über so viele Jahre bei meinem Promotionsvorhaben unterstützt haben. Zu vielen Menschen gebührt hier großer Dank, als dass ich wirklich alle namentlich nennen könnte.

Die Idee eines dynamischen Adaptierungsmanagements kam mir bereits im Jahr 2006. Zu der Zeit beschäftigte ich mich bei Design Interactive, Inc. in Orlando (FL, USA) mit Projekten im noch jungen Forschungsfeld „Augmented Cognition“. Dr. Kay Stanney, Dr. Kelly Hale und Dr. Dylan Schmorrow haben dort meinen Berufseinstieg mit ihrem Pioniergeist und ihrem unendlichen Enthusiasmus grundlegend geprägt und meine Begeisterung für das Feld und die Forschung im Allgemeinen geweckt. Ihre harte Schule hat mich oft an meine Grenzen gebracht, mir aber auch gezeigt, dass es dort immer noch weitergeht.

Die Erarbeitung der Dissertation erfolgte schließlich berufsbegleitend in der Abteilung Mensch-Maschine-Systeme am Fraunhofer-Institut für Kommunikation, Informationsverarbeitung und Ergonomie (FKIE). Dort haben die assoziierten Arbeiten zur multifaktoriellen Diagnose kritischer Nutzerzustände von Dr. Jessica Schwarz (2019) die Umsetzung meines Vorhabens erst möglich gemacht. Bei ihr möchte ich mich herzlich für viele Jahre sehr enger und vertrauensvoller Zusammenarbeit und unzählige fruchtbare Diskussionen auf dem Weg zum gemeinsamen Ziel bedanken. Prof. Dr. Frank Flemisch lieferte ebenfalls wichtige initiale Impulse zum Thema und weckte meine Begeisterung für die Systemtheorie. Ein großer Dank gilt auch Dr. Margarete Grandt und Berthold Könemann, welche die Projekte im BAAINBw T2.3 gefördert und begleitet haben.

Bei Oliver Witt, Florian Motz und Annette Kaster möchte ich mich für die organisatorische Unterstützung und die gewährten Freiräume am FKIE bedanken. Andreas Werger, Yudong Zhang, Ron Becker und Andreas Eihof haben mit ihren Programmierkenntnissen die Implementierung dieses komplexen Systems sowie die Aufbereitung der gigantischen Datenmengen möglich gemacht. Auch ohne den unfassbar hilfreichen Einsatz und die wertvollen Ideen von Alina Schmitz-Hübsch, Stephanie Hochgeschurz und Lerke Thiele hätte ich die Durchführung der Experimente in dieser Form nicht leisten können. Dr. Wolf Käßler, Dr. Daniel Feiser, Dr. Jessica Conradi und Dr. Sebastian Schreiber danke ich für die offenen Ohren, die moralische Unterstützung und ihr stetiges Drängen, die Promotion stärker zu priorisieren.

Ein besonders herzlicher Dank gilt meinem Erstgutachter Prof. Dr. Michael Koch, der meinem Vorhaben nach langer Odyssee einen akademischen Heimathafen geboten und mich uneigennützig, zielführend und sehr responsiv betreut hat. Ich danke auch Prof. Dr. Florian Alt, der sich freundlicherweise als Zweitgutachter zur Verfügung gestellt und der Arbeit noch den ein oder anderen positiven Impuls gegeben hat.

Auf einer gänzlich anderen Ebene möchte ich mich bei meinen Eltern und meiner Familie bedanken, die mich erst zu dem gemacht haben, der ich bin, und mir in diesen Jahren mit ihrer Liebe immer neue Kraft gegeben haben. Insbesondere meiner Frau Pilar und meinem Sohn Lennard kann ich nicht dankbar genug sein, dass sie so lang auf Vieles verzichtet haben, mich geduldig und verständnisvoll unterstützt haben und immer für mich da sind.

Zusammenfassung

Adaptive Mensch-Maschine-Interaktion (MMI) ermöglicht es technischen Artefakten, mit Assistenzfunktionen auf Leistungseinbrüche oder Veränderungen von Nutzer- und Umweltzuständen zu reagieren. Sie kann dabei helfen, den Menschen involviert zu halten, wenn der Verbleib der Verantwortung oder der Haftung bei diesem erforderlich ist. Die Zielerreichung des Mensch-Maschine-Gesamtsystems kann dabei über einen biokybernetischen Regelkreis unterstützt werden, indem mit physiologischen Messmethoden mentale Problemzustände der Nutzer detektiert und darauf basierend Anpassungen an der MMI vorgenommen werden. Solche Arbeiten vernachlässigen jedoch häufig, dass der mentale Zustand des Menschen ein multidimensionales Konstrukt ist. Die reine Betrachtung mentaler Problemzustände gibt zudem keinen Aufschluss darüber, welche Art der Adaptierung in einer gegebenen Situation nötig oder angebracht wäre. Vielen Lösungen fehlt daher die erforderliche Flexibilität, um dynamisch auf verschiedene mentale Zustände zu reagieren oder in komplexen Systemen mit heterogenen Elementen und emergenten Eigenschaften effektiv zu sein.

Um diese Gestaltungslücke zu schließen, umfasst die vorliegende Dissertation die Konzeption, den Entwurf und die empirische Validierung eines *Dynamischen Adaptierungsmanagements* (DAM). Dieses ermittelt kontinuierlich, welche Art von Unterstützung in einer gegebenen Situation geeignet ist, um Leistungseinbrüche und kritische mentale Zustände zu adressieren. Es löst bedarfsgerechte Assistenzfunktionen aus, wenn der Mensch Unterstützung benötigt. Basierend auf Erkenntnissen und theoretischen Modellen aus der Kognitionspsychologie wurde ein humanzentriertes Konzept für ein DAM erarbeitet und prototypisch umgesetzt.

Die Originalität des DAM liegt darin, dass kontext- und bedarfsadäquate Unterstützungsstrategien zur Laufzeit in Abhängigkeit von kritischen Zustandsausprägungen und der aktuellen Anforderungssituation ausgewählt werden. Diese zielen darauf ab, kritische Nutzerzustände (und darüber mittelbar die Gesamtleistung des Mensch-Maschine-Systems) positiv zu beeinflussen. Um zu ermitteln, welche Art von Adaptierung im vorliegenden Kontext angemessen ist, verknüpft das DAM Systemereignisse, Leistungsindikatoren und Nutzerverhalten mit Diagnosen des Nutzerzustands. Diese erhält es aus einer multifaktoriellen Nutzerzustandsdiagnose (Schwarz, 2019), die zeitgleich mehrere Dimensionen des Nutzerzustands analysiert.

Um das entwickelte Konzept zu untersuchen und empirisch zu validieren, umfasst die Arbeit eine Reihe von Laboruntersuchungen. Dafür wurde das DAM am Beispiel einer Luftraumüberwachungsaufgabe in einer anwendungsnahen Experimentalumgebung prototypisch operationalisiert. Zunächst wurde die Wirkweise aller Adaptierungsstrategien einzeln untersucht, bevor eine Evaluation des Gesamtkonzepts erfolgte. Bei Einzelbetrachtung überzeugten die Adaptierungsstrategien in der subjektiven Bewertung durch die Probanden. Positive Einflüsse auf Nutzerzustand und Leistung konnten jedoch nur vereinzelt statistisch nachgewiesen werden. In der Evaluation des Gesamtkonzepts wurde die Validität des DAM aber erfolgreich empirisch belegt: Mit dynamischer Adaptierung der MMI konnten durchschnittlich 17% mehr Aufgaben korrekt bearbeitet werden und es wurden durchschnittlich 24% weniger Leistungseinbrüche detektiert. Episoden kritisch hoher Beanspruchung wurden signifikant verkürzt, wenn Probanden durch das DAM unterstützt wurden.

Die in dieser Arbeit entstandenen Ergebnisse bilden einen fundierten konzeptionellen Rahmen für ein Dynamisches Adaptierungsmanagement und ermöglichen es, den entwickelten Ansatz auf verschiedene Anwendungsbereiche zu übertragen. Daher werden abschließend potenzielle Anwendungsfelder sowie mögliche Erweiterungen und Anschlussarbeiten dargestellt.

Abstract

Adaptive human-computer interaction enables technical artifacts to employ support features to respond to performance degradation or changes in user and environmental conditions. It can help keep human operators “in the loop” when the nature of the task requires responsibility or liability to remain with the human. The objectives of the overall human-machine system can be supported through a biocybernetic control loop. This approach employs physiological measures to detect critical cognitive states of the user, and adapt the HCI based on this information. However, work in this area often neglects the fact that the human cognitive state is a multidimensional construct. Also, an isolated consideration of cognitive states does not provide any information about what kind of adaptation would be necessary or appropriate in a given situation. Many solutions therefore lack the required flexibility to dynamically respond to different mental states or to be effective in complex systems with heterogeneous elements and emergent properties.

In order to close this gap, this dissertation comprises the conceptualization, design, and empirical validation of a *Dynamic Adaptation Management* (DAM) component. The DAM continuously determines which type of assistance is appropriate to address detected performance decrements and critical cognitive states in a given situation and triggers adaptive features as needed. Based on insights and theoretical models from cognitive psychology, a human-centered concept for a DAM was first conceptualized and then implemented as an experimental prototype. In addition, exemplary adaptation strategies were derived from theories and models of cognition and made available to adaptation management.

The DAM is original in that context- and need-appropriate support strategies are selected at runtime depending on critical user states and the current situation. The strategies are tailored to the situation and aim to positively impact the critical user state, counteract performance decrements, and thus improve the overall performance of the human-machine system. To help determine which type of adaptation is appropriate in a given context, the DAM links system events, performance indicators, and user activity to critical cognitive states. These are obtained from an existing multifactorial user state diagnosis (Schwarz, 2019) that simultaneously considers different performance-relevant dimensions of the user state.

The second part of this thesis reports a series of laboratory experiments that were conducted to investigate and empirically validate the developed concept. To this end, the designed artifacts were implemented as an application-oriented experimental prototype, using an anti-air warfare task as an exemplary setting. To gain detailed insights into the effectiveness of adaptive human-technology interaction, each adaptation strategy was first examined individually before the overall concept was evaluated. Individual adaptation strategies were convincing in subjective assessments by the test subjects, but a positive impact on user state and performance was observed in isolated cases only. The evaluation of the overall concept, however, provided ample empirical evidence in favor of the DAM approach: With dynamic adaptation, an average of 17% more tasks were correctly performed and 24% fewer instances of performance degradation were detected. Episodes of critically high workload were significantly shorter when participants were supported by the DAM.

The results of this work provide a substantiated conceptual framework for Dynamic Adaptation Management and allow the underlying approach to be applied to different domains. Therefore, the thesis concludes with potential fields of use and outlines possible extensions and follow-on work.

Inhalt

1 Einführung	1
1.1 Ausgangssituation und Problemstellungen	1
1.1.1 Adaptive Mensch-Maschine Interaktion.....	4
1.1.2 Berücksichtigung von Kontext.....	5
1.1.3 Herausforderung Adaptierungsmanagement.....	7
1.2 Gestaltungslücke	8
1.3 Zielsetzungen	8
1.4 Vorgehensweise	9
1.5 Gliederung	10
1.6 Wissenschaftliche Beiträge	12
2 Stand der Forschung zur Adaptiven MMI	13
2.1 Modelle der menschlichen Informationsverarbeitung.....	13
2.2 Engpässe bei der Informationsverarbeitung	15
2.2.1 Perzeptiver Engpass.....	16
2.2.2 WM-Kapazitätsengpass.....	17
2.2.3 Exekutiver Engpass.....	18
2.2.4 Aufmerksamkeitsengpass.....	18
2.2.5 Reaktionsengpass.....	19
2.3 Psychologische Herausforderungen der Automation.....	20
2.4 Bisherige Ansätze adaptiver MMI.....	22
2.4.1 Adaptierbare Automation	23
2.4.2 Adaptive Aiding und Adaptive Automation	24
2.4.3 Augmented Cognition	25
2.4.4 Physiological Computing und Neuroadaptive Technologie.....	27
2.4.5 Taxonomie von Adaptierungsmöglichkeiten nach Feigh et al. (2012)	28
2.4.6 Zwischenfazit zum Stand der Forschung.....	30
2.5 Assoziierte Vorarbeiten.....	32
2.5.1 Rahmenwerk für eine ganzheitliche Betrachtung adaptiver MMI.....	33
2.5.2 Multifaktorielle Nutzerzustandsdiagnose nach Schwarz (2019).....	35
2.5.3 Betrachtete kritische Nutzerzustände	38
2.6 Erkenntnisse für den Entwurf dynamischer Adaptierung.....	40
2.6.1 Adaptierungen kontext- und situationsspezifisch auswählen	40
2.6.2 Kosten der Adaptierung bedenken.....	41
2.6.3 Zielerreichung überprüfen	41
2.6.4 Umgang mit mehreren Problemzuständen ermöglichen	41
2.6.5 Geeignete Interventionsvariablen ermitteln	42
2.6.6 Oszillation von Nutzerzuständen und Adaptierungen vermeiden	42
2.6.7 Nicht-deterministischen Charakter der Kognition berücksichtigen	42
2.6.8 Unzulänglichkeiten von Laboraufgaben vermeiden.....	43

3 Entwurf und Operationalisierung der dynamischen Adaptierung der MMI	45
3.1 Konzept des Dynamischen Adaptierungsmanagements	46
3.1.1 Feststellung von Adaptierungsbedarf	46
3.1.2 Funktionsweise und Voraussetzungen der Adaptierung	47
3.1.3 Berücksichtigung der Aufgabenpriorität	48
3.1.4 Ablauf der Dynamischen Adaptierung	48
3.2 Humanzentrierte Herleitung geeigneter Adaptierungen.....	52
3.2.1 Adaptierung bei hoher mentaler Beanspruchung	53
3.2.2 Adaptierung bei falsch gerichteter Aufmerksamkeit	55
3.2.3 Adaptierung bei passiver aufgabenbezogener Müdigkeit	57
3.2.4 Übersicht der entworfenen Adaptierungsmechanismen	57
3.3 Experteninterview	58
3.3.1 Methode	59
3.3.2 Mentale Herausforderungen bei der Luftraumüberwachung	60
3.3.3 Relevante Einflussfaktoren bei der Luftraumüberwachung	61
3.3.4 Implikationen für die weitere Arbeit	62
3.4 Experimenteller Prototyp und Experimentalaufgabe.....	62
3.4.1 Technischer Apparat zur Realisierung Adaptiver MMI	63
3.4.2 Implementierung des Dynamischen Adaptierungsmanagements	65
3.4.3 Beschreibung der Aufgabe	68
3.5 Operationalisierung und Gestaltung der adaptiven Funktionalitäten in der Aufgabenumgebung	71
3.5.1 Konfiguration der Nutzerzustandsdiagnose	71
3.5.2 Operationalisierung des Dynamischen Adaptierungsmanagements	74
3.5.3 Gestaltung der Adaptierungsstrategien	77
3.6 Zusammenfassung der Entwurfsphase.....	81
4 Voruntersuchung zu Funktion und Nutzerakzeptanz der Adaptierungsstrategien...83	83
4.1 Methode	84
4.1.1 Stichprobe	84
4.1.2 Apparat	84
4.1.3 Versuchsdesign	85
4.1.4 Versuchsablauf.....	88
4.1.5 Datenaufbereitung	89
4.1.6 Statistische Analysen	89
4.2 Ergebnisse und Diskussion	90
4.2.1 Testphase B.....	91
4.2.2 Testphase BA	92
4.2.3 Testphase A	93
4.2.4 Testphase M	94
4.3 Schlussfolgerungen	94

5 Experiment 1 – Untersuchung der Wirksamkeit der Adaptierungsstrategien.....	97
5.1 Methode	98
5.1.1 Stichprobe	98
5.1.2 Apparaturs	99
5.1.3 Versuchsdesign	102
5.1.4 Versuchsablauf.....	103
5.1.5 Datenaufbereitung	104
5.1.6 Statistische Analysen	105
5.2 Ergebnisse und Diskussion	106
5.2.1 Wirkung auf Leistungseinbrüche (Hypothese H1)	107
5.2.2 Wirkung auf die Aufgabenbearbeitung (Hypothese H2)	108
5.2.3 Wirkung auf den diagnostizierten Nutzerzustand (Hypothese H3)	110
5.2.4 Wirkung auf den subjektiven Nutzerzustand	113
5.2.5 Überblick.....	113
5.2.6 Mögliche Ursachen	115
5.3 Schlussfolgerungen	117
6 Experiment 2 – Validierung der Wirksamkeit des dynamischen Adaptierungsmanagements.....	119
6.1 Methode	120
6.1.1 Stichprobe	120
6.1.2 Apparaturs	120
6.1.3 Versuchsdesign	122
6.1.4 Versuchsablauf.....	123
6.1.5 Datenaufbereitung	124
6.1.6 Statistische Analysen	125
6.2 Ergebnisse	126
6.2.1 Wirkung auf Leistungseinbrüche (Hypothese H1)	126
6.2.2 Wirkung auf die Aufgabenbearbeitung (Hypothese H2)	127
6.2.3 Wirkung auf den diagnostizierten Nutzerzustand (Hypothese H3)	128
6.2.4 Wirkung auf den subjektiven Nutzerzustand	129
6.2.5 Wirkung auf die Bearbeitung der Teilaufgaben	129
6.2.6 Unterschiede zwischen Szenario 1 und Szenario 2	134
6.2.7 Subjektive Beurteilung der Adaptierungen	135
6.3 Diskussion	136
6.3.1 Wirkung auf Leistungseinbrüche (H1) und Aufgabenbearbeitung (H2)	137
6.3.2 Wirkung auf kritische Ausprägungen des Nutzerzustands (H3).....	137
6.3.3 Wirkung auf den subjektiven Nutzerzustand	138
6.3.4 Wirkung auf die Bearbeitung der Teilaufgaben	139
6.4 Schlussfolgerungen	140

7 Zusammenfassung und Bewertung.....	143
7.1 Entwurfsphase.....	143
7.2 Evaluationsphase.....	145
7.3 Zielsetzung und Anforderungen	147
7.3.1 Adressierung der Gestaltungslücke	147
7.3.2 Beachtung allgemeiner Prinzipien für Forschung in der gestaltungsorientierten Wirtschaftsinformatik	148
7.3.3 Berücksichtigung der Erkenntnisse aus der Analysephase	149
7.4 Einordnung und Abgrenzung zu anderen Arbeiten.....	150
7.4.1 Interruption Management	150
7.4.2 Attentive User Interfaces	150
7.4.3 Implicit Human-Computer Interaction	151
7.4.4 Intervention User Interfaces.....	151
7.4.5 Intelligent User Interfaces.....	152
7.4.6 Computational Interaction	153
8 Ausblick.....	155
8.1 Anwendungsfelder	155
8.2 Mögliche Anschlussarbeiten und Erweiterungen.....	156
9 Literatur	159
9.1 Verzeichnis der verwendeten Literatur	159
9.2 Eigene Veröffentlichungen zum Thema der Promotion nach § 9 Abs. 4 Satz 3 der Promotionsordnung 2012	172
Anhang A. Material zur Voruntersuchung.....	173
A.1 Leistungs- und Zustandsmonitor.....	173
A.2 Versuchsplan	174
A.3 Einverständniserklärung.....	175
A.4 Pre-Test-Fragebogen	176
A.5 Instruktion.....	178
A.6 Beschreibung der Adaptierungsstrategien	181
A.7 Post-Test-Fragebögen.....	182
A.8 Versuchsprotokoll.....	185
Anhang B. Ergebnisse der Voruntersuchung.....	187
B.1 Ergebnisse der Testphase B.....	187
B.2 Ergebnisse der Testphase BA	189
B.3 Ergebnisse der Testphase A	193
B.4 Ergebnisse der Testphase M	195
B.5 Post-hoc-Untersuchung von Reihenfolgeeffekten	197
Anhang C. Material zu Experiment 1.....	199
C.1 Versuchsplan	199
C.2 Instruktion	200
C.3 Beschreibung der Adaptierungsstrategien.....	201
C.4 Post-Test-Fragebögen	202

Anhang D. Ergebnisse zu Experiment 1	205
D.1 Ergebnisse der hypothesenprüfenden Untersuchung	205
D.1.1 Wirkung auf Leistungseinbrüche (Hypothese H1)	206
D.1.2 Wirkung auf die Aufgabenbearbeitung (Hypothese H2)	207
D.1.3 Wirkung auf den diagnostizierten Nutzerzustand (Hypothese H3)	210
D.1.4 Wirkung auf den subjektiven Nutzerzustand	212
D.1.5 Subjektive Beurteilung der Adaptierungsstrategien.....	212
D.2 Ergebnisse der Post-hoc-Untersuchungen	214
D.2.1 Vergleich der Beanspruchung zwischen Voruntersuchung und Experiment 1.....	214
D.2.2 Wirkung auf die Anzahl rechtzeitig bearbeiteter Aufgaben	215
Anhang E. Material zu Experiment 2.....	219
E.1 Instruktion.....	219
E.2 Verständnisfragebogen	221
E.3 Beschreibung der Adaptierungsstrategien	223
E.4 Post-Test Fragebögen	224
Anhang F. Ergebnisse zu Experiment 2	227
F.1 Ergebnisübersicht zur hypothesenprüfenden Untersuchung	227
F.2 Ergebnisübersicht zur Bearbeitung der Teilaufgaben.....	228
F.3 Ergebnisse zum Vergleich von Szenario 1 und Szenario 2	230

Abbildungsverzeichnis

Abbildung 1.	Einfaches Eingabe-Verarbeitung-Ausgabe (EVA)-Modell	2
Abbildung 2.	Soziotechnisches System nach Ropohl (2009).....	3
Abbildung 3.	Funktionsweise eines biokybernetischen Closed-Loop Adaptive System (CLAS).....	5
Abbildung 4.	Erkenntnisprozess der gestaltungsorientierten Wirtschaftsinformatik nach Österle et al. (2010).....	9
Abbildung 5.	Illustration der Vorgehensweise	10
Abbildung 6.	Einfaches 4-Phasen-Modell der menschlichen Informationsverarbeitung (nach Parasuraman et al., 2000).....	14
Abbildung 7.	Modell der menschlichen Informationsverarbeitung mit beteiligten Komponenten nach Wickens und Hollands (2000)	14
Abbildung 8.	Modell zur Multiple Resource Theory (MRT) nach Wickens (1984)	15
Abbildung 9.	Verortung von Engpässen in der Informationsverarbeitung im Modell von Wickens und Hollands (2000)	16
Abbildung 10.	Perzeptiver Filter im SEEV-Modell von Wickens und McCarley (2008)	17
Abbildung 11.	Multikomponenten-Modell des Arbeitsgedächtnisses nach Baddeley und Logie (1999)	18
Abbildung 12.	Modell der Wirkweise der Psychologischen Refraktärperiode in Anlehnung an Pashler (1994)	19
Abbildung 13.	Drei-Ebenen-Modell des Situationsbewusstseins nach Endsley (1995).....	21
Abbildung 14.	Manuelle Adaptierung der Automation bezogen auf das 4-Phasen-Kognitionsmodell von Parasuraman et al., 2000	24
Abbildung 15.	Taxonomie von Adaptierungsmöglichkeiten nach Feigh et al. (2012).....	29
Abbildung 16.	EVA-Modell mit Rückkopplung und internen Regelungsprozessen des Operateurs	33
Abbildung 17.	Ganzheitliches Modell der MMI mit technischer Zustandsregulierung und aktiver Wechselwirkung zwischen Operateur und technischer Systemkomponente (nach Fuchs und Schwarz, 2013)	34
Abbildung 18.	Technische Zustandsregulierung mit Zustandsdiagnose und Adaptierungsmanagement	35
Abbildung 19.	Generisches Modell zum Nutzerzustand (Schwarz & Fuchs, 2014).....	36
Abbildung 20.	Vorgehen bei der Bewertung und Interpretation des (latenten) Nutzerzustands (Fuchs & Schwarz, 2014).....	37
Abbildung 21.	Diagnoseschritte der RASMUS-Zustandsdiagnose nach Schwarz (2019).....	38
Abbildung 22.	Die fünf Schritte des Dynamischen Adaptierungsmanagements im Zusammenspiel mit der RASMUS Zustandsdiagnose	48
Abbildung 23.	Generalisiertes Schema zur Auswahl der passenden Adaptierung.....	50
Abbildung 24.	Vermeidung von Aufgaben-Wechselkosten durch Scheduling	53
Abbildung 25.	Hardware-Aufbau der Experimentalumgebung	63
Abbildung 26.	Eye Tracker Tobii Pro X3-120 zur Montage unter dem Bildschirm.....	64
Abbildung 27.	Physiologischer Multi-Sensor Zephyr BioHarness 3.....	64
Abbildung 28.	Software-Komponenten des Adaptiven Systems	65
Abbildung 29.	Ablauf des Dynamischen Adaptierungsmanagements	67
Abbildung 30.	Benutzungsschnittstelle für die Aufgabenbearbeitung.....	69
Abbildung 31.	Adaptierungsschema zur Operationalisierung der adaptiven Funktionalitäten (Ausgangsversion).....	76
Abbildung 32.	Darstellung der Adaptierungsstrategie „Context-Sensitive Help“	77
Abbildung 33.	Initiale Darstellung der Adaptierungsstrategie „Automation“	78
Abbildung 34.	Initiale Darstellung der Adaptierungsstrategie „Visual Cueing“	80

Abbildung 35. Darstellung der Adaptierungsstrategie „Decluttering“	80
Abbildung 36. Experimentalumgebung mit den Sensoren für die Nutzerzustandserfassung.....	84
Abbildung 37. Versuchsdesign der Voruntersuchung	86
Abbildung 38. Hinweis auf NRTT am Mauscursor	100
Abbildung 39. Darstellung der Adaptierungsstrategie Context-Sensitive Help in Experiment 1	101
Abbildung 40. Darstellung der Adaptierungsstrategie Automation in Experiment 1	101
Abbildung 41. Darstellung der Adaptierungsstrategie Visual Cueing in Experiment 1	102
Abbildung 42. Versuchsdesign von Experiment 1	103
Abbildung 43. Modell des im Validierungsexperiment genutzten Adaptierungsschemas.....	121
Abbildung 44. Illustration der Regeln zur Auslösung der Adaptierungsstrategien im Validierungsexperiment	122
Abbildung 45. Mediane und Mittelwerte der Anzahl aller Leistungseinbrüche in beiden Bedingungen.....	126
Abbildung 46. Mediane und Mittelwerte der Anzahl korrekt priorisierter Aufgaben in beiden Bedingungen.....	127
Abbildung 47. Mediane und Mittelwerte der durchschnittlichen Dauer von Episoden kritisch hoher Beanspruchung.....	128
Abbildung 48. Mediane und Mittelwerte der kumulierten Dauer kritisch hoher Beanspruchung.....	129
Abbildung 49. Mediane und Mittelwerte der kumulierten Dauer falsch gerichteter Aufmerksamkeit	129
Abbildung 50. Mittlere Dauer von Leistungseinbrüchen bei Bekämpfungen	130
Abbildung 51. Mittelwerte der durchschnittlichen Dauer und Mediane der kumulierten Dauer von Leistungseinbrüchen bei Warnaufgaben	131
Abbildung 52. Mittelwerte der Anzahl korrekt priorisierter Identifizierungsaufgaben.....	132
Abbildung 53. Mediane und Mittelwerte der Präsenzdauer von Identifizierungsaufgaben	132
Abbildung 54. Mediane der kumulierten Dauer der Leistungseinbrüche bei Identifizierungsaufgaben	133
Abbildung 55. Subjektive Beurteilung der Adaptierungen bzgl. Nützlichkeit und Leistung	135
Abbildung 56. Subjektive Beurteilung der Adaptierungen bzgl. Beanspruchung und Aufmerksamkeit	136
Abbildung 57. Leistungs- und Zustandsmonitor der multifaktoriellen Nutzerzustandsdiagnose	173
Abbildung 58. Subjektive Beurteilung der Adaptierungen in der Testphase B	189
Abbildung 59. Subjektive Beurteilung des Scheduling bzgl. Nützlichkeit, Leistung, Beanspruchung und Aufmerksamkeit	192
Abbildung 60. Subjektive Beurteilung der Adaptierungen bzgl. Nützlichkeit, Leistung und Aufmerksamkeit	195
Abbildung 61. Subjektive Beurteilung von Auditory Cueing bzgl. Nützlichkeit, Leistung und Müdigkeit.....	197
Abbildung 62. Kumulierte Dauer der kritisch ausgeprägten Zustandsdimensionen im Verlauf der Untersuchung	198
Abbildung 63. Anzahl der Episoden kritisch ausgeprägter Zustandsdimensionen im Verlauf der Untersuchung	198
Abbildung 64. Mediane und Mittelwerte der durchschnittlichen Dauer von Leistungseinbrüchen bei Warnaufgaben pro Adaptierungsbedingung	207
Abbildung 65. Subjektive Beurteilung der Nützlichkeit der Adaptierungen	213
Abbildung 66. Subjektiver Einfluss der Adaptierungen auf die Leistung.....	213
Abbildung 67. Subjektiver Einfluss der Adaptierungen auf die Beanspruchung.....	214
Abbildung 68. Subjektiver Einfluss der Adaptierungen auf die Aufmerksamkeit	214
Abbildung 69. Mediane und Mittelwerte der prozentualen Anteile kritischer Nutzerzustandsausprägungen in Voruntersuchung und Experiment 1	215

Tabellenverzeichnis

Tabelle 1.	Auswirkung von Nutzerzuständen auf die Leistung (nach Schwarz & Fuchs, 2017).....	36
Tabelle 2.	Ausprägung der Einflussfaktoren zur Diagnose hoher Beanspruchung und passiver aufgabenbezogener Müdigkeit	40
Tabelle 3.	Mögliche Ergebnisse der Erfolgskontrolle und deren Implikationen.....	52
Tabelle 4.	Übersicht der Adaptierungsstrategien.....	58
Tabelle 5.	Relevante Einflussfaktoren.....	62
Tabelle 6.	Priorisierung der Teilaufgaben	71
Tabelle 7.	Zeitlimits für die Aufgabenbearbeitung	71
Tabelle 8.	Regeln für kritische Ausprägung der Kontextparameter.....	73
Tabelle 9.	Regeln für kritische Ausprägung der Nutzerzustandsdimensionen	74
Tabelle 10.	Parameter und Regeln zur der Auswahl der Adaptierungsziele	75
Tabelle 11.	Regeln zur Auslösung der Adaptierungsstrategien	85
Tabelle 12.	Anzahl der Aufgabenarten nach Testphase	87
Tabelle 13.	Stichprobengröße der vier Testphasen mit Adaptierungen	89
Tabelle 14.	Erkenntnisse und abgeleitete Maßnahmen aus der Voruntersuchung	96
Tabelle 15.	Anzahl der Aufgabenarten in Experiment 1	99
Tabelle 16.	Regeln zur Auslösung der Adaptierungsstrategien in Experiment 1	100
Tabelle 17.	Bestätigungsmuster der Hypothese H1b für die einzelnen Adaptierungsstrategien je Teilaufgabe.....	108
Tabelle 18.	Bestätigungsmuster der Hypothese H2 für die einzelnen Adaptierungsstrategien bei Identifizierungs- und NRTT-Aufgaben	109
Tabelle 19.	Bestätigungsmuster der Hypothese H3 für die einzelnen Adaptierungsstrategien	112
Tabelle 20.	Übersicht statistischer Signifikanzen und Trends je Adaptierungsstrategie.....	114
Tabelle 21.	Erkenntnisse und abgeleitete Maßnahmen aus Experiment 1.....	118
Tabelle 22.	Anzahl der Aufgabenarten im Validierungsexperiment	121
Tabelle 23.	Regeln zur Auslösung der Adaptierungsstrategien im Validierungsexperiment	122
Tabelle 24.	Rotationsschema in Experiment 2.....	123
Tabelle 25.	Berücksichtigung der Erkenntnisse aus der Analysephase der Arbeit	149
Tabelle 26.	Erfüllung der Voraussetzungen für implizite HCI nach Schmidt (2005)	151
Tabelle 27.	Rotationsschema der Voruntersuchung	174
Tabelle 28.	Auslösung von Adaptierungsstrategien in Testphase B	187
Tabelle 29.	Vergleich des zeitlichen Anteils kritisch hoher Beanspruchung und der subjektiven Anstrengung zwischen Testphase B und den übrigen Testphasen.....	187
Tabelle 30.	Subjektive Bewertung von Anstrengung und Müdigkeit im Vergleich zur Kontrollbedingung in der Testphase B.....	188
Tabelle 31.	Auslösung von Scheduling in Testphase BA	189
Tabelle 32.	Vergleich des zeitlichen Anteils kritisch hoher Beanspruchung und der subjektiven Anstrengung zwischen Testphase BA und den übrigen Testphasen	190
Tabelle 33.	Vergleich des zeitlichen Anteils falsch gerichteter Aufmerksamkeit zwischen den verschiedenen Testphasen und Testphase BA	190
Tabelle 34.	Subjektive Bewertung von Anstrengung und Müdigkeit im Vergleich zur Kontrollbedingung in der Testphase BA.....	191
Tabelle 35.	Auslösung von Adaptierungsstrategien in Testphase A	193
Tabelle 36.	Vergleich des zeitlichen Anteils falsch gerichteter Aufmerksamkeit zwischen Testphase A und den übrigen Testphasen	193

Tabelle 37. Subjektive Bewertung von Anstrengung und Müdigkeit im Vergleich zur Kontrollbedingung in der Testphase A.....	194
Tabelle 38. Auslösung von Auditory Cueing in Testphase M.....	195
Tabelle 39. Vergleich des zeitlichen Anteils passiver aufgabenbezogener Müdigkeit zwischen Testphase M und den übrigen Testphasen.....	196
Tabelle 40. Vergleich von subjektiver Anstrengung und subjektiver Müdigkeit zwischen Testphase M und den übrigen Testphasen.....	196
Tabelle 41. Subjektive Bewertung von Anstrengung und Müdigkeit im Vergleich zur Kontrollbedingung in der Testphase M.....	196
Tabelle 42. Statistische Kennwerte ausgelöster Adaptierungsstrategien in Experiment 1	205
Tabelle 43. Ergebnisse zur durchschnittlichen Dauer von Leistungseinbrüchen (Vergleich zwischen Adaptierungen und der Kontrollbedingung).....	206
Tabelle 44. Ergebnisse der Vergleiche von Anzahl, durchschnittlicher und kumulierter Präsenzdauer aller Teilaufgaben zwischen Adaptierungen und der Kontrollbedingung	208
Tabelle 45. Ergebnisse der Vergleiche von Anzahl, durchschnittlicher und kumulierter Dauer von Episoden kritisch hoher Beanspruchung und falsch gerichteter Aufmerksamkeit zwischen Bedingungen mit Adaptierungen und der Kontrollbedingung.....	211
Tabelle 46. Subjektive Bewertung der Adaptierungen hinsichtlich Anstrengung und Erschöpfung im Vergleich zur Kontrollbedingung	212
Tabelle 47. Ergebnisse der Vergleiche von Anzahl, durchschnittlicher und kumulierter Präsenzdauer aller Teilaufgaben zwischen Adaptierungen und der Kontrollbedingung	217
Tabelle 48. Anzahl, durchschnittliche und kumulierte Dauer von Leistungseinbrüchen, Aufgabenbearbeitung und Episoden kritischer Nutzerzustände über alle Teilaufgaben hinweg.....	227
Tabelle 49. Ergebnisse zu bearbeiteter Anzahl und Präsenzdauer von Bekämpfungsaufgaben und assoziierten Leistungseinbrüchen	228
Tabelle 50. Ergebnisse zu bearbeiteter Anzahl und Präsenzdauer von Warnaufgaben und assoziierten Leistungseinbrüchen.....	228
Tabelle 51. Ergebnisse zu bearbeiteter Anzahl und Präsenzdauer von Identifizierungsaufgaben und assoziierten Leistungseinbrüchen.....	228
Tabelle 52. Ergebnisse zu bearbeiteter Anzahl und Präsenzdauer von NRTT-Aufgaben und assoziierten Leistungseinbrüchen	229
Tabelle 53. Ergebnisse zu Anzahl und Präsenzdauer von Identifizierungsfehlern und assoziierten Leistungseinbrüchen.....	229
Tabelle 54. Ergebnisse zu bearbeiteter Anzahl und Präsenzdauer von Fakern sowie assoziierten Leistungseinbrüchen.....	229

1 Einführung

“We may state as characteristic of modern science that this scheme of isolable units acting in one-way causality has proved to be insufficient. Hence the appearance, in all fields of science, of notions like wholeness, holistic, organismic, gestalt, etc., which all signify that, in the last resort, we must think in terms of systems of elements in mutual interaction.”

– Ludwig von Bertalanffy (1969, S. 45)

1.1 Ausgangssituation und Problemstellungen

Automation galt lange Zeit als Lösung für den Umgang mit steigender technischer Komplexität. Ab den späten 1970er Jahren zeigte sich jedoch, dass eine zu hohe Automation, insbesondere in Bezug auf die menschliche Informationsverarbeitung, zu Problemen führen kann. Operateuren¹ wurden zunehmend Aufgaben zur Überwachung der Automation übertragen, für welche die Auslegung der menschlichen Informationsverarbeitung nur bedingt geeignet ist. Gleichzeitig wurde erwartet, dass der Operateur bei Versagen der Automation korrektiv eingreift, obwohl die Handlungen der Automation oft nicht nachvollziehbar waren und dadurch kein adäquates Situationsbewusstsein aufgebaut werden konnte. Bainbridge (1983) bezeichnete diese Phänomene als Ironien der Automation (engl.: *Ironies of Automation*). Die damals vorrangig aus der Luftfahrt stammenden Herausforderungen begegnen uns heute wieder in Arbeiten zum autonomen Fahren auf der Straße (z. B. Casner et al., 2016) oder auf See (z. B. Mallam et al., 2020).

Eine mögliche Ursache für diese Probleme ist, dass technische Systemkomponenten nach wie vor oft als passive Artefakte, d.h. als von Menschen zu bedienende Werkzeuge, angesehen werden. Diese kategorische Gleichsetzung mit einer Schreibmaschine oder einem Taschenrechner hat zur Folge, dass die Datenverarbeitung durch eine technische Apparatur weitgehend isoliert von der steuernden oder eingebenden Intelligenz (Mensch) betrachtet wird. Die Begriffe „Systembediener“ und „Systemoperateur“ verdeutlichen diese klassische Sichtweise und auch Begriffe wie „menschzentrierte Gestaltung“ (z. B. DIN EN ISO 9241-210, 2019) bauen darauf auf. Abbildung 1 illustriert dieses Prinzip, das in seinen Grundzügen in der Informatik als Eingabe-Verarbeitung-Ausgabe (EVA)-Modell bekannt ist (vgl. bspw. Herold et al., 2007).

Erst in den letzten Jahren findet, getrieben durch den Boom der künstlichen Intelligenz, ein Umdenken statt. Viele Benutzungsschnittstellen sind aber heute noch so gestaltet, dass Nutzer explizite Aktionen ausführen und die Technik auf detektierte Ereignisse (z. B. Tastendruck, Mausklick, Sprachbefehl) durch Aufruf vordefinierter Funktionen reagiert.

¹ Bei Personenbezeichnungen und personenbezogenen Hauptwörtern wird zur besseren Lesbarkeit ein generisches Maskulinum verwendet. Die verkürzte Sprachform beinhaltet keine Wertung und bezieht sich gleichermaßen auf die männliche, die weibliche und andere Geschlechteridentitäten.

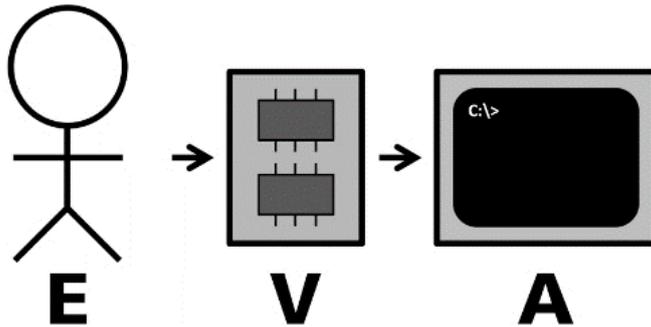


Abbildung 1. Einfaches Eingabe-Verarbeitung-Ausgabe (EVA)-Modell

Das wesentliche Vorgehen einer solchen *expliziten Interaktion* fasst Schmidt (2005), analog zum EVA-Prinzip, in folgenden Schritten zusammen:

1. Der Bediener fordert das System auf, eine bestimmte Aktion auszuführen.
2. Die Aktion wird vom Computer ausgeführt, wobei moderne Schnittstellen eine Rückmeldung über diesen Vorgang geben.
3. Das System reagiert mit einer entsprechenden Antwort, die in einigen Fällen leer sein kann.

Durch technische Innovationen, die zunehmende Vernetzung heterogener Entitäten und nicht zuletzt die zunehmende Nutzung künstlicher Intelligenz entstehen jedoch immer komplexere Gesamtsysteme, deren Eigenschaften mit dem EVA-Modell nicht mehr abgebildet werden können. Sie bestehen aus zahlreichen verteilten und vernetzten Untersystemen, die über Sensoren und Kommunikationskanäle selbst an die Umwelt und gegenseitig aneinander angebunden sind und durch diese beeinflusst werden. Aufgrund zunehmender Automation und intelligenter Algorithmik werden Daten zudem nicht mehr zwangsläufig zurück an den Bediener ausgegeben, sondern auch direkt von Maschinen in Handlungen übersetzt, die der Mensch nicht mehr direkt kontrollieren und teilweise nicht einmal mehr nachvollziehen kann.

„Autonome Technik“ und „intelligente Systeme“ befinden sich auf dem Vormarsch, sind jedoch in manchen Bereichen, sei es die Teilnahme am Straßenverkehr oder der Einsatz von Waffen, (noch) unerwünscht oder sogar rechtlich oft unmöglich – die Verantwortung muss oder soll beim Menschen verbleiben (vgl. „Design for Responsibility“; Herczeg, 2014). So wurde beispielsweise die Wiener Konvention für Straßenverkehr von 1968 im Jahr 2014 derart erweitert, dass sie Systeme erlaubt, mit denen Fahrzeuge autonom fahren. Jedoch müssen diese jederzeit vom Fahrer übersteuert oder deaktiviert werden können, damit die Haftung beim Menschen verbleiben kann (UN ECE, 2014). Insbesondere in kritischen Situationen wird also auf die Fähigkeit des Menschen gebaut, alle nötigen Maßnahmen zu ergreifen, um Leistung und Stabilität des Gesamtsystems zu erhalten. Begriffsschöpfungen wie „Mensch-Maschine-System“, „Human-Systems Integration“ oder gar „Human-Computer Symbiosis“ (Licklider, 1960) sind bezeichnend für diese hohe Integration von Mensch und Technik.

Je fordernder die Aufgaben werden, je komplexer die Technik wird und je autarker sie agiert, desto schwieriger wird es jedoch für den Menschen, diese Aufgabe zu erfüllen. Denn die Aufgaben moderner Mensch-Maschine-Systeme sind häufig so komplex, dass weder Mensch noch Maschine unabhängig voneinander das gemeinsame Arbeitsziel erreichen können. Diese Art der „Mensch-Maschine-Kooperation“ (Millot & Lemoine, 1998; Hoc, 2000) erfordert eine

Wechselwirkung zwischen Mensch und Technik, die einem sozialen System ähnlicher sein kann als dem Verhältnis zwischen Mensch und Werkzeug¹.

Die Techniksoziologen Rammert und Schulz-Schaeffer (2002) argumentieren, dass Maschinen und Programme tatsächlich zunehmend Initiative und Aktionsfähigkeit zeigen, menschliche Kooperations- und Koordinationsformen übernehmen und weitgehend selbständig Arbeitsaufträge abarbeiten. Insbesondere können Softwareagenten mit künstlicher Intelligenz die eigenen Aktionen unter Berücksichtigung von – und in Abstimmung mit – der Umwelt selbständig auswählen. So erscheinen sie „eher wie persönliche Assistenten denn als passive Instrumente, wenn sie mit den Menschen interagieren“ (ebd., S. 7). Dadurch entstehe der Eindruck eines Netzwerks menschlicher und nicht-menschlicher Handlungsfähigkeit. Im Sinne des diese Arbeit einleitenden Zitats sollten moderne Mensch-Maschine-Systeme zudem als gemeinsames Ganzes aus Mensch und Maschine betrachtet werden, dessen Komponenten sich gegenseitig beeinflussen. Vom Technikphilosophen Günter Ropohl (1979, 2009) wurde für Konstellationen, in denen Mensch und Technik „eine untrennbare Handlungseinheit darstellen“ (Ropohl, 2009, S. 59) der Begriff des *soziotechnischen Systems* geprägt (Abbildung 2). Dieser löst die Dualität von Materialität und Sozialität auf, indem nicht das technische Artefakt im Mittelpunkt steht, sondern dessen Wirkung in Verknüpfung mit anderen – sozialen – Komponenten (Weyer, 2008).

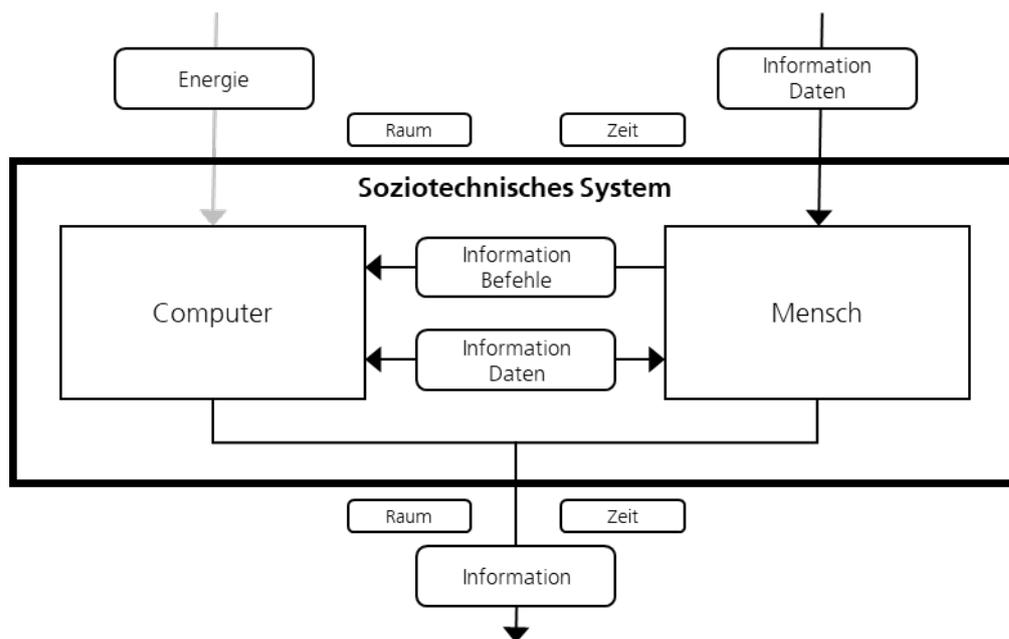


Abbildung 2. Soziotechnisches System nach Ropohl (2009)

Aufgrund der Wechselwirkungen zwischen seinen menschlichen und technischen Komponenten steht die Leistung des soziotechnischen Gesamtsystems aus Mensch und Technik in direkter Abhängigkeit zur (kognitiven) Leistung des menschlichen Operateurs und stellt dadurch gemäß Hevner et al. (2004) ein „wicked problem“ dar, das aufgrund seiner Komplexität oder Einzigartigkeit keine klar formulierbare oder verlässliche Lösung hat (vgl. Rittel & Webber, 1973).

¹ Eine ausführlichere Diskussion dieser These findet sich in Fuchs et al., 2015.

Dies gilt insbesondere dann, wenn die Technik eben nicht „autonom“ agiert, sondern das technische Untersystem eines Mensch-Maschine-Systems darstellt, in dem der menschliche Bediener die Verantwortung für das Gesamtsystem tragen soll. Daraus ergeben sich erhebliche ergonomische Herausforderungen für die Gestaltung der Mensch-Maschine-Interaktion (MMI). Durch die gestiegene technische Komplexität und die Heterogenität zusammenwirkender Entitäten werden Bediener zunehmend vor Herausforderungen gestellt, die sich im kognitiven und emotionalen Zustand bemerkbar machen können. Beispielsweise kann es bei der Arbeit mit hochautomatisierten Systemen zu einer Verlagerung der menschlichen Tätigkeit auf Überwachungs- und Entscheidungsaufgaben kommen. Das kognitive System des Menschen ist jedoch nicht für Dauerüberwachungsaufgaben ausgelegt, so dass eine solche Aufgabenverlagerung mit einem Rückgang der Vigilanz, einer Verminderung des Situationsbewusstseins und dem Verlust von Fertigkeiten einhergehen kann (bspw. Parasuraman & Riley, 1997; Woods, 1996). In anderen Fällen kann die Systemkomplexität, z. B. die Menge der Systemkomponenten und möglicher Modi, die Vielfalt der technisch erfassten und dargestellten Daten oder das Auftreten emergenter Eigenschaften den Operateur überfordern. Problematisch wird das, sobald kritische mentale Zustände des Menschen die Leistung und die Stabilität des Gesamtsystems gefährden (Gouraud et al., 2017; Lin et al., 2018; Kortschot et al., 2020).

1.1.1 Adaptive Mensch-Maschine Interaktion

Um den vorgenannten Herausforderungen zu begegnen, plädieren Schwarz und Fuchs (2014) in gemeinsamen Vorarbeiten zu ihren Promotionsvorhaben (siehe Abschnitt 2.5) für einen Ansatz der MMI, bei dem nicht nur die menschliche, sondern auch die technische Komponente aktiv zur Leistung und Stabilität des Gesamtsystems beiträgt. Neben einem Verständnis des Menschen für die Maschine erfordert dies auch ein „Verständnis“ der Maschine für den Menschen, um Leistungseinbrüche in der menschlichen Informationsverarbeitung zu erkennen und zu kompensieren. Voraussetzung hierfür ist, dass die Maschine den Zustand der Umwelt und des Menschen erfassen und bewerten kann.

Rothrock et al. (2002) definieren *Adaptive User Interfaces* (AUIs) als Systeme, die ihre Präsentation und verfügbare Handlungen an aktuelle Ziele des Nutzers anpassen und über die Fähigkeit verfügen, den Nutzerzustand, den Systemzustand und die aktuelle Situation zu überwachen. Ansätze adaptiver MMI können die relevante Umwelt der Maschine, in der sich auch der menschliche Operateur befindet, in den „Handlungen“ der Maschine berücksichtigen. Die technologische Komponente des Systems kann ihr Verhalten dadurch an sich ändernde Bedürfnisse des Nutzers anpassen, ohne dass dies einer expliziten Anweisung des Nutzers bedarf (Feigh et al., 2012). Schmidt (2000) bezeichnet dies als „implizite Interaktion“. Dix (2002) nennt Interaktionen, die auf Sensoren oder Interpretation von Kontext basieren, „incidental interactions“.

Um in Bezug auf den Menschen handlungsfähig zu sein, muss die adaptive Technik zunächst Informationen über ihren Interaktionspartner erhalten, was Erfassung und Diagnose von dessen Eigenschaften und Zustand sowie externer Faktoren, die seinen Zustand beeinflussen, voraussetzt. Diese Kopplung von Nutzerzuständen mit technischen Artefakten wird als „Biocybernetic Loop“ bezeichnet (Pope et al., 1995) und funktioniert folgendermaßen: Das technische System diagnostiziert Probleme mit der Leistung sowie relevante Nutzerzustände und adaptiert sein Verhalten, zum Beispiel durch Veränderungen in der Interaktion, um kritische Zustandsausprägungen zu adressieren oder die Leistung des Mensch-Maschine-Gesamtsystems wiederherzustellen. Wird durch die Anpassung die kritische Ausprägung des Nutzerzustands

gelindert, wirkt sich dies positiv auf die Leistung aus. Die Änderungen von Zustand und Leistung werden wiederum von der Diagnose erkannt, so dass die Adaptierung an die neuen Gegebenheiten angepasst werden kann. Der so entstehende Regelkreis ist ein „Closed-Loop Adaptive System“ (CLAS; Abbildung 3).

Mit mehreren Ansätzen (siehe Abschnitt 2.4) wurde die Herausforderung, dieses Wirkprinzip zu nutzen, bereits gesucht. Trotz vielversprechender Fortschritte in Laborexperimenten und mit funktionalen Demonstratoren konnten sich solche Mechanismen jedoch bis heute nicht bei der Gestaltung von MMI etablieren. Es gibt zwar im Massenmarkt vereinzelt technische Systeme, die Nutzerzustände diagnostizieren, um technikseitig zu intervenieren, jedoch sind diese relativ einfach gehalten. Populäre Beispiele sind die Müdigkeitserkennung in Fahrzeugen, die Fahrer zu einer Pause auffordern, wenn sie Anzeichen von Müdigkeit zeigen, und Navigationssysteme, die in Bewegung keine Eingaben mehr zulassen, um Ablenkung zu vermeiden. Auch gibt es zunehmend Computerspiele, die auf okulomotorische Maße reagieren. Bei komplexeren Anwendungssituationen außerhalb kontrollierter Laborumgebungen stoßen Systeme mit adaptiver MMI jedoch an ihre Grenzen, insbesondere wenn die Anforderungssituation in der realen Welt so vielschichtig ist, dass ein rein symptomatisches Reagieren auf Zustandsveränderungen des Operateurs zu kurz greift.

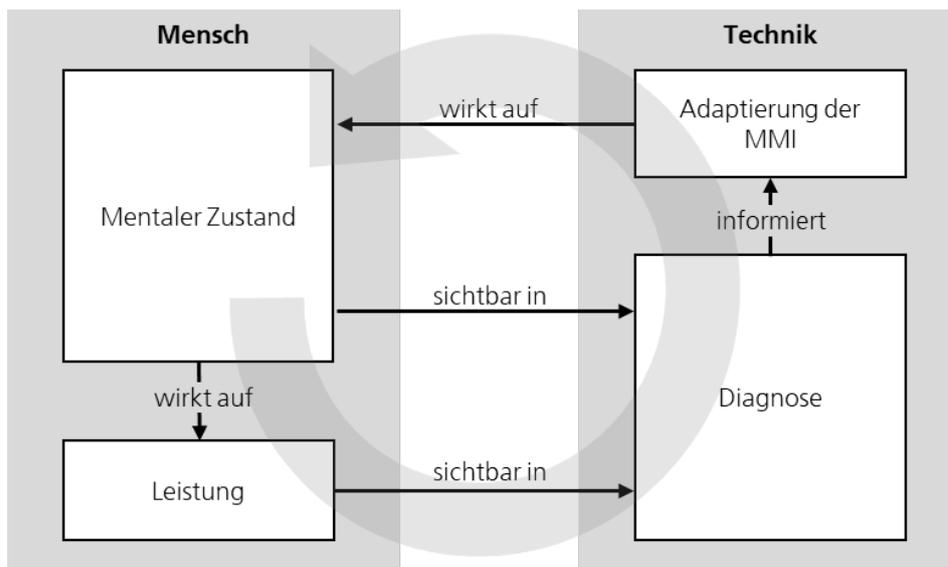


Abbildung 3. Funktionsweise eines biokybernetischen Closed-Loop Adaptive System (CLAS)

1.1.2 Berücksichtigung von Kontext

Biokybernetische Systeme (Pope et al., 1995) nutzen physiologische Sensorik, um mentale Zustände zu diagnostizieren und Adaptierungen auszulösen. In sicherheitskritischen Umgebungen sollen Adaptierungen mentale Problemzustände adressieren und die Leistung wiederherstellen oder verbessern (Abschnitt 2.4 bietet eine Übersicht). Obwohl die Detektion eines kritischen mentalen Zustands ein Indikator für Adaptierungsbedarf sein kann, sagt dieser jedoch nichts darüber aus, welche Art von Adaptierung in der gegebenen Situation angemessen wäre (Fuchs et al., 2006). Zwei Beispiele sollen diesen Bedarf für die Berücksichtigung des Kontexts verdeutlichen:

Beispiel 1: Ein noch unerfahrener Operateur zögert bei der Bearbeitung einer Aufgabe. Er bemüht sich zu erinnern, was er als nächstes tun soll. Während er noch überlegt, verschwindet die Aufgabe plötzlich. Physiologische Sensoren hatten eine hohe

Beanspruchung detektiert und als Reaktion darauf eine Automationsstrategie zur Adressierung des Problemzustands ausgelöst. Der Ansatz, bei einem überlasteten Operateur die Belastung durch Automation zu verringern, klingt zunächst plausibel, ist aber nicht in jedem Fall sinnvoll. Im vorliegenden Fall war die erhöhte kognitive Aktivität lediglich auf mangelnde Erfahrung zurückzuführen. Unerfahrene Personen benötigen mehr kognitive Ressourcen, um Informationen abzurufen oder in ihr mentales Modell zu integrieren. Die Automation nahm dem Operateur die Chance einer Lernerfahrung und verwirrte ihn obendrein.

Beispiel 2: Ein Leistungseinbruch entsteht, weil eine wichtige Information nicht beachtet wurde. Wie soll das System reagieren? Ursächlich für Aufmerksamkeitsdefizite können sowohl akute Überforderung als auch eine Vigilanzminderung durch Erschöpfung (z. B. nach einer langen Schicht) sein. Die Anforderungen an das Vorgehen sind in den beiden Fällen sehr unterschiedlich. Im Falle einer Vigilanzminderung (z. B. Parasuraman, 1987) wäre eine zusätzliche Stimulation durch die Adaptierung hilfreich. Im Fall einer Überforderung würde die Stimulation weitere kognitive Ressourcen beanspruchen oder der Stimulus würde aufgrund eingengter Wahrnehmung (*attentional tunneling*; Wickens, 2005) eventuell gar nicht wahrgenommen.

Die beiden Beispiele machen deutlich, dass zwar in beiden Fällen Adaptierungsbedarf aufgrund eines kritischen kognitiven Zustands vorliegt, die Auswahl einer angemessenen Adaptierung aber abhängig vom Zustandskontext erfolgen muss. Symptombasierte Adaptierungen berücksichtigen nur unzureichend die Ursachen der Zustandsveränderungen, Wechselwirkungen zwischen verschiedenen Dimensionen des Nutzerzustands (vgl. Abschnitt 2.5.2), den Aufgabenkontext oder die aktuellen Anforderungen des Operateurs. Lavie und Meyer (2010) zeigten, dass adaptive MMI ohne angemessene Berücksichtigung von Nutzer- und Aufgabenkontext unerwünschte Auswirkungen haben kann. Auch Fuchs et al. (2007) bieten einen Überblick über potenzielle Kosten und Nutzen für eine Reihe von Adaptierungsstrategien, die zuvor in Augmented Cognition (AugCog)-Systemen (vgl. Abschnitt 2.4.3) verwendet wurden. Beispielsweise können folgende Probleme auftreten.

- Nach Kaber et al. (2001) werde oft vernachlässigt, dass die Unterstützungsstrategien selbst auch die Beanspruchung steigern können, da der Operateur diese ebenfalls kognitiv verarbeiten muss.
- Einige Adaptierungsstrategien gingen laut Dorneich et al. (2004) zu Lasten eines Verlustes des Situationsbewusstseins (SA) und des Wissens über die Umwelt.
- Haarmann et al. (2009) geben zu bedenken, dass eine plötzliche Änderung oder ein plötzliches Eingreifen des Systems beim Operateur zu Verwirrung führen kann.
- Wenn sich das Verhalten des Systems dynamisch ändert, können Probleme mit „Mode Awareness“ (Sarter & Woods, 1995) auftreten. Dieser Begriff bezeichnet das Bewusstsein des Bedieners darüber, in welchem (Adaptierungs-) Modus sich das technische System befindet.
- Hale et al. (2006) beobachteten Probleme aufgrund des Kontextwechsels zwischen Adaptierungszuständen: Schnelle Wechsel der Adaptierungen führten zu Ablenkung und Verwirrung darüber, worauf die adaptiven Hinweise bezogen waren. Probanden beschrieben das System als eines, das „herumsprang“ und keinem konsistenten Muster folgte.

Die Auswirkungen ähneln denen, die bei Wechselwirkungen mit automatisierten Systemen beobachtet werden. So kann adaptive Automation in einer Stresssituation dabei helfen, die Leistung aufrechtzuerhalten. Bleibt die Automation aber über die Stresssituation hinaus aktiv, können bekannte Automationsprobleme auftreten. Es besteht die Gefahr von Overreliance und Complacency (siehe Abschnitt 2.3), d.h. dass die Aufgabe durch den Nutzer nur noch passiv und unkritisch verrichtet wird, weil er sich übermäßig auf die Lenkung durch die Adaptierungen verlässt. Lehren aus der Automationsforschung (z. B. Endsley, 1996; Breton & Bossé, 2003) sollten daher bei der Entwicklung adaptiver MMI berücksichtigt werden.

Damit die technische Komponente eines Mensch-Maschine-Systems problemadäquat auf Veränderungen in der Umwelt reagieren kann, müsste ihr durch Erfassung und Auswertung heterogener Daten aus ihrer Umwelt eine Art Situationsbewusstsein verschafft werden, welches auf das System einwirkende Einflüsse umfasst. Schon Winter et al. (1997) stellten in Bezug auf Entscheidungsunterstützungssysteme fest, dass dynamische intelligente Agenten ein Bewusstsein für den Aufgabenstatus, den Systemstatus und den kognitiven Status des Bedieners benötigen, um den Bedienern bei der Aufgabenerfüllung effektiv zu helfen. Zur angemessenen Berücksichtigung der kontextuellen Informationen in der adaptiven MMI wird in dieser Arbeit eine Komponente des technischen Systems vorgeschlagen, die das adaptive Verhalten aktiv managt – ein *Adaptierungsmanagement*.

1.1.3 Herausforderung Adaptierungsmanagement

Schon frühere Ansätze haben Adaptierungen genutzt, um diagnostizierte kritische Nutzerzustände zu adressieren (vgl. auch Abschnitt 2.4). Bisherige Forschungsarbeiten zielten aber hauptsächlich darauf ab, die limitierten kognitiven Ressourcen des Bedieners zu überwachen, um Überlastung oder falsch gerichtete Aufmerksamkeit verhindern zu können (z. B. Wilson & Russell, 2006). Auswahl und Auslösung von Adaptierungen waren dabei in den meisten Fällen an statische Bedingungen geknüpft, etwa: Wenn Nutzerzustand X eintritt, aktiviere Adaptierung A_x , bis der Zustand sich geändert hat. In anderen Fällen gab es keine Bedingung zum Beenden der Adaptierung, so dass diese nach Aktivierung dauerhaft aktiv blieb (Tremoulet et al., 2005; Wilson & Russell, 2006), obwohl die auslösenden Bedingungen gar nicht mehr vorlagen.

Zwar kann das Erkennen eines kritischen Zustands auf einen Adaptierungsbedarf hinweisen, der Zustand allein gibt jedoch wenig Aufschluss über die Art der Adaptierung, die in Bezug auf die gegebene Situation angemessen wäre. Entsprechend stellten Fuchs et al. (2006) fest, dass physiologische Diagnostik allein nicht ausreichend ist, um Adaptierungen wirksam zu steuern. Situation und Kontext ändern sich ständig und werden auch durch die ausgelösten Adaptierungsstrategien selbst beeinflusst. Daher können Adaptierungen der MMI nur eine vorübergehende Adressierung vorübergehender Probleme sein. Da bisherige Ansätze zum Management von Adaptierungen den Kontext oft nur unzureichend berücksichtigen, bieten sie der technischen Zustandsregulierung auch nur sehr eingeschränkte interne Variabilität bei der Auswahl geeigneter Handlungsoptionen. Sobald die auslösende Situation nicht mehr vorliegt, kann eine ehemals adäquate Adaptierungsstrategie aufgrund veränderter Rahmenbedingungen unangemessen werden. Bleibt diese dann aktiv, ist sie nicht mehr kontextadäquat und kann dadurch kognitive Kosten verursachen, wie im vorigen Abschnitt dargestellt wurde.

1.2 Gestaltungslücke

Wie in den vorangegangenen Abschnitten dargestellt, umfasst die Gestaltungslücke bei adaptiver Gestaltung der MMI auf Basis mentaler Nutzerzustände mehrere Aspekte, die in der folgenden Aufzählung nochmals zusammenfassend dargestellt werden:

- Der kognitive Zustand wird meist nur eindimensional berücksichtigt. Dabei werden Abhängigkeiten von anderen Dimensionen und Wechselwirkungen zwischen den Dimensionen vernachlässigt.
- Nutzerzustandsabhängige Adaptierungen der MMI beziehen sich häufig allein auf kritische Zustandsausprägungen, um zu ermitteln, *wann* adaptive Unterstützung erforderlich ist, berücksichtigen aber nicht den aktuellen Aufgaben- und Anforderungskontext um festzulegen, *was* und *wie* unterstützt werden sollte.
- Auswahl und Anpassung von Adaptierungen erfolgen häufig wenig dynamisch, ohne Berücksichtigung der kognitiven Kosten der Adaptierung und der kontinuierlichen Änderung der Anforderungssituation.

Diese Gestaltungslücke soll mit der vorliegenden Arbeit geschlossen werden, damit die technische Komponente eines Mensch-Maschine-Systems in Bezug auf Veränderungen von Nutzer- und Umweltzuständen bedarfsadäquat reagieren kann. Dafür wird eine technische Komponente benötigt, die Auswahl, Konfiguration, Aktivierung und Deaktivierung von Adaptierungen der MMI kontextsensitiv steuert, um detektierte Problemzustände zu adressieren – das *Dynamische Adaptierungsmanagement*.

1.3 Zielsetzungen

Übergeordnete Forschungsziele der vorliegenden Arbeit sind die Konzeption, der Entwurf und die Evaluation einer technischen Komponente zur dynamischen Adaptierung der Mensch-Technik-Interaktion auf der Basis mentaler Nutzerzustände und Informationen über die Umwelt und den situativen Kontext. Die vorliegende Dissertation fokussiert demnach auf Mensch-Maschine-Interaktion im Kontext von kognitiven Assistenzsystemen. Arbeitsrichtung ist die Adressierung kritischer mentaler Zustände durch adaptive Auswahl und Auslösung technischer Assistenzstrategien.

Die Originalität der in dieser Arbeit entworfenen Komponente für ein Dynamisches Adaptierungsmanagement besteht darin, dass die Auswahl, Konfiguration und Auslösung von Adaptierungsstrategien kontextsensitiv und nahezu in Echtzeit erfolgen soll. Dafür muss jedoch nicht nur ermittelt werden, ob und wann eine Adaptierung nötig ist, sondern auch, auf welche Weise das technische Verhalten adaptiert werden kann, um Zustand und Leistung bedarfsadäquat zu beeinflussen. Daraus ergibt sich die erste Forschungsfrage dieser Arbeit:

- **Forschungsfrage 1:** Wie kann das Dynamische Adaptierungsmanagement konzeptionell gestaltet werden, damit die Auswahl, Konfiguration und Auslösung von Adaptierungen bedarfsadäquat erfolgen kann?

Ziel der Adaptierungen ist es, mentalen Zuständen, die sich negativ auf die Leistung auswirken, entgegenzuwirken und so die Leistung zu verbessern. Die Realisierung eines Dynamischen Adaptierungsmanagements erfordert daher die Entwicklung geeigneter Adaptierungsstrategien, mit denen mentale Nutzerzustände beeinflusst werden können. Für deren Gestaltung bieten sich Erkenntnisse der Kognitionspsychologie an, um sie optimal auf die menschliche

Informationswahrnehmung und –verarbeitung auszurichten. Daher lautet die zweite Forschungsfrage:

- **Forschungsfrage 2:** Mit welchen kognitionspsychologisch fundierten Strategien können kritische mentale Nutzerzustände im Rahmen des Dynamischen Adaptierungsmanagements adressiert werden?

Das Dynamische Adaptierungsmanagement und die Adaptierungsstrategien werden zunächst abstrakt konzipiert, um eine Generalisierbarkeit zu gewährleisten und so die Übertragung auf verschiedene Anwendungsbereiche und Domänen zu ermöglichen. Zur Überprüfung von Nutzbarkeit, Praktikabilität und Validität ist es jedoch notwendig, diese auf ein konkretes Fallbeispiel anzuwenden:

- **Forschungsfrage 3:** Wie können das abstrakt konzipierte Dynamische Adaptierungsmanagement und die Adaptierungsstrategien in einer relevanten Aufgabenumgebung operationalisiert werden?

Schließlich müssen Nutzen und Validität des zu entwickelnden Ansatzes untersucht und überprüft werden. Dementsprechend ist ein weiteres Ziel der Arbeit die empirische Untersuchung und Validierung der entwickelten Konzepte und Artefakte.

- **Forschungsfrage 4:** Kann mit dem Dynamischen Adaptierungsmanagement Leistungseinbrüchen und kritischen mentalen Zuständen der Nutzer in der gewählten Aufgabenumgebung effektiv entgegengewirkt werden?

1.4 Vorgehensweise

Nach Österle et al. (2010) besteht der Erkenntnisprozess der gestaltungsorientierten Wirtschaftsinformatik aus vier Phasen: Analyse, Entwurf, Evaluation und Diffusion (Abbildung 4). An diesen Phasen orientiert sich auch das Vorgehen in der vorliegenden Arbeit.

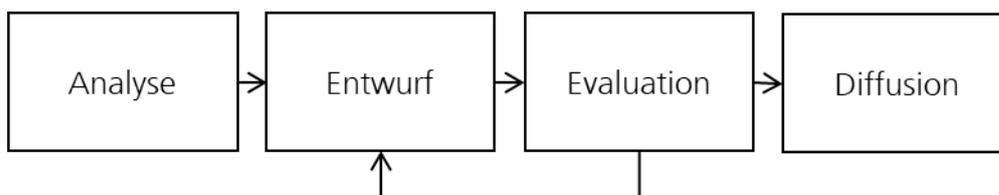


Abbildung 4. Erkenntnisprozess der gestaltungsorientierten Wirtschaftsinformatik nach Österle et al. (2010)

Dabei kommt eine methodenpluralistische Erkenntnisstrategie (Wilde & Hess, 2006) zur Anwendung. Beim Entwurf des Dynamischen Adaptierungsmanagements und der beispielhaften Adaptierungsstrategien bedient sie sich zunächst konstruktiver Methoden: Auf Basis einer *Analyse* des Stands der Forschung erfolgt der konzeptionell-deduktiv *Entwurf* eines allgemeinen Vorgehensmodells für das Dynamische Adaptierungsmanagement. Die Herleitung geeigneter Adaptierungsstrategien erfolgt argumentativ-deduktiv auf der Basis kognitionspsychologischer Theorien. Zur Realitätsabbildung werden die entworfenen Artefakte danach anhand einer beispielhaften Domäne in einem experimentellen Prototyp operationalisiert.

Die *Evaluations*phase nutzt den konstruierten Prototypen zur Überprüfung der Zielerreichung mithilfe der verhaltenswissenschaftlichen Methode des Laborexperiments. Diese Methode dient der Untersuchung von Kausalzusammenhängen in künstlicher Umgebung und wird von Wilde & Hess (2006) als „behavioristisch mit konstruktiven Elementen“ eingeordnet, wobei die

Konstruktion der experimentellen Laborsituation das konstruktive Element darstellt. Demgemäß durchläuft das Laborexperiment in sich einen eigenen Erkenntnisprozess, der stark formalisiert ist und aus Versuchsdesign, Datenerhebung und –auswertung sowie deren Interpretation besteht. Zur Berücksichtigung der jeweiligen Erkenntnisse werden die Operationalisierung der adaptiven Funktionalitäten sowie das Versuchsdesign nach jedem Experiment iterativ angepasst.

Zur *Diffusion* der Ergebnisse des Promotionsvorhabens wurden die Arbeiten regelmäßig in den wissenschaftlichen Diskurs eingebracht. Eine Liste der eigenen Veröffentlichungen zum Thema der Dissertation findet sich in Abschnitt 9.2.

1.5 Gliederung

Die Gliederung der Arbeit wird in Abbildung 5 zunächst schematisch dargestellt und im Folgenden näher erläutert.

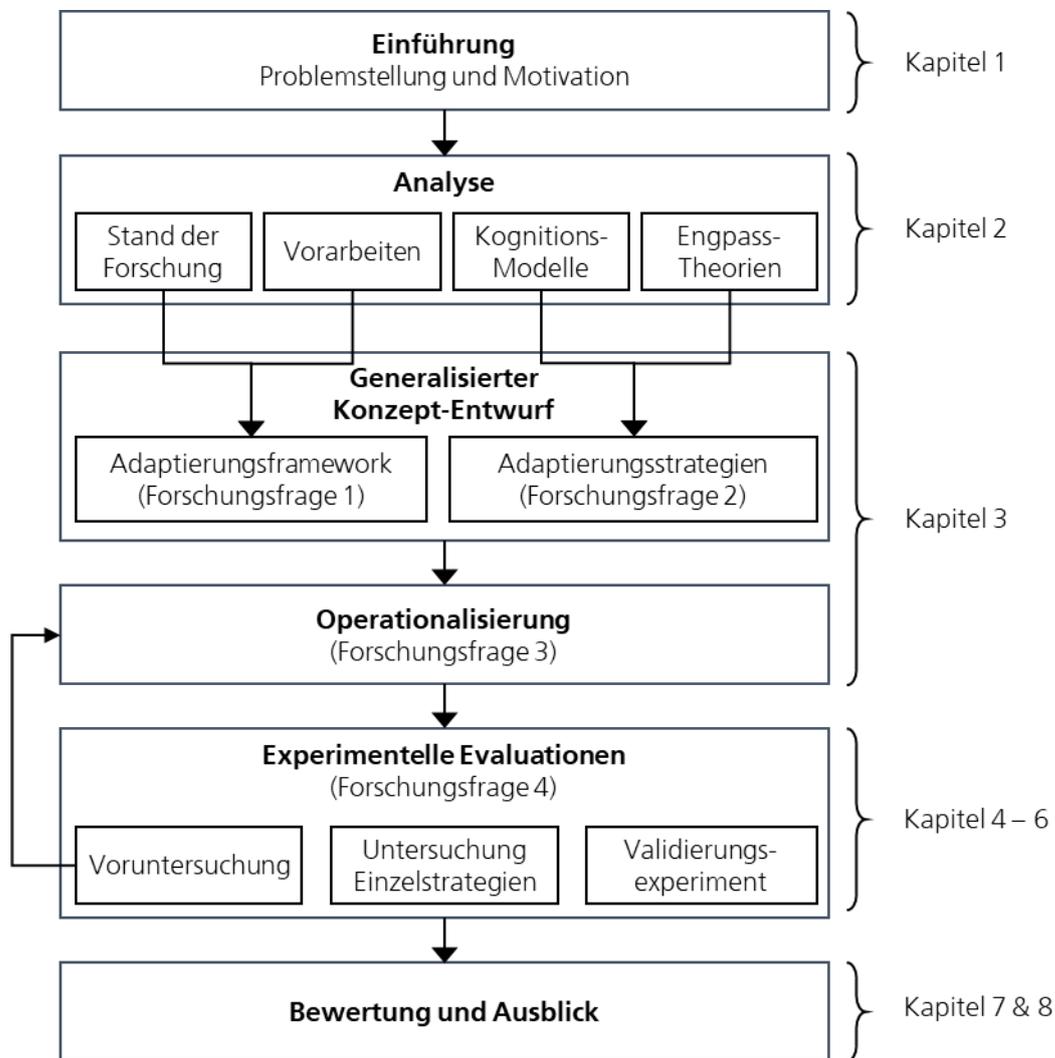


Abbildung 5. Illustration der Vorgehensweise

Einleitend erfolgte in Kapitel 1 eine Einführung in das Thema, um die Ausgangssituation zu analysieren und die allgemeine Problemstellung der Arbeit herauszuarbeiten. Um das Vorhaben in den bestehenden wissenschaftlichen Kontext einordnen zu können, werden in Kapitel 2 zunächst die tangierten theoretischen Grundlagen erhoben. Im Gegensatz zu den technisch

getriebenen Ansätzen zur adaptiven MMI, insbesondere aus der Automationsforschung, verfolgt diese Arbeit einen humanzentrierten Ansatz, der die Einflussfaktoren des Problems aus theoretischen Konzepten der Kognitionspsychologie herleitet. Die vorgenommene Analyse dieser kognitionspsychologischen Grundlagen dient später der argumentativ-deduktiven Herleitung von Adaptierungsstrategien. Die identifizierte Gestaltungslücke wird anschließend durch die Betrachtung bisheriger Ansätze adaptiver MMI präzisiert. Dabei wird auch der Bedarf für ein Dynamisches Adaptierungsmanagement aus der Betrachtung bisheriger Herangehensweisen an Adaptierung hergeleitet und begründet. Zusätzlich erfolgt eine Einführung in die multifaktorielle Nutzerzustandsdiagnose von Schwarz (2019), die als assoziierte Vorarbeit die Grundlage für die Diagnose mentaler Nutzerzustände darstellt, sowie in weitere gemeinsame Vorarbeiten wie ein vom Autor gemeinsam mit Schwarz entwickeltes und verwendetes Rahmenwerk für adaptive MMI. Als Ergebnis der Analysephase werden mit Blick auf **Forschungsfrage 1** Erkenntnisse abgeleitet, die eine Grundlage für den Entwurf des Dynamischen Adaptierungsmanagements bilden.

Kapitel 3 beschreibt zunächst einen abstrahierten (d. h. aufgabenagnostischen) Entwurf des Dynamischen Adaptierungsmanagements, der konzeptionell-deduktiv unter Berücksichtigung der erarbeiteten theoretischen Grundlagen und des Stands der Forschung erfolgt (Abschnitt 3.1). Dieses Artefakt befähigt die technische Komponente eines Mensch-Maschine-Systems, auf Veränderungen in der Leistung und in mentalen Nutzerzuständen zu reagieren. Die *interne Variabilität* des technischen Systems, also seine Fähigkeit, sich oder sein Verhalten variabel zu gestalten, wird durch die dynamische Auswahl von Adaptierungsstrategien geschaffen, die bestimmte Aspekte der Interaktion beeinflussen und in Abschnitt 3.2 argumentativ-deduktiv aus den dargestellten kognitionspsychologischen Grundlagen hergeleitet werden (**Forschungsfrage 2**).

Um eine Evaluation zur „Überprüfung der geschaffenen Artefakte gegen die anfangs definierten Ziele“ (Österle et al., 2010, S. 668) zu ermöglichen, muss das erarbeitete Konzept als experimenteller Prototyp mit einer relevanten Aufgabe operationalisiert und implementiert werden (**Forschungsfrage 3**). Experimentelles Prototyping fokussiert auf die technische Implementierung eines Entwicklungsziels und gibt den Entwicklern Gelegenheit, die Eignung und Machbarkeit des Systems einzuschätzen (Budde et al., 1992). Um Einsichten in die Zieldomäne „militärische Luftraumbeobachtung“ hinsichtlich der mentalen Herausforderungen und relevanter Einflussfaktoren auf die Leistung zu erlangen, wurde zunächst ein semistrukturiertes Experteninterview (Abschnitt 3.3) durchgeführt. Die qualitativen Antworten erlauben die Ableitung von Implikationen für die Gestaltung des Versuchsdesigns zur Evaluation. Abschließend beschreiben Abschnitt 3.4 die prototypische Umsetzung der Experimentalumgebung und Abschnitt 3.5 die Operationalisierung und Gestaltung der adaptiven Funktionalitäten in der gewählten Experimentalumgebung.

Der empirische Teil der Arbeit (Kapitel 4 bis 6) umfasst experimentelle Evaluationen und dient der quantitativ-behavioristischen Nachweisführung, dass mit dem Dynamischen Adaptierungsmanagement Leistungseinbrüchen und kritischen mentalen Zuständen der Nutzer in der gewählten Aufgabenumgebung effektiv entgegengewirkt werden kann (**Forschungsfrage 4**). In drei Laboruntersuchungen werden dazu mit einem experimentellen Prototyp des Dynamischen Adaptierungsmanagements die Leistung und der Umfang auftretender Problemzustände im Vergleich zu einer Kontrollbedingung ohne adaptive Assistenzfunktionen verglichen. Zunächst wird die Wirksamkeit der einzelnen Adaptierungsstrategien individuell evaluiert (Kapitel 4 und 5). Anschließend erfolgt die empirische Validierung des Dynamischen

Adaptierungsmanagements, bei dem die verschiedenen Adaptierungen im dynamischen Zusammenspiel agieren. Dafür wird eine weitere experimentelle Untersuchung durchgeführt, die den Einfluss dynamischer Adaptierung auf die Leistung und den adressierten Nutzerzustand überprüft (Kapitel 6). Auch hier wird der Einfluss der Adaptierungen auf die Leistung und das Auftreten unerwünschter Nutzerzustände durch den Vergleich mit einer Kontrollbedingung ohne Adaptierungen untersucht.

Die Arbeit schließt mit einer Bewertung der durchgeführten Forschungsarbeiten in Hinblick auf die ursprüngliche Zielsetzung und der Darstellung von Erkenntnissen und Implikationen für die Gestaltung und Anwendung adaptiver MMI mit Dynamischem Adaptierungsmanagement (Kapitel 7). Weiterhin wird ein Ausblick auf mögliche Weiterentwicklungen und Anwendungsfelder außerhalb der exemplarisch betrachteten Domäne gegeben (Kapitel 8).

1.6 Wissenschaftliche Beiträge

Dieser Abschnitt gibt einen kurzen Überblick über die wesentlichen Beiträge dieser Dissertation zum Wissensbestand im Bereich Mensch-Maschine-Interaktion.

- *Rahmenwerk für dynamische Adaptierung der MMI* – In dieser Arbeit wird ein Rahmenwerk zur bedarfsgerechten und kontextsensitiven Anpassung der MMI an Leistungseinbrüche und kritische mentale Nutzerzustände entwickelt. Von technisch getriebenen Ansätzen hebt sich die Arbeit ab, indem sie einen humanzentrierten Ansatz verfolgt und den Lösungsentwurf aus theoretischen Konzepten und Modellen der Kognitionspsychologie herleitet. Weiterhin ist neuartig, dass die einzusetzende Adaptierungsstrategie in Abhängigkeit von den Diagnoseergebnissen in nahezu Echtzeit ausgewählt und konfiguriert wird, um die ebenso situativ ermittelten Ziele der Adaptierung im aktuell vorliegenden Kontext zu erreichen.
- *Entwurf geeigneter Adaptierungsstrategien* – In der Arbeit werden sechs Adaptierungsstrategien zur Mitigation diagnostizierter Zustandsprobleme entworfen. Die Herleitung erfolgte konsequenterweise ebenfalls auf Basis kognitionspsychologischer Theorien, um relevante Engpässe in der menschlichen Informationsverarbeitung zu adressieren. In abstrahierter Form lassen sich die Strategien auf verschiedene Anwendungsumgebungen übertragen, beispielhaft wurden sie für eine Luftraumüberwachungsaufgabe operationalisiert.
- *Experimenteller Prototyp des Dynamischen Adaptierungsmanagements* – Die erarbeiteten Konzepte und Entwürfe wurden in einer relevanten Aufgabenumgebung aus der Domäne „militärische Luftraumüberwachung“ als experimenteller Prototyp funktional implementiert. Anhand dieses Prototypen kann die Funktionsweise demonstriert und empirisch untersucht werden.
- *Experimentelle Erkenntnisse* – die Evaluationsphase der Arbeit lieferte wichtige und interessante Erkenntnisse über die Wirksamkeit der einzelnen Adaptierungsstrategien und über die Wirksamkeit des Gesamtkonzepts.

2

Stand der Forschung zur Adaptiven MMI

Adaptive Mensch-Maschine-Systeme kombinieren menschliche Operateure und automatisierte Systeme, um eine maximale System-Leistungsfähigkeit zu erzielen (Parasuraman, 1987). Durch die Interaktion zwischen Mensch und automatisierter Technik werden bei der adaptiven MMI zahlreiche kognitionspsychologische Aspekte berührt. Mit der Herleitung des Entwurfs eines Dynamischen Adaptierungsmanagements aus theoretischen Konzepten der Kognitionspsychologie wird dem Umstand Rechnung getragen, dass die Problemstellung ein „wicked problem“ darstellt: ein soziotechnisches System, das in kritischer Weise von der menschlichen Kognition abhängig ist, um effektive Lösungen zu produzieren (vgl. Rittel & Webber, 1984; Hevner et al., 2004). Ziel der folgenden Analyse existierender Grundlagen und Methoden ist es, Erkenntnisse zu extrahieren, die Aufschluss darüber geben, welche psychologischen Aspekte bei der Auswahl und Gestaltung adaptiver technischer Reaktionen berücksichtigt werden sollten. Dem Fokus der Arbeit entsprechend richtet sich die Analyse dabei nicht auf diagnostische Aspekte (diese behandelte Schwarz (2019) in einer mit demselben Gesamtvorhaben assoziierten Dissertation) sondern auf Methoden, die genutzt werden können, um einen bereits diagnostizierten Unterstützungsbedarf zu adressieren – das Adaptierungsmanagement.

Da die Interaktion mit automatisierten Systemen die Verarbeitung der dargestellten Informationen durch den menschlichen Operateur erfordert, wird in Abschnitt 2.1 zunächst auf die menschliche Informationsverarbeitung eingegangen, indem grundlegende Kognitionsmodelle betrachtet werden. Abschnitt 2.2 beschreibt Bottleneck-Theorien, die kognitive Engpässe in den Phasen der menschlichen Informationsverarbeitung beschreiben und demnach Potenzial als Ansatzpunkte für adaptive Technik aufweisen. In Abschnitt 2.3 werden psychologische Herausforderungen dargestellt, die sich speziell in Bezug auf die Interaktion mit automatisierten Systemen ergeben. Diese Herausforderungen führten zur Entwicklung der Adaptiven MMI, deren bisherige Ansätze in Abschnitt 2.4 beschrieben und in Hinblick auf das eigene Vorhaben bewertet werden. Zu den Grundlagen dieser Arbeit gehören auch die in Abschnitt 2.5 aufgeführten assoziierten Vorarbeiten, welche die Schwächen bisheriger Ansätze adressieren und die Basis für das weitere Vorgehen liefern. Dabei werden auch die Dimensionen des mentalen Nutzerzustands beschrieben und definiert, welche später durch das Dynamische Adaptierungsmanagement adressiert werden. Schließlich fasst Abschnitt 2.6 Implikationen für die Konzeption eines Dynamischen Adaptierungsmanagements zusammen.

2.1 Modelle der menschlichen Informationsverarbeitung

Zur Verdeutlichung der menschlichen Interaktion mit automatisierten Systemen nutzen Parasuraman et al. (2000) ein einfaches 4-Phasen-Modell der menschlichen Informationsverarbeitung (Abbildung 6). Die erste Phase umfasst die Erkennung und Aufnahme von Informationen. Diese erfolgt durch mehrere separate sensorische Kanäle und Prozessoren, indem sensorische Rezeptoren ausgerichtet, die Daten aufgenommen, kurz gespeichert und präattentiv vorverarbeitet werden. Die zweite Phase umfasst die perzeptive Verarbeitung zur bewussten Wahrnehmung der Informationen, um den Stimulus zu erkennen und zu extrahieren. Diese Phase beinhaltet auch kognitive Verarbeitung, um den Stimulus im Arbeitsgedächtnis (*working memory* (WM); Baddeley, 1992; Baddeley & Hitch, 1974) zu halten, zu

integrieren und zu bewerten. Durch die exekutiven Funktionen des WM wird er dann unter Zuhilfenahme von Informationen aus dem Langzeitgedächtnis (z. B. Erinnerungen, Erfahrungen) und dem mentalen Modell der aktuellen Situation verarbeitet. Die Entscheidungsfindung und die Generierung von Handlungsoptionen finden in der dritten Phase statt. Schließlich folgen in der vierten Phase die Bewertung, Auswahl und Implementierung von Handlungsoptionen, wobei diese Handlungen sowohl interner (z. B. Integration in das mentale Modell, Feststellung der Irrelevanz) als auch externer Natur sein können (z. B. psychomotorische Manipulation).

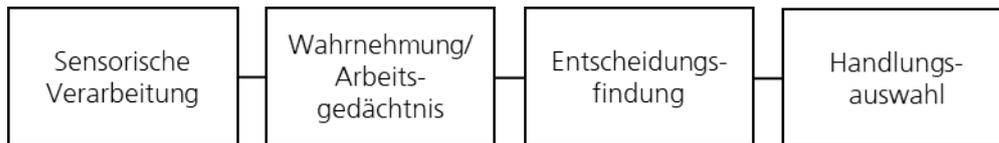


Abbildung 6. Einfaches 4-Phasen-Modell der menschlichen Informationsverarbeitung (nach Parasuraman et al., 2000)

Wickens & Hollands (2000) ergänzen diese einfache Abfolge von Prozessphasen um involvierte Komponenten, insbesondere das WM, das Langzeitgedächtnis und die Aufmerksamkeitsressourcen (Abbildung 7). Diese Ergänzung ist in der weiteren Betrachtung in Hinblick auf die Gestaltung adaptiver Unterstützung essenziell, da die einzelnen Komponenten über Kapazitätsgrenzen verfügen, durch die es zu kognitiven Engpässen kommen kann, welche die Informationsverarbeitung beeinträchtigen. In diesem erweiterten Modell wird die Aufmerksamkeit nach Kahneman (1973) als kapazitätsbegrenzte Ressource gesehen, die Baddeley (1992) zufolge durch die zentrale Exekutive im WM auf die verschiedenen Phasen verteilt wird. Das WM befindet sich gemäß Baddeley (1992) in der Abfolge der Phasen zwischen der Wahrnehmung, dem (Langzeit-) Gedächtnis und der Aufmerksamkeit.

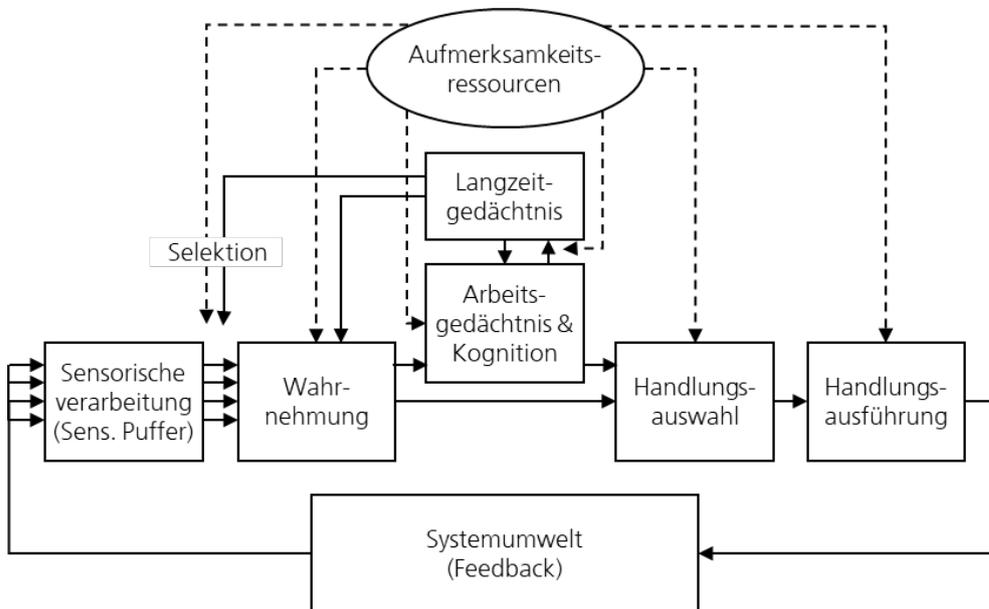


Abbildung 7. Modell der menschlichen Informationsverarbeitung mit beteiligten Komponenten nach Wickens und Hollands (2000)

Das Modell verfügt außerdem über eine Feedback-Schleife, die eine Bewertung der erfolgten Handlung ermöglicht. Demnach durchläuft der Informationsverarbeitungsprozess einen Regelkreis. Wenn eine Handlung ausgeführt wird, werden die Effekte der Handlung über die Sinnesorgane auf- und wahrgenommen (Perzeption). Im WM erfolgt dann ein Soll-Ist-Abgleich

zwischen dem erwarteten und dem erzielten Ergebnis (Kognition). Daraufhin wird die Entscheidung getroffen, ob die Handlung beendet, fortgeführt oder eine andere Handlung ausgeführt wird (Ausführung). Dieser Prozess kann sich beliebig oft und auf unterschiedlichen Abstraktionsgraden wiederholen.

Auch nach Wickens „Multiple Resource Theory“ (MRT; Abbildung 8; Wickens, 1984; 2002; 2008) gliedert sich die Informationsverarbeitung aus Ressourcensicht in die drei genannten Phasen Perception, Kognition und Ausführung. Die Informationsverarbeitung wird demnach durch begrenzte Pools von Aufmerksamkeitsressourcen moduliert. Wickens schlägt vor, dass diese Ressourcen auf eine Vielzahl von Modalitäten verteilt sind. Bei zeitgleichen Aufgaben, die dieselben Kanäle nutzen, wird es gemäß MRT zu größeren Interferenzen kommen als wenn z. B. eine Aufgabe eine kognitive Aktivität und die andere eine Ausführungshandlung erfordert. Wickens postuliert, dass es auch zwischen ressourcenintensiven Wahrnehmungsaufgaben und kognitiven Aufgaben, bei denen Informationen im WM gespeichert oder transformiert werden, zu Ressourcenkonflikten kommen kann.

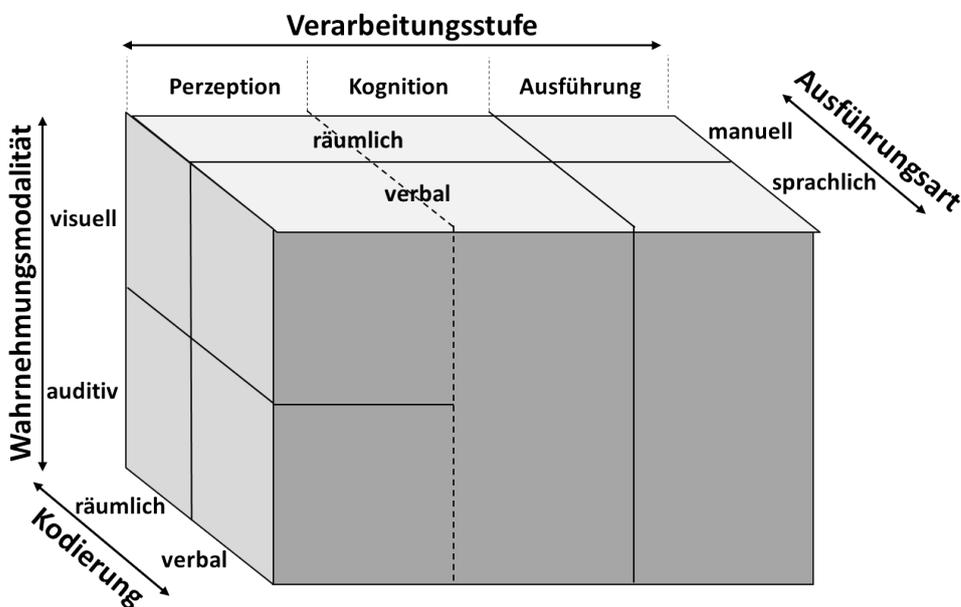


Abbildung 8. Modell zur Multiple Resource Theory (MRT) nach Wickens (1984)

2.2 Engpässe bei der Informationsverarbeitung

Die Leistung bei der menschlichen Informationsverarbeitung unterliegt mehreren Einschränkungen, die durch Kapazitätsgrenzen oder Engpässe (engl.: bottlenecks) verursacht werden, die auf die einzelnen Phasen und Komponenten der Informationsverarbeitung (vgl. Abbildung 7) bezogen werden können. Ein Verständnis dafür, welcher dieser Engpässe einen detektierten Leistungseinbruch verursacht, kann dabei helfen, eine geeignete Adaptierungsstrategie auszuwählen, die an der Stelle gezielt entlastet. Daher wurden für diese Arbeit in der psychologischen Literatur fünf relevante Engpässe identifiziert und im vorgestellten Modell der Informationsverarbeitung verortet (Abbildung 9). Im Folgenden werden diese Engpässe, ihre Hintergründe und ihre Rolle bei der Informationsverarbeitung näher erläutert.

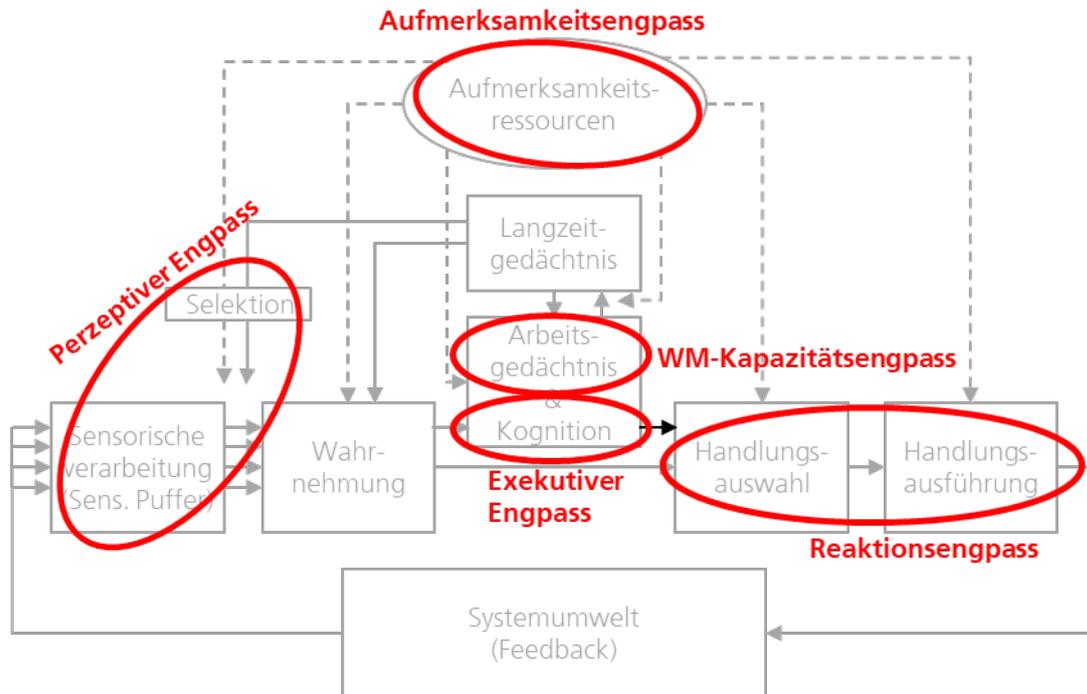


Abbildung 9. Verortung von Engpässen in der Informationsverarbeitung im Modell von Wickens und Hollands (2000)

2.2.1 Perzeptiver Engpass

Bezogen auf das Informationsverarbeitungsmodell von Wickens und Hollands (2000) erfolgt die sensorische Verarbeitung weitgehend automatisch und ressourcenfrei. Atkinson und Shiffrin (1968; 1971) begründen dies ursprünglich damit, dass jeder Sinneskanal über ein eigenes sensorisches Gedächtnissystem und eine eigene Vorverarbeitung verfügt. Trotzdem sind diese Kanäle in ihrer Kapazität prinzipiell limitiert und durch sehr schnellen Verfall der Inhalte charakterisiert. Ein technisches System könnte den Durchsatz optimieren, indem es die Informationsdarstellung multimodal arrangiert, um die Kapazitäten der verschiedenen sensorischen Kanäle optimal auszureizen (z. B. Hale et al., 2005; Axelsson, 2007).

Ein deutlich restriktiverer Engpass besteht jedoch am Übergang zur bewussten Informationsverarbeitung. Hier befindet sich ein Selektionsmechanismus, der dazu dient, die begrenzten Ressourcen zur Informationsverarbeitung nicht zu überlasten. Über den Durchsatz bzw. die Abscheidungsrate des Filters ist wenig bekannt. Wickens und McCarley (2008) beschreiben jedoch in ihrem SEEV-Modell zur selektiven Aufmerksamkeit (Abbildung 10), welche Parameter dazu beitragen, ob Informationen diesen Filter passieren. SEEV steht für *Saliency* (Salienz), *Effort* (Anstrengung), *Expectancy* (Erwartung) und *Value* (Wert). Das Modell unterteilt den Filterungsprozess in Top-down- und Bottom-up-Komponenten. Die selektive Aufmerksamkeit kann also sowohl von Eigenschaften des Stimulus (bottom-up) als auch aus der Kognition heraus (top-down; z. B. durch Erfahrungen, mentale Modelle) beeinflusst werden. Im Bottom-up-Prozess bezeichnet die Salienz wie aufmerksamkeitsbindend ein Stimulus ist. Yantis (1993) zeigte, dass saliente Stimuli wahrgenommen werden, selbst wenn diese irrelevant sind. Wenn für die Wahrnehmung jedoch Anstrengung aufgewendet werden muss, wirkt die Anstrengung bottom-up als Inhibitor für Aufmerksamkeitsallokation. Top-down wird der Filter von der Erwartung und dem Wert der Information getrieben. Die Erwartung bezeichnet die Wahrscheinlichkeit, die dem Auftreten eines bestimmten Reizes zugewiesen wird. Der Wert

bezeichnet den potenziellen Nutzen bzw. Konsequenzen der Verarbeitung (oder auch Nichtbeachtung) eines Reizes.

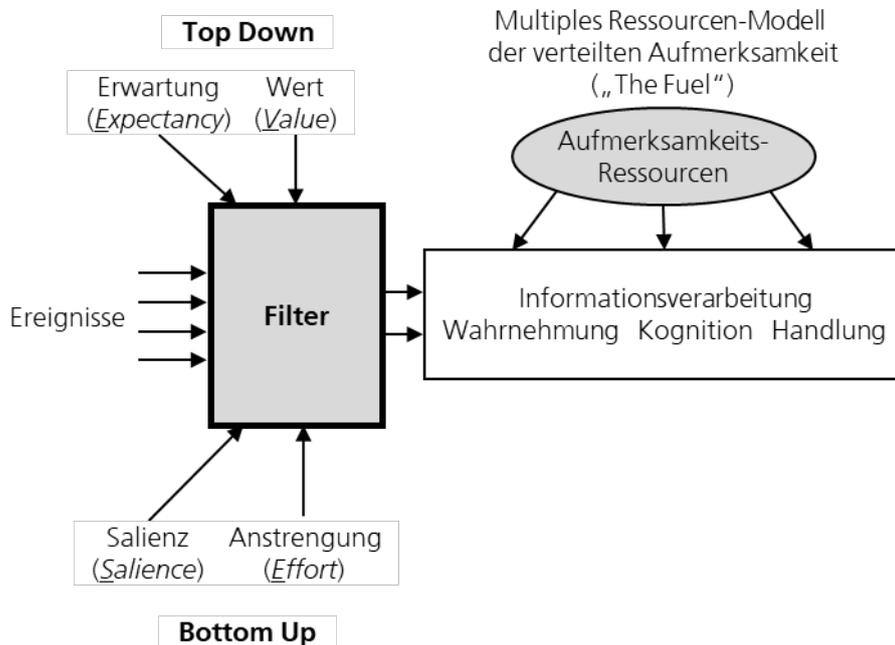


Abbildung 10. Perzeptiver Filter im SEEV-Modell von Wickens und McCarley (2008)

Nur Informationen, die diesen Filter durchdringen, werden bewusst wahrgenommen und erreichen die nächsten Phasen der Informationsverarbeitung. Alle anderen Reize verfallen – je nach sensorischem Subsystem – innerhalb weniger Millisekunden (visuelles System) oder Sekunden (auditives und haptisches System).

2.2.2 WM-Kapazitätsengpass

Sensorische Reize, die den Filter der selektiven Wahrnehmung erfolgreich überwunden haben, müssen im nächsten Schritt um die begrenzten Ressourcen von WM und Aufmerksamkeit konkurrieren. Das WM ermöglicht es, Informationen, die vom sensorischen Gedächtnis wahrgenommen und zur Weiterverarbeitung ausgewählt wurden, aufrechtzuerhalten und zu manipulieren. Baddeley und Logie (1999) beschreiben das WM als funktionale Mehrfachkomponente der Kognition, „die es dem Menschen ermöglicht, seine unmittelbare Umgebung zu verstehen und mental darzustellen, Informationen über unmittelbar vergangene Erfahrungen zu speichern, den Erwerb neuen Wissens zu unterstützen, Probleme zu lösen und aktuelle Ziele zu formulieren, in Beziehung zu setzen und umzusetzen“ (S. 29). Dazu wird das WM häufig konzeptionell als eine Reihe flüchtiger Speicher dargestellt, in denen Information gehalten und durch eine *Zentrale Exekutive* kontrolliert werden können (vgl. Baddeley, 2003).

Ein Engpass während der Informationsverarbeitung liegt daher in den Kapazitätsgrenzen des WM begründet, die von Miller (1956) mit ca. sieben „information chunks“ angegeben wird, wobei andere Wissenschaftler auch andere Kapazitätswerte vertreten (z. B. Cowan, 2000). Grundsätzlich besteht über das Vorhandensein von Kapazitätsgrenzen jedoch wissenschaftlicher Konsens. Sollen Informationen aktiv im WM gehalten werden, müssen sie dort durch bewusstes Wiederholen (engl.: *rehearsal*) erhalten werden, da sie sonst verfallen (Card et al., 1983).

2.2.3 Exekutiver Engpass

Die zentrale Exekutive ist für die Steuerung und Regulierung der WM-Aktivitäten nach innen und nach außen zuständig, um Informationen zu kodieren, zu speichern und abzurufen (Baddeley, 2003). Die exekutiven Funktionen umfassen insbesondere die Koordination der WM-Untersysteme (vgl. Abbildung 11), das Fokussieren und Lenken der Aufmerksamkeit sowie das Aktivieren von Repräsentationen im Langzeitgedächtnis.

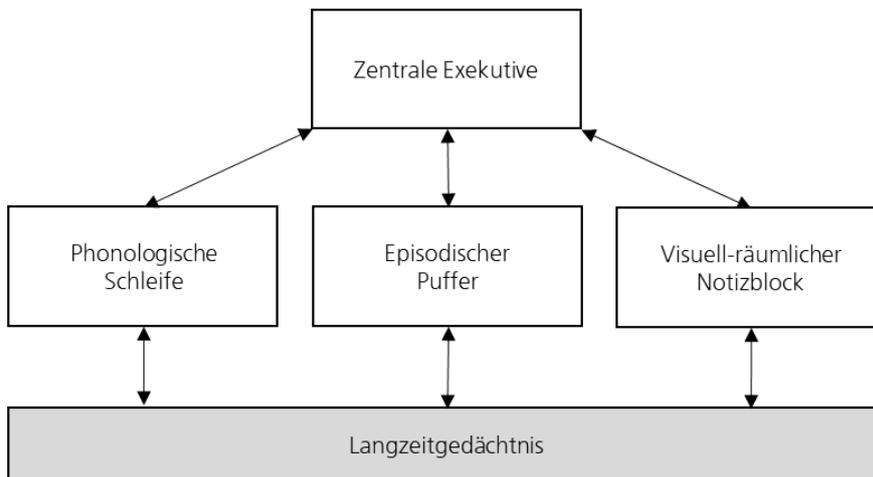


Abbildung 11. Multikomponenten-Modell des Arbeitsgedächtnisses nach Baddeley und Logie (1999)

Engpässe bei den exekutiven Funktionen können auftreten, wenn der Abruf von Informationen aus dem Langzeitgedächtnis zu lang dauert oder wenn die Integration neuer Informationen mit dem aktuellen mentalen Modell nicht gelingt. Dabei kommt es zum einen zu Verzögerungen bei der Verarbeitung von Informationen, zum anderen wird für diese Verarbeitungsprozesse viel Aufmerksamkeit gebunden. Jedoch ist auch die Nutzung der exekutiven Prozesse selbst mit kognitiven Kosten verbunden (Gopher et al., 2000; Zakay & Block, 2004). Exekutive Funktionen werden besonders beansprucht, wenn Komplexität, Mehrdeutigkeit und Widersprüchlichkeit auftreten. Dazu führen die Verarbeitung neuartiger Situationen oder widersprüchlicher Informationen sowie Prozesse für Planung, Problemlösung, Entscheidungsfindung, Fehlerkorrektur, das Generieren neuer Handlungsweisen oder das bewusste Unterdrücken üblicher Reaktionen (Norman & Shallice, 1980; Shallice, 1982). In diesen Fällen werden verschiedene Interpretationen der vorliegenden Situation beziehungsweise mögliche Konsequenzen verschiedener Handlungsoptionen generiert, die beste Option ausgewählt und alternative Interpretationen oder Handlungsoptionen verworfen (Zakay & Block, 2004), führen also zu intensiver Nutzung der exekutiven Funktionen.

2.2.4 Aufmerksamkeitsengpass

Die Aufmerksamkeit stellt nach Wickens und McCarley (2008) sinnbildlich den „Treibstoff“ für die Prozesse der Informationsverarbeitung dar (vgl. Abbildung 10). Da der Mensch nur über begrenzte Aufmerksamkeitsressourcen verfügt (Kahneman, 1973), müssen die verschiedenen Komponenten der Informationsverarbeitung um diese konkurrieren.

Die limitierte Kapazität der Aufmerksamkeitsressourcen hat viele praktische Konsequenzen: sie minimiert Ablenkung, indem sie irrelevante Reize ausblendet und so die zielgerichtete Verarbeitung von Informationen erleichtert. Andererseits kann die Leistung nur aufrechterhalten

werden, wenn die Ressourcen adäquat verteilt werden. Schmorow et al. (2005) geben jedoch zu bedenken, dass auch „modality switching“, also der Wechsel zwischen den Verarbeitungskanälen, mit kognitiven Kosten verbunden sein kann. Eine inadäquate Verteilung der Aufmerksamkeit, wie sie beispielsweise aufgrund von Ablenkung oder „Attentional Tunneling“ (z. B. Wickens, 2005) vorkommen kann, kann zu Fehlern bei der Informationsverarbeitung führen. Staal (2004) führt beispielsweise als Auswirkung von Stress an, dass sich der Fokus der Aufmerksamkeit einengt und dadurch die Informationsverarbeitungsprozesse, unter anderem die Entscheidungsfindung, beeinträchtigt werden. Dies begründet er damit, dass ein Teil der kognitiven Kapazität von der Aufgabenbearbeitung abgezogen und zur Regulierung des emotionalen Zustands eingesetzt wird oder die Informationsverarbeitung aufgrund von Rumination blockiert wird. Hierbei aktivieren ängstliche Gedanken und Sorgen weitere ängstliche Gedanken.

2.2.5 Reaktionsengpass

Das Phänomen der Psychologischen Refraktärperiode (PRP; Telford, 1931; Welford, 1952) führt zu einer Sequenzierung von Reaktionen (Welford, 1967). Die PRP bezeichnet bei der Präsentation von zwei sehr schnell aufeinanderfolgenden Reizen, quasi einer parallelen Verarbeitung zweier Aufgaben, eine Verzögerung der Reaktion auf den zweiten Stimulus (vgl. Abbildung 12) während der Reaktionsvorbereitung für den ersten Stimulus. Die Zeit zwischen dem Startpunkt der Präsentation des ersten Reizes und dem Startpunkt der Präsentation des zweiten Reizes wird als *Stimulus Onset Asynchrony* (SOA) bezeichnet. Das Phänomen der verlängerten Reaktionszeit auf den zweiten Stimulus liegt der Reaktionsvorbereitung für den ersten Stimulus zugrunde. Als (kognitiver) *Slack* wird hierbei die Zeitspanne bezeichnet, die zwischen der Wahrnehmung des zweiten Stimulus und der Handlungsauswahl für den zweiten Stimulus liegt, während die Handlungsauswahl/Entscheidung für den ersten Stimulus getroffen wird. Dadurch entsteht ein Engpass in der Informationsverarbeitung, dessen exakter Locus jedoch noch immer ungeklärt ist (Klapp et al., 2019). Pashler (1994) ist überzeugt, dass es auf der kognitiven Verarbeitungsstufe zu einem Engpass kommt, der eine serielle Verarbeitung erzwingt, während bei Informationswahrnehmung und Ausführung jedoch eine parallele Verarbeitung von Aufgaben möglich ist. Koch (2008) stellt sogar die Frage, ob ein „Multitasking“ überhaupt möglich ist, oder ob es sich dabei eher um ein schnelles Hin-und-Her-Springen zwischen verschiedenen Arbeitsschritten (engl.: *task switching*) handelt. Die beim Multitasking beobachtbaren Leistungseinbußen ließen sich somit durch „Wechselkosten“ (Monsell, 2003) erklären.

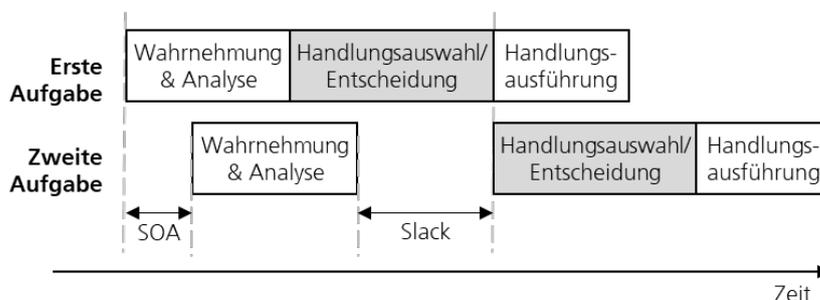


Abbildung 12. Modell der Wirkweise der Psychologischen Refraktärperiode in Anlehnung an Pashler (1994)

Doch auch direkt auf der Ausführungsebene werden Engpässe vermutet, da es hier ebenfalls zu Doppelaufgaben-Interferenzen kommen kann, die von Bratzke et al. (2009) der motorischen

Ebene zugeschrieben werden. Schließlich ist der Mensch neben den genannten kognitiven Limitierungen letztlich auch durch anatomische, physiologische und motorische Grenzen stark in der Fähigkeit beschränkt, artikulatorische Reaktionen zu parallelisieren. Die Gestaltung von Arbeitsmitteln und Arbeitsumgebung kann zu weiteren Einschränkungen führen. So kann bei parallel auftretenden Auswahlaufgaben mit einer Computermaus stets nur eine sequenzielle Auswahl erfolgen.

2.3 Psychologische Herausforderungen der Automation

Als der technische Fortschritt automatisierte Systeme möglich machte, wurde zunächst angenommen, dass die Verlagerung von Routineaufgaben auf das technische System die Beanspruchung des menschlichen Operators reduziert oder diesen sogar überflüssig macht. Doch schon Wiener und Curry (1980) stellten fest, dass bei der Gestaltung von Automation die Frage nicht lauten sollte, ob eine Funktion automatisiert werden *kann*, sondern ob sie automatisiert werden *sollte*. Hancock (2014) bestätigte diese Ansicht, da Automation sich entgegen den Erwartungen auch nachteilig auf die Gesamtsystemleistung eines Mensch-Maschine-Systems auswirken kann. Der Einsatz von Automation muss demnach sorgfältig gegen deren Nachteile abgewogen werden.

Beispielsweise kann es durch die fortschreitende Verbreitung hochautomatisierter Systeme zu einer Verlagerung der Nutzertätigkeit kommen. Der menschliche Operator wechselt von einer ausführenden Rolle in eine Überwachungs- und Management-Rolle (*supervisory control*; z. B. Sheridan, 2011, 2021), für die unser kognitives System weit weniger gut geeignet ist (Metzger & Parasuraman, 2005; Byrne & Parasuraman, 1996). So ist es möglich, dass die Beanspruchung durch Automation nicht reduziert, sondern durch den erhöhten Management-Aufwand sogar noch erhöht wird (Endsley & Kaber, 1999). Bei ungenügender ergonomischer Gestaltung kann dies mit einem Rückgang der Vigilanz, einer Verminderung des Situationsbewusstseins und dem Verlust von Fertigkeiten einhergehen (bspw. Woods, 1996; Parasuraman & Riley, 1997; Manzey, 2008). Demnach reduziert eine Automation von Routineaufgaben die Beanspruchung des menschlichen Operators nicht notwendigerweise. Die Systemkomplexität, z. B. die Menge und Vielfalt der vom System erfassten und dargestellten Daten, kann den Operator ebenfalls überfordern.

Bainbridge (1983) bezeichnet diese Phänomene als „ironies of automation“, also Ironien der Automation. Sie erläutert, dass Automation den Menschen zwar einerseits entlasten, unterstützen und teilweise auch ersetzen soll, die Verantwortung jedoch weiterhin meist beim Menschen verbleibt, so dass diesem auch bei Übernahme von Aufgaben durch die Automation zumindest eine Überwachungsrolle zukommt. Die Ironie der Automation besteht nun darin, dass die Ausführung dieser Überwachungsaufgabe ebenfalls eine Beanspruchung darstellt und zudem die Aufgaben, die trotz Automation beim Menschen verbleiben, entsprechend schwieriger sind. Insbesondere besteht eine wesentliche Herausforderung für den Menschen darin, dass er trotz seiner passiven Rolle aufmerksam bleiben und sein Situationsbewusstsein aufrechterhalten muss, um auf etwaige Automationsfehler rechtzeitig und angemessen reagieren zu können.

Bei der Gestaltung von automatisierten Systemen ist es außerdem notwendig, die Effekte zu berücksichtigen, die sich aus dem Vertrauen des Operators in die Automation ergeben. Dabei gilt als Richtlinie, dass mehr Vertrauen nicht unbedingt besser ist, sondern ein angemessenes Vertrauen das Ziel sein sollte (Lee & See, 2004). Wie hoch das Vertrauen sein sollte, hängt von

der Verlässlichkeit des Systems ab. Um positive Effekte auf die Leistung des Menschen zu haben, sollte die Verlässlichkeit bei niedrigen Automationsgraden jedoch bei mindestens 70% liegen (Parasuraman & Wickens, 2008). Der Grad, zu dem sich das Vertrauen des Operateurs in die Automation mit deren tatsächlichen Fähigkeiten deckt, wird als *Reliance* bezeichnet (Lee & See, 2004).

Probleme mit *Underreliance* treten insbesondere bei nicht verlässlicher Automation auf. So kann sich eine hohe Anzahl von Fehlalarmen negativ auswirken, indem auch korrekte Alarme schließlich ignoriert werden. Bei nicht vollständig verlässlicher Automation muss vorsichtig abgewogen werden, wann ein Alarm ausgelöst wird und Operateure sollten auf die Unausweichlichkeit von Fehlalarmen trainiert werden (Parasuraman & Wickens, 2008). Zur Automation verwendete Rohdaten sollten verfügbar sein, damit der Operateur im Zweifel die Verlässlichkeit prüfen kann (Parasuraman & Wickens, 2008).

Overreliance (Parasuraman & Riley, 1997) tritt auf, wenn ein Operateur einer nicht verlässlichen Automation unangemessen stark vertraut. Lee und See (2004) schlagen daher vor, dem Nutzer die bisherige Performanz der Automation und die Einflussfaktoren auf die Performanz der Automation anzuzeigen, um so die Bewertung von Situationen in Relation zu den Fähigkeiten der Automation zu unterstützen.

Kommt der Operateur bei der Interaktion mit Automation (z. B. infolge von *Overreliance*) seiner Überwachungsaufgabe nur unzureichend nach, spricht man von *automation-induced Complacency*. Dieses Phänomen beschreibt ein unkritisches Verhältnis des Operateurs gegenüber hochverlässlicher Automation, das sich negativ auf die Vigilanz auswirkt (Parasuraman, Molloy & Singh, 1993). Complacency kann auftreten, wenn der Operateur (ggf. fälschlicherweise) einen zufriedenstellenden Systemzustand annimmt (Billings et al., 1976), aber auch wenn andere Prozesse die Aufmerksamkeit des Operateurs in einem Maße fordern, dass er die automatisierten Prozesse im Rahmen einer Abwägung ignoriert (Parasuraman & Riley, 1997). Parasuraman & Wickens (2008) schlagen vor, dass die automatisierte Aufgabe in einer geringen Belastungsphase vorübergehend auf manuellen Betrieb zurückgestellt werden kann, wenn Complacency ein Problem darstellt.

Ein weiteres bekanntes Problem mit Automation stellt sich in Bezug auf das Situationsbewusstsein dar. Endsley (1995) definiert das Situationsbewusstsein als Konstrukt aus drei Teilkomponenten (Abbildung 13): der Wahrnehmung von Elementen in der Umgebung (Ebene 1), dem Verstehen dieser Elemente (Ebene 2) sowie der Vorhersage des Status dieser Elemente in der Zukunft (Ebene 3).

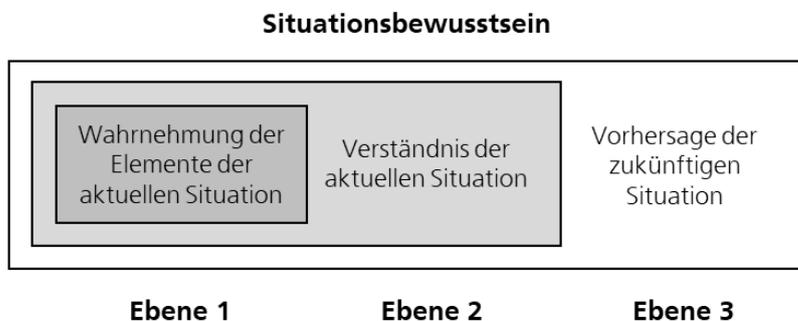


Abbildung 13. Drei-Ebenen-Modell des Situationsbewusstseins nach Endsley (1995)

Für die Interaktion mit automatisierten Systemen ist die sogenannte „Out-of-the-Loop-Performance“ (OOLP; z. B. Endsley & Kiris, 1995) elementar. Sie bezeichnet die (unter Umständen fehlende) Fähigkeit des Operateurs, in bestimmten Situationen das Vorgehen des Systems nachvollziehen bzw. die Kontrolle übernehmen zu können. Dafür ist ein ausreichendes Situationsbewusstsein nötig, dessen Bildung in automatisierten Systemen jedoch dadurch erschwert wird, dass der Operateur die Aufgaben nicht mehr selbst durchführt. Endsley und Kaber (1999) haben gezeigt, dass das Level-1 Situationsbewusstsein, das sich auf die Wahrnehmung von Information bezieht, bei niedrigen Automationsgraden höher ist. Automatisierte Systeme bilden eine zusätzliche Komplexitätsschicht (Datenverarbeitung, Datenfusion und intelligente Steuerung) zwischen den tatsächlichen Systemprozessen und den durch den Nutzer wahrgenommenen und überwachten Daten (Coury & Semmel, 1996).

Soll der Operateur in der Lage sein, die Kontrolle zu übernehmen, muss ihm ausreichend Zeit gegeben werden, auf ein Versagen der Automation zu reagieren (Paul, 2011). In der Konsequenz bedeutet dies jedoch, dass die technischen Komponenten mit Methoden, Kriterien und Entscheidungsgeschwindigkeiten arbeiten müssen, die denen des menschlichen Überwachers entsprechen, auch wenn dies technisch nicht die effizienteste Lösung darstellt. Auch diesen Aspekt führt bereits Bainbridge (1983) in ihrer „Ironie der Automation“ auf. Um adäquat eingreifen zu können, muss der Nutzer aber zumindest verstehen, wie die Automation arbeitet (Breton & Bossé, 2003). Dazu ist eine transparente Interaktion und Kommunikation nötig, die es Operateuren ermöglicht, über Status und Aktivität des Mensch-Maschine-Gesamtsystems informiert zu sein (Bainbridge, 1983; Olson & Sarter, 2001). Die Daten sollten so verständlich aufbereitet sein, dass der Operateur ein angemessenes mentales Modell der Situation generieren kann (Breton & Bossé, 2003).

2.4 Bisherige Ansätze adaptiver MMI

Angesichts der zahlreichen Herausforderungen beim Einsatz automatisierter Systeme schlug Bainbridge (1983) vor, dass die Kollaboration von Mensch und Maschine einer Weiterentwicklung bedarf. Sie empfahl Systeme, die eine Entscheidungsfindung unterstützen, indem sie Operateure bei der Durchführung der Aufgabe beraten, Fehler verhindern oder bei hoher Beanspruchung assistieren. Auch viele andere Automationsforscher sahen Vorteile in Formen adaptiver Automation, um klassischen Automationsproblemen entgegenzuwirken (vgl. Wright, 2002). Die Auffassung, dass der menschliche Bediener in der Regelschleife („in the loop“, vgl. Endsley & Kiris, 1995) gehalten werden muss, wenn er in der Lage sein soll, sein Situationsbewusstsein zu erhalten und bedarfsadäquat einzugreifen, setzte sich zunehmend durch.

Versuchte man zunächst, den gewünschten Automationsgrad vom Operateur manuell einstellen zu lassen (adaptierbare Automation), wird seit einiger Zeit eher versucht, den Zustand des Menschen technisch zu erfassen, um den Automationsgrad automatisch daran anzupassen. Mit der Möglichkeit, kognitive Nutzerzustände technisch zu detektieren, entstanden unter verschiedenen Bezeichnungen weitere Ansätze, die sich der dynamischen Bereitstellung von Assistenzfunktionen auf Basis kognitiver Zustandsdiagnosen widmen. Dingler et al. (2017) definieren derartige Systeme folgendermaßen:

„Cognition-aware systems are computing systems capable of sensing and analyzing processes of human cognition, adapting to and aiding the user in consideration of the detected states – the so-called cognitive context.“ (S. 47:2)

Die Erforschung kognitionsadaptiver Systeme begann bereits in den 70er Jahren (Rouse, 1976; Rouse, 1977). Rouse und Rouse stellten 1983 basierend auf einem Review der damaligen Forschungsarbeiten ein erstes Rahmenwerk vor, in dem Möglichkeiten für die Umsetzung adaptiver Entscheidungshilfen in Bezug auf Form, Modus und Methode beschrieben werden. Die Form der Adaptierung bezieht sich auf die Frage, *was* adaptiert wird (z. B. welche Aufgaben, Aufgabenteile), der Modus der Adaptierung betrifft die Frage, *wer* die Adaptierung initiiert (der Nutzer, das System oder das Designteam (offline)) und die Methode zielt darauf ab, *wie* die Adaptierung erfolgt, (z. B. Aufgabenteilung, Anpassung des Inhalts). Davon ausgehend entwickelten und untersuchten Automationsforscher flexible Automationskonzepte, bei denen dem Operateur bei optimaler Beanspruchung die Ausführung der Aufgabe überlassen wird. Nur bei steigender Beanspruchung sollte er durch Automation entlastet werden, indem zunehmend Teilaufgaben durch das technische System übernommen werden. Bei diesen Ansätzen verbleiben Verantwortung und Autorität beim Operateur, der bei der Durchführung seiner Aufgabe aber durch die adaptiv automatisierte Technik unterstützt wird.

Adaptive Ansätze werden insbesondere für Domänen erforscht, in denen der Mensch als Systemkomponente nicht wegzudenken ist und dementsprechend nutzerzentrierte Gestaltungsparadigmen angewandt werden. Dadurch erwachsen jedoch ebenfalls neue Herausforderungen, beispielsweise bezüglich des Situationsbewusstseins des Operateurs beim Wechsel zwischen Automationsstufen, der Delegation von Autorität zwischen Mensch und Maschine sowie der Angemessenheit und der kognitiven Kosten der Adaptierung. In den folgenden Abschnitten werden die verschiedenen Ansätze beschrieben und diskutiert.

2.4.1 Adaptierbare Automation

Überlässt man die Nutzung der Automation dem Operateur durch Auswahl nach subjektivem Bedarf (z.B. Olson & Sarter, 2001), ist die Automation *adaptierbar*. Adaptierbarkeit unterscheidet sich von Adaptivität insbesondere darin, dass sie manuell vorgenommen wird. So kann der Nutzer den Automationsgrad selbst nach Bedarf bestimmen, also der Situation und den persönlichen Präferenzen anpassen. Aufwand und Verantwortung für die richtige und vollständige Bewertung und Handhabung verbleiben dabei beim Operateur. Mit Mensch-Maschine-Systemen, die derart gestaltet sind, ist in der Regel eine erfolgreiche Aufgabenbewältigung und Zielerreichung möglich, solange der Operateur in der Lage ist, die Stabilität des Gesamtsystems zu gewährleisten. Aktuelle Beispiele sind Spurhalteassistenten im Kraftfahrzeug, die nach Aktivierung durch den Fahrer warnen oder im eingestellten Maße in die Lenkung eingreifen, sowie die adaptive Geschwindigkeitsregelung (Adaptive Cruise Control), die durch den Fahrer konfiguriert (z. B. Zielgeschwindigkeit und Mindestabstand zum vorausfahrenden Fahrzeug) und nach Belieben aktiviert und deaktiviert werden kann.

Die Voraussetzungen für den erfolgreichen Einsatz adaptierbarer Automation sind jedoch umfangreich. Sie verlangen, dass der Operateur die Aufgaben und Ziele des Gesamtsystems kennt und sich dieser jederzeit bewusst ist, den Umgang mit der Benutzungsschnittstelle der technischen Komponente beherrscht, über die zur Aufgabenbearbeitung notwendigen Kenntnisse verfügt, die auf ihn einwirkende Informationsmenge beherrschen kann und sich in einem leistungsfähigen mentalen Zustand befindet. Insbesondere in komplexeren oder sicherheitskritischen Umgebungen ist der Ansatz häufig von wenig Erfolg geprägt, da die manuelle Anpassung des Automationsgrads gerade in Situationen mit sehr hoher Beanspruchung eine Zusatzaufgabe darstellt, für die dann möglicherweise keine kognitiven

Ressourcen mehr zur Verfügung stehen. Abbildung 14 illustriert die kognitiven Anforderungen der manuellen Adaptierung am Kognitionsprozess nach Parasuraman et al. (2000).

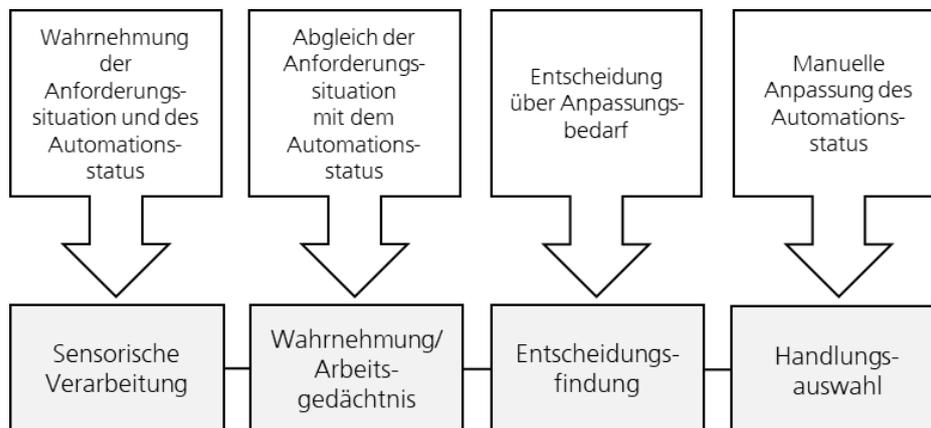


Abbildung 14. Manuelle Adaptierung der Automation bezogen auf das 4-Phasen-Kognitionsmodell von Parasuraman et al., 2000

Auch kann die Leistungsfähigkeit zum Beispiel aufgrund von Übermüdung des Operators erheblich beeinträchtigt sein. Dies kann in der Folge dazu führen, dass der Operator nicht mehr in der Lage ist, die Situation korrekt zu erfassen und zu bewerten und rechtzeitig die richtigen Entscheidungen zu treffen sowie Handlungen vorzunehmen. Unabhängig von der Ursache ist die technische Komponente nicht in der Lage, den Leistungsabfall des Operators zu kompensieren, da sie nicht über technische Regulierungskomponenten verfügt und lediglich eine auf Anweisungen des Operators reagierende, ausführende Instanz darstellt (vgl. EVA-Modell, Abbildung 1).

2.4.2 Adaptive Aiding und Adaptive Automation

Mit den Konzepten des *Adaptive Aiding* (Rouse, 1988) und der Adaptiven Automation (u.a. Scerbo, 2006) wird das Ziel verfolgt, Automationsproblemen entgegenzuwirken, ohne auf die Vorteile von Automation verzichten zu müssen.

Das Adaptive Aiding-Konzept sieht vor, im Regelfall dem Operator die Ausführung der Aufgabe zu überlassen, damit dieser „im Loop“ verbleibt. Er soll nur dann durch Automation unterstützt werden, wenn diese Unterstützung benötigt wird, um operationale Anforderungen zu erfüllen. Gegenüber der statischen Automation basieren Konzepte adaptiver Automation auf dem Prinzip einer dynamischen Umverteilung von Aufgaben zwischen Operator und Automation, die beispielsweise durch eine Erhöhung oder Reduzierung des Automationsgrads (*Levels of Automation*, z. B. Parasuraman et al., 2000) vorgenommen werden kann. Dieses Vorgehen wird auch als *Dynamic Function Allocation* (z. B. Scerbo, 2006b) bezeichnet. Dahinter steckt die Erkenntnis, dass der menschliche Operator die Überwachung von Automation gegebenenfalls aufgrund kognitiver Beschränkungen nicht problemlos ausführen kann. Daher bedürfe dieser wiederum einer Überwachung („monitoring the monitor“ – Riley, 1985; *Operator Functional State Estimation* – Wilson & Russell, 2003).

Bei der adaptiven Automation soll der Operator bei geringer Beanspruchung „im Loop“ gehalten werden, indem ihm die Ausführung der Aufgabe überlassen wird. Das technische System nimmt Anpassungen an der Automation vor, wenn es bemerkt, dass der Mensch die Überwachungsrolle nicht adäquat ausführt und kann dadurch Vorteile beim Balancieren von Workload und der Erhaltung von Situationsbewusstsein bieten (Parasuraman & Wickens, 2008).

Bei hoher Beanspruchung wird der Operateur entlastet, indem bestimmte Teilaufgaben durch das technische System übernommen werden. Durch die zustandsabhängige Steuerung des Automationsgrads entsteht ein „Closed-Loop Adaptive System“ (vgl. Abschnitt 1.1.1). Als Entscheidungskriterium, wann eine Umverteilung sinnvoll ist, werden üblicherweise die über physiologische Maße erfassbare Beanspruchung des Operateurs (z. B. Wilson & Russell, 2003) oder seine Leistung (z. B. Parasuraman et al., 1992) herangezogen, um den Automationsgrad oder Assistenzfunktionen basierend auf Zustandsveränderungen zu steuern.

Die Vorteile adaptiver Automation gegenüber statischer Automation konnten in verschiedenen Studien für Überwachungsaufgaben nachgewiesen werden (z. B. Hilburn et al., 1997; Parasuraman et al., 1993). Trotz des großen Potenzials für die Bewältigung der üblichen Automationsprobleme konnten sich die Konzepte adaptiver Automation jedoch noch nicht in der Praxis etablieren. Ein Grund dafür mag sein, dass auch Menschen selbst adaptive Systeme sind (vgl. Wiener, 1950; Veltman & Jansen, 2004). Sie reagieren auf sich ändernde Aufgabenanforderungen und passt sich innerhalb einer „zone of adaptability“ daran an (Hancock, 1989). Zum Beispiel kann der Mensch bewusst entscheiden, mehr Anstrengung zu investieren, um bei Bedarf eine bessere Leistung zu erzielen, oder Stress kann die Freisetzung von Hormonen verursachen, was zu höherem Arousal (dt.: physiologische Erregung) und größerer Fokussierung der Aufmerksamkeit führt. Diese Lern- und Selbstanpassungsfähigkeit der Menschen (z. B. zur Entwicklung von Bewältigungsstrategien) wird bisher selten berücksichtigt.

Im Kontext der adaptiven Automation erwarten Veltman und Jansen (2004), dass technische Adaptierung mit großer Wahrscheinlichkeit erfolgreich ist, wenn sie nur dann mit der Neuzuweisung von Aufgaben beginnt, wenn die intrinsischen Anpassungsmechanismen des Bedieners nicht mehr in der Lage sind, angemessen auf sich ändernde Aufgabenanforderungen zu reagieren. Andernfalls kann es dazu kommen, dass zwei adaptive Systeme (der „adaptive Operateur“ und das adaptive technische System) kontraproduktiv zusammenarbeiten. Adaptierungsmechanismen, welche die Komplexität eines unvorhersehbaren menschlichen Handelns in einer unvorhersehbaren Umwelt effektiv bewältigen können, wurden aber bisher nicht demonstriert. Das mag ein Grund dafür sein, dass sich seit einigen Jahren die Erkenntnis durchsetzt, dass zunächst solide allgemeingültige Grundlagen geschaffen werden müssen, bevor adaptive Automation in großem Stil alltagstauglich werden kann (z. B. Steinhauser et al., 2009; Feigh, Dorneich & Heyes, 2012).

2.4.3 Augmented Cognition

Das Forschungsfeld *Augmented Cognition* (kurz: AugCog) begann als Forschungsprogramm der DARPA (Defense Advanced Research Projects Agency), einer U.S.-amerikanischen Militärforschungseinrichtung für Zukunftsprojekte. Im Rahmen dieses Programms sollten Werkzeuge und Technologien entwickelt werden, welche „die Gestaltung revolutionärer Mensch-Computer-Interaktion ermöglichen“ indem sie „aktuelle Fortschritte in den Bereichen Neurowissenschaften, Kognitionswissenschaft und Informatik nutzen“ (Kruse & Schmorow, 2005, S. 441). Die Basis des Ansatzes ist die Ansicht, dass die menschliche Fähigkeit zur Informationsverarbeitung die Schwachstelle in einem symbiotischen Verhältnis von Mensch und Computer darstellt (Schmorow et al., 2005; vgl. auch Licklider, 1960).

AugCog-Systeme verwenden physiologische Maße, um die Interaktion zwischen Mensch und Technik im Sinne eines „Closed-Loop Adaptive Systems“ zu steuern (Schmorow et al., 2005). Ein AugCog-System nutzt physiologische Echtzeitindikatoren, um relevante kognitive Zustände

von Benutzern zu detektieren und bei Bedarf (d.h. wenn Defizite erkannt werden) Adaptierungsstrategien auszulösen, welche die Interaktion modifizieren, um den kognitiven Zustand der Benutzer zu optimieren. Dadurch sollen inhärente Engpässe der menschlichen Informationsverarbeitung überwunden werden (vgl. Abschnitt 2.2 sowie Schmorow et al., 2005). Der Fokus auf die neurokognitive Zustandsdiagnose schließt die Verwendung von Verhaltens-, Kontext- oder anderen Zustandsinferenzen nicht aus. Laut Kruse & Schmorow (2005) wurde deren Wert jedoch eher darin gesehen, zur Bewertung des durch die neurophysiologischen Sensoren diagnostizierten Zustands beizutragen. In den Konzeptvalidierungsexperimenten des DARPA AugCog-Programms führten die Adaptierungen zu erheblichen Leistungsverbesserungen (Barker & Edwards, 2005; Dorneich et al., 2005; Kincses, 2005; Ververs et al., 2005).

Um das Ziel des Programms – die Erweiterung der Kapazität der menschlichen Informationsverarbeitung um ein Vielfaches (Schmorow & Kruse, 2002) – zu erreichen, ging AugCog bei der Adaptierung über das zuvor etablierte Konzept der adaptiven Automation (vgl. Abschnitt 2.4.2) hinaus. Adaptierungsstrategien werden bei AugCog als vorübergehende Änderungen an der Benutzerschnittstelle verstanden, die auf bestimmte kognitive Zustände zugeschnitten sind und zum richtigen Zeitpunkt ausgelöst werden, um die größtmöglichen kognitiven Vorteile zu erzielen. Anstatt dabei lediglich den Automationsgrad zu ändern und dem menschlichen Bediener mehr oder weniger Kontrolle über die Aufgabe in Abhängigkeit vom „Operator Functional State“ (vgl. Wilson 2002/2005; Wilson & Russell, 2003) zu gewähren, besteht die Vision darin, mehrdimensionale Diagnosen und Anpassungen durchzuführen, damit vier identifizierte Engpässe der menschlichen Informationsverarbeitung („human information processing bottlenecks“; vgl. auch Abschnitt 2.2) auf einmal erweitert werden können, um einen maximalen Informationsdurchsatz zu erreichen (Schmorow et al., 2005):

- *Sensory Processing Bottleneck*: AugCog-Systeme sollen die sensorische Wahrnehmung verbessern, indem mehrere sensorische Kanäle parallel genutzt werden (multimodale Informationspräsentation).
- *Working Memory Bottleneck*: AugCog-Systeme versuchen, Datenströme strategisch auf verschiedene sensorische Systeme zu verteilen, um die Kapazität der einzelnen WM-Subsysteme optimal auszunutzen.
- *Attention Bottleneck*: AugCog-Systeme sollen natürliche Indikatoren zur Interpretation der aktuellen und zukünftigen Aufmerksamkeit erkennen und dadurch eine gemischte Initiative (*mixed initiative*) zwischen Computern und Benutzern ermöglichen.
- *Executive Function Bottleneck*: AugCog-Systeme sollen die Informationsverarbeitung verbessern, indem sie dynamisch Kontextinformationen bereitstellen, welche die Interpretation, Integration und Verarbeitung eingehender Informationen unterstützen.

Um diese Engpässe wirksam zu erweitern, sollten auch AugCog-Systeme in erheblichem Maße Kontext berücksichtigen (vgl. Abschnitt 1.1.2). Das Framework von Tremoulet et al. (2005) wurde daher durch ein Aufgabenmodell unterstützt, verwendete dann jedoch einen unflexiblen Adaptierungstrigger, der keine Exitstrategien für die Rückkehr in den unadaptierten Zustand lieferte. Die Adaptierungen von Barker et al. (2004) wurden „ganz oder gar nicht“ allein auf Basis des kognitiven Zustands ausgelöst, was in einigen Fällen zu einer radikalen Änderung des Erscheinungsbilds der Benutzungsoberfläche führte. Deshalb wurden von Schmorow et al. (2007) Herausforderungen für die Adaptierung beschrieben:

- Benutzer-, System- und Aufgabenkontext müssen berücksichtigt werden, wenn festgelegt wird, wann und wie Adaptierungsstrategien angewendet werden sollen.
- Adaptierungsstrategien müssen auf soliden theoretischen und angewandten Grundlagen (z. B. kognitiv, psychologisch, neurowissenschaftlich, Interface Design) entworfen werden. Dabei muss nachgewiesen werden, dass Strategien das beeinflussen, was sie sollen (z. B. kognitiver Zustand, Engpässe und Benutzerleistung).
- Ein methodischer Ansatz für die Gestaltung und Implementierung von AugCog-Adaptierungsstrategien ist sowohl für spezielle (z. B. aufgabenspezifische) als auch für allgemeine Verwendungen erforderlich.

Bis heute liegt der Fokus in AugCog-Vorhaben jedoch meist darauf, physiologische Echtzeitdiagnosen für Adaptierungsbedarf zu entwickeln. Das Vorgehen zur Adaptierung wird oft zweitrangig behandelt. Die hier vorliegende Arbeit versucht nun, die genannten Herausforderungen aufzugreifen.

2.4.4 Physiological Computing und Neuroadaptive Technologie

Physiological Computing (Fairclough, 2009) bezeichnet als Oberbegriff eine Klasse von Technologien, die implizite Maße vom Gehirn und Körper des Nutzers auswerten. Der Ansatz beschreibt die Nutzung physiologischer Daten als System-Input. Physiological-Computing-Systeme sind demnach durch eine Echtzeitverbindung zwischen der Technik und dem menschlichen Nervensystem gekennzeichnet, welche die Erstellung von Nutzerzustandsrepräsentationen ermöglicht, damit die Software dynamisch und spezifisch auf Änderungen im psychophysiologischen Zustand des Nutzers reagieren kann (Fairclough, 2017). Wie auch der hier vorliegende Ansatz sieht Fairclough solche Technologien als adaptive Entitäten, in deren Umwelt sich die Nutzer befinden. Um in Übereinstimmung mit den sich wandelnden Zielen der Nutzer zu funktionieren, muss sich das Verhalten des technischen Systems an diese anpassen. Die impliziten Maße von Nutzeraktivität sind demnach das Feedback, das die Technologie nutzt, um ihr Handeln im Sinne eines „Closed Loop“ auszurichten.

Physiological-Computing-Systeme lassen sich nach Jacucci et al. (2015) in zwei Kategorien einteilen:

1. Systeme zur Bestimmung mentaler Nutzerzustände befassen sich mit internen psychologischen Zuständen (z. B. mentaler Belastung, Emotionen und Motivation). Die zu erkennenden Zustände sind unbeabsichtigt und entstehen spontan durch Interaktionen mit Ereignissen in der Umgebung oder aus inneren Gedanken.
2. Systeme für Erweiterungen des Körperschemas befassen sich mit sensorisch-motorischen Funktionen, die wir jedes Mal verwenden, wenn wir unsere Umgebung durch unseren Körper manipulieren. Sie erfassen und verarbeiten willkürliches und absichtliches Denken und Handeln.

Für die Realisierung solcher Systeme beschreiben Jacucci et al. (2015) vier Anforderungen:

1. Physiologische Maße für psychologische Konzepte müssen validiert werden,
2. die Sensortechnologie muss im Anwendungskontext qualitativ hochwertige Daten erfassen,
3. die Daten müssen in Echtzeit analysiert und klassifiziert werden und
4. die Übersetzung von Daten in Aktionen an der Schnittstelle muss reaktionsschnell und kohärent sein.

Sie führen weiter aus, dass diese vier Aspekte zwar in Isolation voneinander untersucht werden können, in einem integrierten System mit einem „Closed Loop“ jedoch in gegenseitiger Abhängigkeit voneinander interagieren werden. Diese wichtige Erkenntnis geht konform mit dem diese Arbeit einleitenden Zitat (von Bertalanffy, 1969). In Bezug auf den aktuellen Stand der Forschung werden von Fairclough (2017b) ein übermäßig starker Fokus auf Sensorik und Datenverarbeitung zur Erkennung von Benutzerzuständen sowie deren Verwendung ohne Berücksichtigung des Nutzungskontexts bemängelt. Er vermisst außerdem eine mangelnde Variabilität in den adaptiven Reaktionen der demonstrierten Systeme.

Eine Unterkategorie von Physiological-Computing-Systemen ist *Neuroadaptive Technologie* (Hettinger et al., 2003), bei der sich die Technik ausschließlich an Änderungen in neurophysiologischen Maßen anpasst. Ziel des Ansatzes ist es laut Hettinger et al. (ebd.), die Gesamtleistung von Mensch-Maschine-Systemen erheblich zu verbessern, indem die Kommunikation zwischen Benutzern und computergestützten Systemen symmetrischer erfolgen kann. Eine vorhandene Asymmetrie rührt einerseits daher, dass der Nutzer sich Wissen über die Technik verschaffen kann, das technische System jedoch nicht über Informationen zum Zustand oder den Intentionen des Nutzers verfügt. Die Auswertung neurophysiologischer Maße soll der Technik daher ein Verständnis des Nutzers und eine daran angepasste Interaktion ermöglichen. Andererseits entsteht eine Asymmetrie durch die beschränkten Interaktionsmöglichkeiten des Menschen. Damit die Technik erfährt, was der Mensch möchte, muss dieser seine Gedanken und Intentionen zunächst umständlich in Eingabe-Aktionen übersetzen und diese mit den zur Verfügung stehenden Eingabe-Geräten ausführen. Dadurch entsteht ein Kommunikationsengpass. Die Nutzung spontan und automatisch auftretender neurophysiologischer Signale soll die Kommunikation beschleunigen und so die Effizienz der Mensch-Maschine-Interaktion erhöhen.

Zander et al. (2016) implementieren neuroadaptive Technologie derart, dass sie ein sich ständig aktualisierendes Modell der Nutzerkognition erzeugen. Dieses wird genutzt, um die Technologie automatisch an das „Mindset“ des Operators anzupassen und so das klassische Verständnis von Mensch-Maschine-Interaktion zu erweitern. Um dies zu ermöglichen, nutzen sie Brain-Computer-Interfaces (BCI). In Anlehnung an die oben beschriebenen Kategorien von Physiological-Computing-Systemen unterscheidet man zwischen aktiven, reaktiven und passiven BCI (Zander et al., 2009). Bei aktiven BCI lernt der Nutzer, physiologische Signale willentlich zu kontrollieren und damit technische Aktionen auszulösen (Faircloughs „Erweiterungen des Körperschemas“, s.o.). Reaktive BCI nutzen die unbewusste Reaktionen auf bewusst wahrgenommene Stimuli als Auslöser. Passive BCI leiten aus unbewusst auftretenden Signalen Informationen über den Nutzerzustand ab und verwenden diese in der MMI.

2.4.5 Taxonomie von Adaptierungsmöglichkeiten nach Feigh et al. (2012)

Zur leichteren Charakterisierung adaptiver Systeme erstellten Feigh et al. (2012) eine Taxonomie, in die sie gebräuchliche Ansätze von Adaptierungsmöglichkeiten einordnen (Abbildung 15). Sie unterscheiden dabei vier Arten der Modifikation, die im Folgenden erläutert werden.

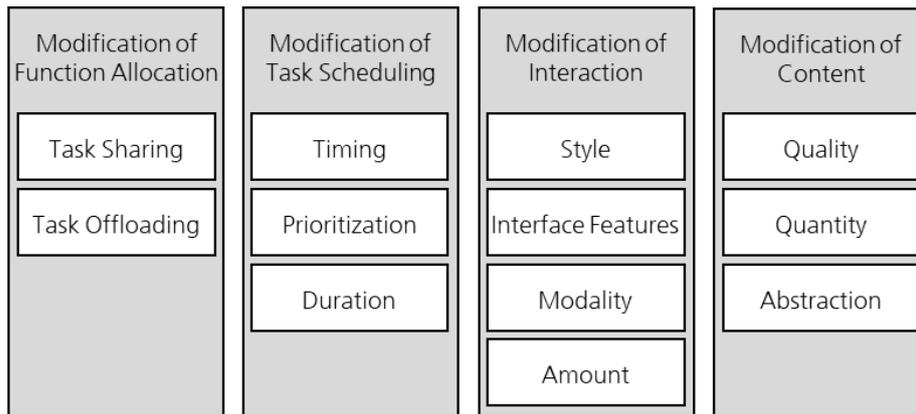


Abbildung 15. Taxonomie von Adaptierungsmöglichkeiten nach Feigh et al. (2012)

Modification of Function Allocation

Eine Modifikation der Funktionsallokation verändert, wer die Aufgabe bearbeitet. *Task sharing* beschreibt Ansätze, bei denen der Bearbeiter zwar durch einen Assistenten (oder ein technisches Assistenzsystem) bei der Aufgabendurchführung unterstützt wird, aber noch immer selbst eingebunden bleibt. *Task offloading* bezeichnet im Gegensatz die vollständige Übertragung der Aufgabe, entweder an einen anderen Menschen (*delegation*) oder an eine technische Komponente. Die Modifizierung der Aufgabenzuweisung (*function allocation*) wird meist durch Regulierung des Automationsgrads vorgenommen und verfolgt das Ziel, die Beanspruchung des Operators auf einem optimalen Niveau zu halten. Feigh et al. (2012) bemerken, dass häufig nur auf diese Form der Adaptierung fokussiert wird und außer Acht gelassen wird, dass auch andere Adaptierungsstrategien möglich sind.

Modification of Task Scheduling

Eine Modifikation der Aufgabenplanung (*task scheduling*) adressiert den zeitlichen Aspekt der Aufgabenbearbeitung. Adaptierung kann den Zeitpunkt einer Aufgabe anpassen (*timing*) oder ihre Dauer (*duration*). Auch kann die Reihenfolge von Aufgaben angepasst werden, indem eine Priorisierung (*prioritization*) erfolgt. Die Modifizierung der Aufgabenplanung bezieht sich auf die Frage, wann welche Aufgaben bearbeitet werden sollten. Eine Adaptierung kann zum Beispiel auf Basis einer Priorisierung der Aufgaben entsprechend ihrer Wichtigkeit oder Zeitkritikalität vorgenommen werden. Fuchs et al. (2006) schlagen vor, dass das System dann eingreifen sollte, wenn Aufgaben hoher Priorität vernachlässigt werden, während Aufgaben niedrigerer Priorität bearbeitet werden. Eine andere Möglichkeit der Adaptierung besteht beim Timing der Aufgaben. Bei dieser Form werden neue Aufgaben, wenn diese zu ungünstigen Zeitpunkten anfallen, auf einen späteren Zeitpunkt verlegt.

Modification of Interaction

Die Modifikation der Interaktion bezieht sich auf die Darstellung der Benutzungsschnittstelle und die Art der Informationspräsentation. Durch Adaptierung können der Interaktionsstil (*style*) angepasst und Eigenschaften der Benutzungsschnittstelle (*interface features*) verändert werden. Bezüglich der Informationspräsentation kann die Modalität (*modality*) angepasst werden, in der ein Informationselement dargestellt wird (z. B. visuell, auditiv oder taktil). Es kann auch die Menge (*amount*) der erforderlichen Interaktionen dynamisch verändert werden. Die Modifizierung der Interaktion betrifft eine Änderung des Layouts oder des Modus der Informationsdarbietung (z. B. visuell oder auditiv). Die Modifikation kann sich auch darauf

beziehen, ob Informationen vom System unaufgefordert dargeboten werden (*push*) oder ob der Operateur sie anfordern muss (*pull*).

Modification of Content

Auch die Inhalte (*content*) der Informationspräsentation sind modifizierbar. So können Qualität und Quantität angepasst werden, um den aktuellen Informationsbedarf widerzuspiegeln. Auch ist das Abstraktionsniveau an die Situation anpassbar. Eine Modifizierung des Inhalts kann in einer Anpassung des Detailgrads oder Abstraktionslevels bestehen. Beispielsweise kann die Informationsdarstellung auf dem Bildschirm durch Decluttering reduziert werden. Dabei werden Menge oder Salienz unkritischer Informationen verringert, so dass sich der Operateur leichter auf wichtige Informationen oder Ereignisse konzentrieren kann.

2.4.6 Zwischenfazit zum Stand der Forschung

In den vorangegangenen Abschnitten wurden bestehende Forschungsarbeiten zu adaptiven Mensch-Maschine-Systemen beschrieben. Es ist erkennbar, dass die verschiedenen Ansätze zwar mit unterschiedlicher Terminologie arbeiten, sich jedoch inhaltlich stark überschneiden. Einige sind sich die Ansätze auch insoweit, dass man sich schnell auf die Berücksichtigung der menschlichen Kognition im soziotechnischen Gesamtsystem und auf physiologische Sensorik als diagnostische Basis zur Lösung des Problems fokussierte. Dementsprechend haben die meisten Ansätze gemeinsam, dass mit physiologischen Sensoren unerwünschte mentale Zustände diagnostiziert werden, deren Auswirkungen dann durch Auslösen von Interventionen oder Adaptierungen abgeschwächt werden.

Die frühen Ansätze stützen sich dabei ausschließlich auf den Verlauf physiologischer Indikatoren, um kognitive Problemzustände (z. B. Beanspruchung) zu identifizieren und zu bestimmen, wann eine vordefinierte Adaptierung (meist Automation) ausgelöst werden sollte. Kritische Zustandsdiagnosen wurden dann als Auslöser für vordefinierte Anpassungen genutzt, adressierten dabei aber folglich nur die beobachteten Symptome. Zum Beispiel war das technische System von Barker et al. (2004) noch stark vom Ansatz der Adaptiven Automation geprägt und hatte noch keine Kenntnisse über Interaktionsobjekte oder die physische Implementierung der Adaptierungsstrategien. Karwowski et al. (2006) schreiben:

“The cognitive aspects of the user-model that are utilized to drive system adaptation are in most cases intuitive and underdeveloped. Also, human information perception and cognitive processing is seldom considered in the design of adaptive human-computer interfaces.” (S. i)

Oft werden auch nur einzelne Problemzustände herausgegriffen oder neue Methoden zur Diagnostik werden eingesetzt, um damit vormals manuelle Adaptierungsmechanismen zu automatisieren. Besonders viele Studien zielen darauf ab, die mentale Beanspruchung zu erfassen, um auf dieser Basis Adaptierungen vornehmen zu können (z. B. Hilburn et al., 1997; Kaber et al., 2002; Parasuraman, 2003; Dorneich et al., 2012). Solch eindimensionale Betrachtungen berücksichtigen jedoch nicht, dass die verschiedenen Dimensionen des Nutzerzustands in Zusammenhang und gar Wechselwirkung miteinander stehen. Unfallanalysen, wie der Flugunfallbericht zum Absturz der Air-France-Maschine AF447 (BEA, 2012) weisen jedoch darauf hin, dass bei menschlichem Versagen oft mehrere dieser Faktoren beteiligt sind und sie womöglich erst in Kombination kritisches Fehlverhalten der Operateure verursachen (vgl. Schwarz et al., 2014; Schwarz, 2019).

Das Ziel der Adaptierungen ist in vielen betrachteten Beispielen, die Leistung des Mensch-Maschine-Systems zu maximieren, indem die Technik die Kontrolle über die Verwaltung der Informationspräsentation übernimmt, um die Auslastung der kognitiven Ressourcen des Menschen zu optimieren. All diese Ansätze basieren auf der frühen Vision einer Mensch-Computer-Symbiose (Licklider, 1960), in der Menschen maschinengestützt kognitive „Superkräfte“ erlangen. Auch wenn die Metapher der Symbiose einige Schwächen birgt (Fuchs et al., 2014), hilft sie doch, Verständnis dafür zu erzeugen, dass Mensch und Computer stärker integriert werden sollten, um natürlichere, umfangreichere und effizientere Interaktion zu ermöglichen. Selbst Licklider erkannte jedoch die Limitierungen der reinen Automation und folgerte, dass Systeme, in denen „menschliche Bediener hauptsächlich für Funktionen verantwortlich sind, deren Automation sich als unmöglich erwies [...], keine symbiotischen Systeme sind“ (Licklider, 1960, S. 4).

Trotz des großen Potenzials zur erfolgreichen Lösung der üblichen Automationsprobleme und trotz vielversprechender Fortschritte bei Methoden zur Diagnose von Nutzerzuständen, konnten sich adaptive Ansätze bis heute nicht für die Gestaltung von MMI etablieren. Insbesondere in komplexen und/oder operativen Systemen, die Nutzer- und Umweltzustände berücksichtigen, sind umfassende Repertoires adaptiver Mechanismen selten anzutreffen. Eine mögliche Ursache sind Schwächen bei der Umsetzung der Adaptierung durch zu geringe interne Variabilität, mit der die hohe Dynamik in komplexen Umgebungen nicht abgebildet werden kann. So ist den tatsächlich demonstrierten Systemen gemeinsam, dass die Ursache-Wirkungs-Beziehungen zwischen Problemzuständen und Adaptierungen relativ statisch sind: Wird ein kritischer Zustand X physiologisch festgestellt, erfolgt häufig die Aktivierung einer Adaptierungsstrategie A_x , die das Ziel hat, auf die menschliche Kognition zu wirken und so den unerwünschten Zustand zu adressieren. Ein bekanntes Beispiel ist die bei Müdigkeit im Auto aufleuchtende Kaffeetasse, die Fahrende auf ihren Zustand aufmerksam machen und zum Einlegen einer Pause ermutigen soll.

Es stellte sich auch als überzogen optimistisch heraus, dass Adaptivität die detektierten Problemzustände rückstandslos auflösen kann. Sobald eine Adaptierung den kognitiven Problemzustand erfolgreich adressiert hat, wird sie als unnötig betrachtet und beendet, um kognitive Kosten zu vermeiden. Durch den Wegfall der Unterstützung kann sich der kognitive Zustand wieder in den Problembereich bewegen – die Adaptierung löst erneut aus. Eine schnelle Oszillation des Adaptierungszustands und damit Systeminstabilität ist die Folge. So wurde die Stabilisierung des geschlossenen Regelkreises im AugCog-Programm ein wesentliches Thema (z. B. Young et al., 2004; Tollar, 2005).

Während über viele Jahre ein Großteil der Arbeit in Sensorik und Diagnostik floss, scheint sich seit einiger Zeit die Erkenntnis durchzusetzen, dass zunächst solide allgemeingültige Grundlagen zur Gestaltung adaptiver Systeme geschaffen werden müssen, bevor kognitionsadaptive MMI in großem Stil alltagstauglich werden kann (z. B. Steinhauser et al., 2009; Feigh et al., 2012; Fairclough, 2017). Mittlerweile existiert ein breites Spektrum von Forschungsarbeiten, das sich in unterschiedlichen Domänen mit der Gestaltung adaptiver Systeme und den identifizierten Herausforderungen befasst (z. B. Chioffi et al., 2022). Im Trainingsbetrieb gewinnen sogenannte *Adaptive Instructional Systems* – vermutlich aufgrund der kontrollierbaren Umgebung – bereits an Einfluss (Sottolare, 2018), im operativen Betrieb komplexer, sicherheitskritischer Umgebungen stehen diese Konzepte jedoch auch über 30 Jahre nach „Adaptive Aiding“ (Rouse, 1988) noch am Anfang. So stellten auch Bulling & Zander (2014) noch vor wenigen Jahren fest, dass *Cognition-aware Computing* Menschen bei sicherheitskritischen Aufgaben unterstützen kann, indem kognitive Belastung und Ermüdung

überwacht werden, in diesem Bereich jedoch viele Fragen zur technischen Berücksichtigung der Kognition noch zu erforschen sind:

“How does a cognition-aware environment or interaction with cognition-aware objects need to be designed and implemented? Which feedback is most appropriate to react to changes in the cognitive context of a person? Answers to these and similar questions will open up new areas of research, particularly in HCI and design.” (S. 82)

2.5 Assoziierte Vorarbeiten

Die vorliegende Arbeit entstand innerhalb eines größeren Gesamtvorhabens „Ganzheitliche Adaptierung der Mensch-Maschine-Interaktion“, das vom Bundesamt für Ausrüstung, Informationstechnik und Nutzung der Bundeswehr (BAAINBw) T2.3 im Rahmen einer Zuwendungsreihe an das Fraunhofer FKIE von 2013 bis 2019 gefördert wurde. Der im Gesamtvorhaben verfolgte Lösungsweg zur Adressierung der Schwächen bisheriger Ansätze für die Realisierung adaptiver MMI war eine stärkere Einbeziehung und Berücksichtigung des Menschen und seiner individuellen Eigenschaften und Fähigkeiten. Ziel war der humanzentrierte Entwurf eines Vorgehens und einer Komponente für eine technische Zustandsregulierung, die kritische Nutzustände diagnostiziert und bedarfsgerecht kontextadäquate Adaptierungen auswählt, um verschiedene mentale Problemzustände adressieren zu können. Um die Voraussetzungen für Entwicklung des Dynamischen Adaptierungsmanagements zu schaffen, wurden vom Autoren gemeinsam mit seiner Kollegin Jessica Schwarz im Rahmen des Gesamtvorhabens Vorarbeiten zu diesem Promotionsprojekt durchgeführt, welche die Erarbeitung einer ganzheitlichen Betrachtungsweise der adaptiven MMI zum Ziel hatten. Das resultierende *Rahmenwerk für eine ganzheitliche Betrachtung adaptiver MMI* berücksichtigt nicht nur die physiologische Aktivität eines Benutzers, sondern auch verhaltensbasierte Maße und Merkmale der Anforderungssituation in Bezug auf relevante Ereignisse (Leistungseinbrüche). Die Einbeziehung möglicher Einflussfaktoren soll Rückschlüsse auf potenzielle Ursachen für Nutzerzustandsänderungen zulassen, um kontextadäquate Adaptierungsstrategien bestimmen zu können.

Die Erarbeitung der gesamten technischen Zustandsregulierung – einschließlich der benötigten Diagnosefunktionen und des Dynamischen Adaptierungsmanagements – hätte den Umfang eines einzelnen Promotionsvorhabens überschritten. Die Umsetzung des Gesamtkonzepts wurde daher auf zwei Dissertationen verteilt, die im Rahmen des genannten Vorhabens entstanden. Nach dem Aufbau eines gemeinsamen Rahmenwerks wurde im Promotionsvorhaben von Schwarz (2019) eine *multifaktorielle Nutzerzustandsdiagnose* entwickelt. Das Konzept und der Output der multifaktoriellen Nutzerzustandsdiagnose lieferten dann die Voraussetzungen für die vorliegende Arbeit: die Gestaltung eines Dynamischen Adaptierungsmanagements, welches durch die Berücksichtigung leistungsrelevanter Nutzerzustandsänderungen und möglicher Einflussfaktoren bedarfsgerecht auf mentale Problemzustände des Nutzers reagieren kann. So wurde das Forschungsziel des Gesamtvorhabens erreicht, eine an die situativen Bedürfnisse des Operateurs angepasste Unterstützung zu erzeugen, die unerwünschten Zuständen durch kontextsensitive Adaptierung der MMI dynamisch entgegenwirkt und so die Gesamtleistung des Mensch-Maschine-Systems optimiert. Zum Verständnis der Rahmenbedingungen für die vorliegende Arbeit liefern die folgenden Abschnitte eine Einführung in das gemeinsame Rahmenwerk und die multifaktorielle Nutzerzustandsdiagnose.

2.5.1 Rahmenwerk für eine ganzheitliche Betrachtung adaptiver MMI

Wie schon zu Beginn dieser Arbeit erläutert, sollten moderne Mensch-Maschine-Systeme als Einheit – als gemeinsames Ganzes – betrachtet werden, wobei sich die einzelnen Systemkomponenten gegenseitig beeinflussen und wie das Gesamtsystem internen und externen Einflüssen unterliegen, die auf die Systemleistung und Systemstabilität einwirken (vgl. Abschnitt 1.1.1). Unabdingbar ist diese Sichtweise schon deshalb, weil die Leistung des Mensch-Maschine-Gesamtsystems direkt abhängig vom Zustand des menschlichen Operators ist. Durch die gestiegene technische Komplexität und die Heterogenität zusammenwirkender Entitäten entstehen in derartigen System jedoch zunehmend ergonomische Herausforderungen, die sich im kognitiven und emotionalen Zustand bemerkbar machen und die Gesamtleistung des Mensch-Maschine-Systems beeinträchtigen können. Abbildung 16 verdeutlicht diese Herausforderung, indem sie die im EVA-Modell vernachlässigte Rückkopplungsschleife und die sich wechselseitig beeinflussenden Prozesse innerhalb des Operators ergänzt.

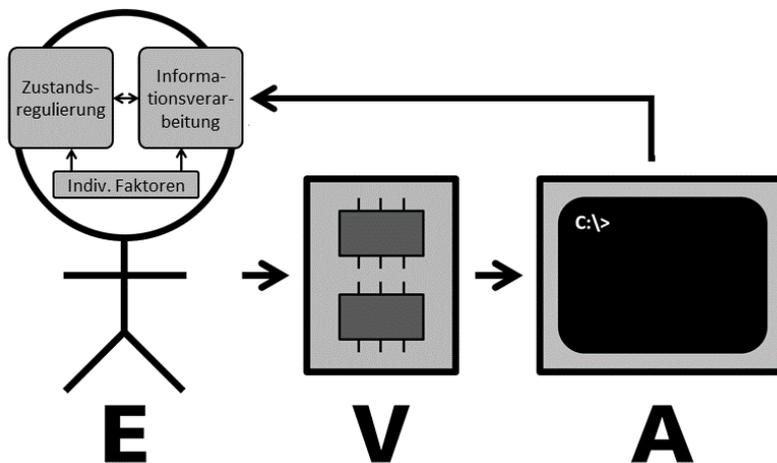


Abbildung 16. EVA-Modell mit Rückkopplung und internen Regelungsprozessen des Operators

In Abschnitt 2.1 wurde dargestellt, dass die menschliche Informationsverarbeitung nach Parasuraman et al. (2000) in vier Phasen unterteilt werden kann: sensorische Verarbeitung, Wahrnehmung/Arbeitsgedächtnis, Entscheidungsfindung und Handlungsauswahl (vgl. Abbildung 6). Fuchs und Schwarz (2013) schlagen vor, dass auch die menschliche Zustandsregulierung im Wesentlichen diesen Schritten folgt, um Selbstregulierungsstrategien anzuwenden. Ob es sich dabei um zwei separate Regelkreise handelt oder die Zustandsregulierung im Rahmen (und mit den Ressourcen) der Informationsverarbeitung erfolgt, wurde nicht untersucht, ist für das weitere Vorgehen aber auch unerheblich.

Bei der adaptiven MMI interagieren das menschliche und technische Untersystem eines Mensch-Maschine-Systems miteinander. Der Begriff *Interaktion* wurde im 19. Jahrhundert maßgeblich von Soziologen geprägt. In seiner deutschen Urform von Georg Simmel als „Wechselwirkung“ bezeichnet, beschreibt er „gegenseitig aufeinander bezogene Handlungen von Akteuren“ (Simmel, 1900, S. 40), deren Beziehungen auf Wechselseitigkeit beruhen. Dieses soziologische Begriffsverständnis ist für die adaptive MMI insoweit zutreffend, dass es Interaktion als Wechselwirkung zwischen zwei oder mehr Akteuren mit einer gegenseitigen dynamischen Abstimmung von Verhalten und Handeln begreift. Dafür ist es nötig, dass die Technik nicht nur auf explizite Eingaben des Menschen reagiert („event-based interaction“; z. B. Schmidt, 2005), sondern zu einer effektiven, wechselseitigen Kommunikation, Kooperation und Koordination mit ihm befähigt wird.

Für die Realisierung adaptiver MMI bedeutet das:

Um die Gesamtleistung des Mensch-Maschine-Systems in dynamischer Abstimmung zu optimieren, muss neben dem Verständnis des Menschen für die Maschine und seine Umwelt auch ein Verständnis der Maschine für den Menschen und die Umwelt geschaffen werden.

Vor dem Hintergrund dieses Postulats wurde in gemeinsamen Vorarbeiten des Autors mit Schwarz (Fuchs & Schwarz, 2013) ein ganzheitliches MMI-Modell entwickelt, das die Komponenten und Prozesse eines solchen erweiterten Mensch-Maschine-Gesamtsystems abbildet und das Zielsystem darstellt, in das die jeweiligen Promotionsvorhaben eingebettet werden. Zur Berücksichtigung der adaptiven Funktionalitäten wurde darin eine zu erarbeitende Komponente des technischen Untersystems ergänzt, die der menschlichen Zustandsregulierung entspricht. Diese technische Zustandsregulierung (in Abbildung 17 schwarz gefüllt) soll dem technischen Untersystem ermöglichen, Zustandsbewertungen von Umwelt und Operateur vorzunehmen und in die MMI einzugreifen, wodurch es zu der im Interaktionsbegriff geforderten aktiven Wechselwirkung zwischen den Systemkomponenten befähigt wird. Durch das so erzeugte Verständnis der Maschine für den Benutzer und die Umwelt soll die Technik unerwünschte Zustände des soziotechnischen Gesamtsystems durch eine interne Variabilität zwischen den einzelnen Systemkomponenten kompensieren und das Gesamtsystem im Bedarfsfall stabilisieren können.

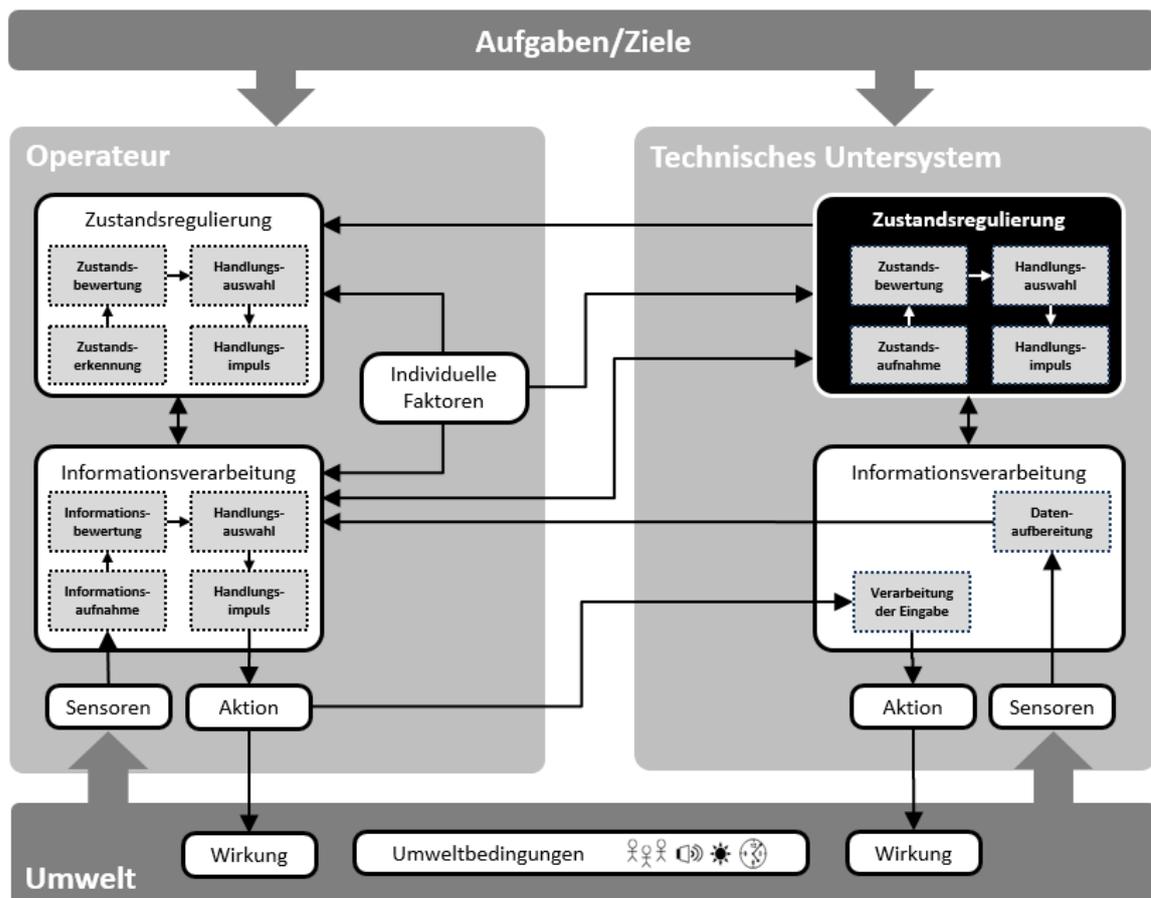


Abbildung 17. Ganzheitliches Modell der MMI mit technischer Zustandsregulierung und aktiver Wechselwirkung zwischen Operateur und technischer Systemkomponente (nach Fuchs und Schwarz, 2013)

Die Phasen der technischen Zustandsregulierung sind dabei an die Phasen der menschlichen Informationsverarbeitung angelehnt und verlaufen analog und parallel zum internen Zustandsregulierungsprozess beim Operateur. Zuerst erfolgt eine technische Erfassung und Bewertung des Umwelt- und Nutzerzustands (Diagnostik). Auf Basis der Diagnoseergebnisse kann das technische System dann Handlungsoptionen in Form von Unterstützungsstrategien generieren und diese gegebenenfalls auslösen. Handlungsauswahl und –auslösung stellen das in dieser Arbeit entwickelte Dynamische Adaptierungsmanagement dar. Dieses Vorgehen setzt voraus, dass nicht nur der Operateur, sondern auch das technische Untersystem die Aufgaben und Ziele des Gesamtsystems kennen. Bei Bedarf kann das System dann auch befähigt werden, selbsttätig auf die Umwelt einzuwirken. Im Gegensatz zum EVA-Modell ließe sich so auch technische Autonomie abbilden.

Der Entwurf der technischen Zustandsregulierung erfolgte in zwei separaten aber inhaltlich aufeinander aufbauenden Promotionsvorhaben. Konzeption und Umsetzung der diagnostischen Aspekte (Zustandsaufnahme und Zustandsbewertung) wurden in der Dissertation von Schwarz (2019) erarbeitet, die vorliegende Arbeit befasst sich mit dem Entwurf des Adaptierungsmanagements (Abbildung 18).

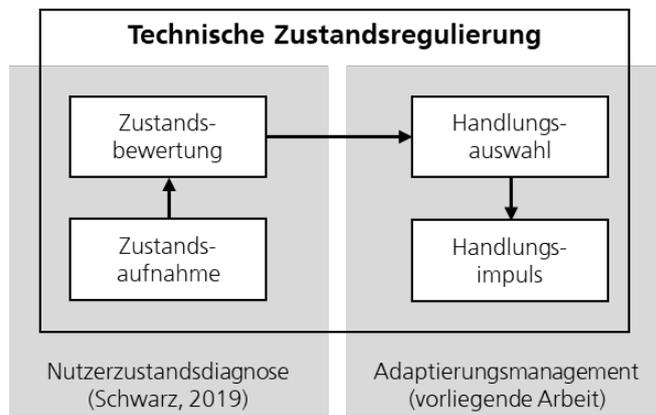


Abbildung 18. Technische Zustandsregulierung mit Zustandsdiagnose und Adaptierungsmanagement

2.5.2 Multifaktorielle Nutzerzustandsdiagnose nach Schwarz (2019)

Schwarz und Fuchs (2017) schlagen vor, den Nutzerzustand multidimensional als Zusammenwirken von sechs Faktoren – Beanspruchung, Müdigkeit, Motivation, Aufmerksamkeit, Situationsbewusstsein und emotionalem Zustand – zu definieren, da diese nachgewiesenermaßen die Leistung beeinträchtigen können (Tabelle 1).

Anhand empirischer Ergebnisse und theoretischer Modelle zu diesen Dimensionen des Nutzerzustands wurde in gemeinsamer Arbeit (Schwarz & Fuchs, 2014) ein Modell entwickelt, das in generischer Form beschreibt, welche Faktoren Einfluss auf die Entstehung und Regulierung des Nutzerzustands nehmen können, und welche Reaktionen aus dem Nutzerzustand resultieren können. Den Kernpunkt des Modells bildet der multidimensionale Nutzerzustand (vgl. Abbildung 19, A). Die Komponenten des Modells, die mit dem Nutzerzustand in Zusammenhang stehen, werden in Schwarz & Fuchs (2014) sowie in Schwarz (2019) näher erläutert.

Tabelle 1. Auswirkung von Nutzerzuständen auf die Leistung (nach Schwarz & Fuchs, 2017)

Nutzerzustand	Auswirkungen auf die Leistung	Literatur
Beanspruchung	Leistung kann sich verschlechtern, wenn die Beanspruchung zu hoch oder zu gering ist.	Hancock & Chignell (1986); Veltman & Jansen (2006)
Müdigkeit	Müdigkeit beeinträchtigt Informationsverarbeitung, Aufmerksamkeit, und Situationsbewusstsein.	Akerstedt et al. (2003)
Motivation	Motivation kann die Leistungsfähigkeit verbessern und eine Zeit lang auch bei Schlafentzug aufrechterhalten.	Wilkinson et al. (1966)
Aufmerksamkeit	Aufmerksamkeitsdefizite und Vigilanzverlust bei dauerhaften Überwachungsaufgaben beeinträchtigen die Leistung.	Wickens (2005); Mackworth (1948)
Situationsbewusstsein	Ein Großteil menschlicher Fehler (bei Flugzeugunfällen 88%) ist auf Probleme mit dem Situationsbewusstsein zurückzuführen.	Endsley (1999)
Emotionaler Zustand	Emotionen mit negativer Valenz und hohem Arousal können die Aufmerksamkeit einengen und die Informationsverarbeitung beeinträchtigen.	Staal (2004)

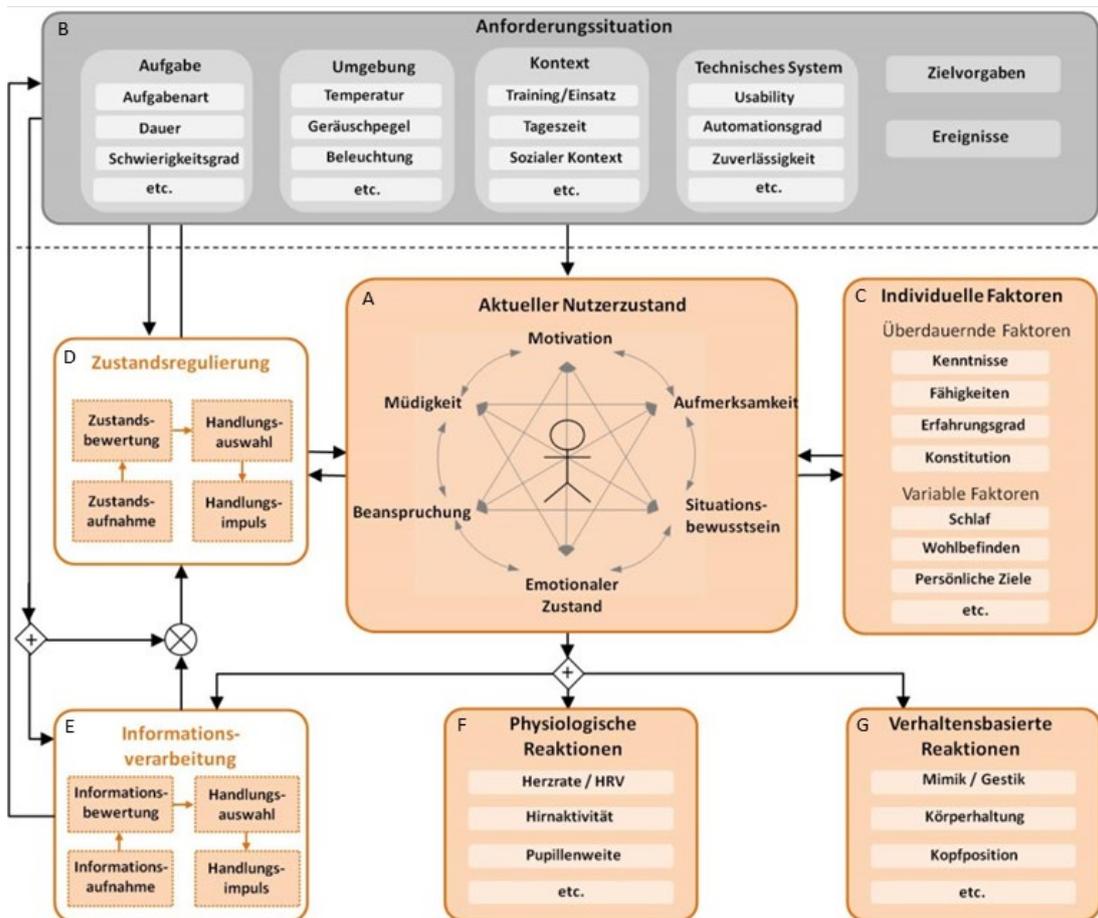


Abbildung 19. Generisches Modell zum Nutzerzustand (Schwarz & Fuchs, 2014)

Die Dimensionen des Nutzerzustands stellen in der Psychologie Konstrukte oder latente Variablen dar. Sie sind nicht unmittelbar beobachtbar, sondern können nur mit Hilfe anderer beobachtbarer Variablen erschlossen werden, die mit ihnen in Zusammenhang stehen (Abbildung 20). Dazu zählen beispielsweise die aus der Informationsverarbeitung resultierende Leistung sowie physiologische und verhaltensbasierte Reaktionen (vgl. Abbildung 19, F und G). Beobachtbare Reaktionen des Nutzerzustands, wie psychophysiologische Veränderungen, können jedoch nicht immer eindeutig auf eine bestimmte Zustandsdimension zurückgeführt werden. Die Diagnose erfolgt daher neben physiologischen und verhaltensbasierten Reaktionen auch über beobachtbare Einflussfaktoren des Nutzerzustands (z. B. Merkmale der Anforderungssituation).

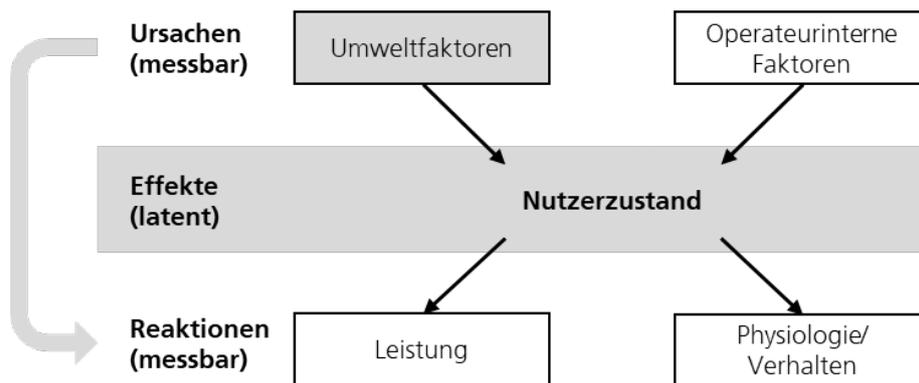


Abbildung 20. Vorgehen bei der Bewertung und Interpretation des (latenten) Nutzerzustands (Fuchs & Schwarz, 2014)

Auf Basis der dargestellten Modelle entwickelte Schwarz (2019) in ihrem Promotionsvorhaben eine multifaktorielle Nutzerzustandsdiagnose namens RASMUS (Real-Time Assessment of Multidimensional User State), die auf einer Kombination unterschiedlicher Indikatoren basiert. RASMUS führt heterogene Daten – Merkmale der Anforderungssituation, physiologische Daten des Operators sowie verhaltensbasierte Maße – zusammen und ermittelt daraus in Echtzeit Leistungseinbrüche und die Ausprägung unterschiedlicher Nutzerzustandsdimensionen (Abbildung 21). So kann gefolgert werden, welche Nutzerzustände wahrscheinlich zum Leistungsabfall beigetragen haben. Zudem identifiziert RASMUS auch kritische Ausprägungen von Einflussfaktoren, die mögliche Ursachen für beobachtete Zustandsänderungen darstellen. Damit die Technik bereits während der Aufgabenbearbeitung dynamisch reagieren kann, erfolgt die Auswertung und Interpretation der Daten kontinuierlich. Das Adaptierungsmanagement erhält mit den Diagnoseergebnissen genaue Informationen über die aktuelle Leistungsfähigkeit des Nutzers und kann Problemzuständen so nicht nur symptomatisch, sondern ursachenbezogen entgegenwirken. Da RASMUS im Rahmen des Promotionsvorhabens von Schwarz empirisch validiert wurde, steht damit ein verlässliches Diagnosewerkzeug zur Verfügung, das die diagnostische Grundlage für die Entwicklung des Dynamischen Adaptierungsmanagements bildet.

Auf Basis der multifaktoriellen Nutzerzustandsdiagnose kann eine deutlich flexiblere und bedarfsgerechtere Unterstützung der Nutzer erfolgen als in bisherigen Ansätzen. Das in der vorliegenden Arbeit entworfene Dynamische Adaptierungsmanagement soll den detaillierten Output von RASMUS verwerten, um das technische System zu einer bedarfsadäquaten Wechselwirkung mit dem Operateur und seiner Umwelt zu befähigen.

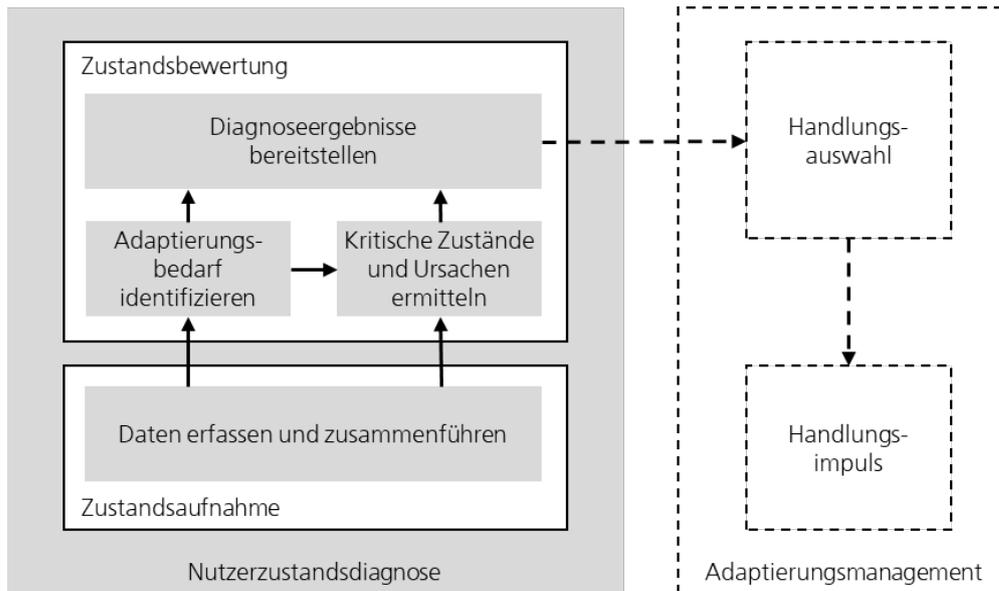


Abbildung 21. Diagnoseschritte der RASMUS-Zustandsdiagnose nach Schwarz (2019)

2.5.3 Betrachtete kritische Nutzerzustände

Zur Validierung der Multifaktoriellen Nutzerzustandsdiagnose im Rahmen von Schwarz' Promotionsvorhaben wurde RASMUS für drei in dieser Domäne besonders relevante Nutzerzustände konfiguriert und empirisch untersucht (Schwarz, 2019):

- hohe mentale Beanspruchung
- falsch gerichtete Aufmerksamkeit
- passive aufgabenbezogene Müdigkeit

Nachfolgend werden der psychologische Hintergrund und die Relevanz der von RASMUS berücksichtigten Dimensionen des mentalen Nutzerzustands im Detail betrachtet.

Hohe mentale Beanspruchung

Das Belastungs-Beanspruchungs-Konzept nach Rohmert (1984) grenzt eine auslösende externe Belastung von der im Menschen resultierenden Beanspruchung ab und erlaubt es so, die individuellen Reaktionen der Menschen auf Belastungen arbeitswissenschaftlich zu untersuchen. Dabei stellt die Belastung „objektive, von außen auf den Menschen wirkende Größen und Faktoren“ dar, während Beanspruchung die „Auswirkungen [der Belastung] im Menschen und auf den Menschen“ bezeichnet (Rohmert & Rutenfranz, 1975, S. 8). Demzufolge kann beispielsweise bei einem Novizen die gleiche Belastung zu höher Beanspruchung führen als bei einem Experten.

Die Beanspruchung wird von RASMUS als multidimensionales Konstrukt betrachtet, das sich in verschiedene Arten oder Ausprägungsformen untergliedern lässt. So unterscheidet Schwarz (2019) zunächst zwischen *psychischer* und *physischer Beanspruchung*. Unter psychischer Beanspruchung wird gemäß DIN EN 10 075-1 (2000) die Gesamtheit aller erfassbaren Einflüsse verstanden, die von außen auf den Menschen zukommen und psychisch auf ihn einwirken. Psychische Beanspruchung bezieht sich demnach auf kognitive Vorgänge, während physische Beanspruchung aus körperlich anstrengenden Belastungen resultiert.

Die betrachtete psychische Beanspruchung wird zunächst weiter unterteilt in *mentale* und *emotionale Beanspruchung*. Bei RASMUS liegt der Fokus auf der mentalen Beanspruchung, die

durch *aufgabenspezifische* Belastungsfaktoren wie Schwierigkeit und Komplexität bestimmt wird. Die durch Informationsverarbeitung verursachte mentale Beanspruchung kann sich auf unterschiedliche Schritte der Informationsverarbeitung beziehen. Die sensorische Verarbeitung kommt in *bottom-up*-Richtung weitgehend ohne zentrale Verarbeitungsressourcen aus, der Ressourcenbedarf der übrigen Verarbeitungsschritte lässt sich gemäß den in Abschnitt 2.1 dargestellten Modellen weiter in *perzeptive, kognitive und psychomotorische Beanspruchungsformen* unterteilen.

Als Beanspruchungsindikatoren kommen bei RASMUS die Anzahl der Aufgaben (als Merkmal der Belastung/Anforderungssituation), die Mausklickfrequenz (als verhaltensbasiertes Maß) und drei physiologische Parameter – Pupillenweite, Herzratenvariabilität und Atemfrequenz – für die Messung der physiologischen Erregung (engl.: *Arousal*) zum Einsatz.

Falsch gerichtete Aufmerksamkeit

Im Kontext von RASMUS wird Aufmerksamkeit nach James (1890) als Prozess beschrieben, bei dem sich eine Person auf bestimmte Informationen konzentriert, während andere Informationen von der bewussten Wahrnehmung ausgeschlossen werden. Erklärbar ist dies mit den in den Abschnitten 2.1 und 2.2 beschriebenen ressourcentheoretischen Ansätzen und Bottleneck-Theorien, nach denen einkommende Informationen in Filterprozessen vorselektiert werden, bevor diese ins Kurzzeitgedächtnis gelangen und bewusst wahrnehmbar werden, um einer Überlastung des kognitiven Systems vorzubeugen. RASMUS betrachtet die Aufmerksamkeit, da verschiedene potenziell leistungsmindernde Phänomene bekannt sind, die mit ihr in Zusammenhang stehen. Beispiele sind Ablenkung durch unerwartete Ereignisse, zeitlich bedingt herabgesetzte Daueraufmerksamkeit (Mackworth, 1948) und falsche Aufmerksamkeitsverteilung durch zu starke Fokussierung auf eine Aufgabe (*inattentional blindness*; Mack & Rock, 1998). Aus einer zu stark eingegengten Aufmerksamkeit oder einer falschen Aufmerksamkeitsverteilung können fehlerhafte Entscheidungen und Handlungen resultieren, die Stabilität und Effektivität des Mensch-Maschine-Systems gefährden.

RASMUS diagnostiziert eine falsch gerichtete Aufmerksamkeit, wenn Aufgaben übersehen oder nicht bearbeitet wurden, weil der Aufmerksamkeitsfokus auf weniger wichtigen Aufgaben lag. Dazu analysiert RASMUS die Priorität der vorliegenden Aufgaben in Bezug auf die aktuell ausgewählte Aufgabe.

Passive aufgabenbezogene Müdigkeit

Grundsätzlich kann zwischen schlafbezogener und aufgabenbezogener Müdigkeit unterschieden werden (vgl. May & Baldwin, 2009). Bei RASMUS liegt der Fokus auf der Diagnose aufgabenbezogener Müdigkeit, da nur diese durch Adaptierung der MMI adressiert werden kann. Sie wird von Schwarz (2019) noch weiter unterteilt in eine aktive und eine passive Form. Während eine dauerhaft hohe Beanspruchung die *aktive* aufgabenbezogene Müdigkeit hervorruft, entsteht die *passive* aufgabenbezogene Müdigkeit bei einer stark monotonen Aufgabe mit sehr geringer Beanspruchung und hoher Vorhersagbarkeit (May & Baldwin, 2009). Letztere wird von RASMUS diagnostiziert.

Als Indikatoren für die passive aufgabenbezogene Müdigkeit kommen bei RASMUS erneut die Anzahl der Aufgaben (als Merkmal der Anforderungssituation), die Mausklickfrequenz (als verhaltensbasiertes Maß) und drei physiologische Parameter (Pupillenweite, Herzratenvariabilität und Atemfrequenz) zum Einsatz, jedoch im Vergleich zur Beanspruchung in exakt umgekehrter Ausprägung (Tabelle 2).

Tabelle 2. Ausprägung der Einflussfaktoren zur Diagnose hoher Beanspruchung und passiver aufgabenbezogener Müdigkeit

Indikator	Hohe Beanspruchung	Passive aufgabenbezogene Müdigkeit
Anzahl der Aufgaben	hoch	niedrig
Mausklickfrequenz	hoch	niedrig
Pupillenweite	hoch	niedrig
Herzratenvariabilität	niedrig	hoch
Atemfrequenz	hoch	niedrig

2.6 Erkenntnisse für den Entwurf dynamischer Adaptierung

In diesem Abschnitt wird zusammengefasst, welche Erkenntnisse aus der Analysephase für die Gestaltung und Konzeption des Dynamischen Adaptierungsmanagements abgeleitet wurden, um das technische System zu einer bedarfsadäquaten Anpassung der Interaktion zu befähigen.

2.6.1 Adaptierungen kontext- und situationspezifisch auswählen

In einem biokybernetischen System stellen Adaptierungen technische Reaktionen auf bestimmte Diagnoseergebnisse dar, die durch spezifische Situationen und Konstellationen hervorgerufen wurden. Da der Systemzustand sich permanent verändert, kann eine bestimmte Adaptierung nur situativ in Bezug auf einen bestimmten Systemzustand wirksam sein. Ändern sich Situation und Kontext, kann eine zuvor angemessene Anpassungsstrategie unerwünschte Wirkung entfalten (vgl. Abschnitt 1.1.2). Das Adaptierungsmanagement sollte daher in der Lage sein, die Technik durch eine hohe interne Variabilität an wechselnde Situationen anzupassen. Eine statische Auslösung der immer gleichen Adaptierungen hat sich in bisherigen Ansätzen als nicht praxistauglich erwiesen (vgl. Abschnitt 2.4.6).

Stattdessen erscheint eine kontextsensitive, dynamische Aktivierung, Änderung oder Deaktivierung von Adaptierungsstrategien ratsam. Dabei sollte ein adaptives System laut Winter et al. (1997) für eine optimale Unterstützung des Bedieners den Status der Aufgabe, des Systems und des Benutzers berücksichtigen. Auch Fairclough (2017b) fordert variabelere Adaptierungsmöglichkeiten (vgl. Abschnitt 2.4.4). Kruse & Schmorow (2005, vgl. Abschnitt 2.4.3) äußerten den Wunsch nach spezifischeren Adaptierungen durch eine Kombination von kognitiven Messwerten mit Details zu Aufgaben und Verhaltensweisen. Verhaltensmaße und Merkmale der Anforderungssituation sollten berücksichtigt werden, um Problemzustände nicht nur symptomatisch, sondern auch kausal mit kontextspezifischen Maßnahmen adressieren zu können (vgl. Sciarini & Nicholson, 2009; Steinhauser et al., 2009). Diese Maße und Merkmale können genutzt werden, um den Aufgabenkontext, mögliche Ursachen für beobachtete Leistungsprobleme oder die Absicht des Benutzers abzuleiten (Fuchs & Schwarz, 2017). Außerdem können sie dazu dienen, problemursächliche kognitive Engpässe (vgl. Abschnitt 2.2) zu identifizieren, über die sich geeignete Gegenmaßnahmen ableiten lassen. Fuchs et al. (2006; 2007) erkannten zudem, dass die Berücksichtigung und Analyse der Anforderungssituation, z. B. des Aufgabenstatus und der Aufgabenpriorität, in Verbindung mit einem ereignisbasierten Ansatz, eine bessere Kontextsensitivität ermöglicht, da Maßnahmen dann an die mit den Leistungsproblemen assoziierten Ereignisse gekoppelt werden können.

2.6.2 Kosten der Adaptierung bedenken

Adaptierungen der MMI können kognitive Zustände günstig beeinflussen, sind jedoch stets auch mit kognitiven Kosten verbunden, die in positivem Verhältnis zum Nutzen stehen sollten. Wann und wie Adaptivität implementiert wird, sollte darauf beruhen, ob die Vorteile der Adaptierung die möglichen Kosten überwiegen (Lavie & Meyer, 2010). Mögliche Kosten von adaptivem Verhalten wurden in Abschnitt 1.1.2 beschrieben. Auch kann die Mitigation eines kognitiven Engpasses (vgl. Abschnitt 2.2) einen anderen hervorrufen. Die jeweiligen Vor- und Nachteile von Adaptierungen sollten daher sorgfältig gegeneinander abgewogen werden. Funktionalität, die keinerlei Kosten aufweist, sollte nicht situativ, sondern als permanente Designverbesserung implementiert werden.

2.6.3 Zielerreichung überprüfen

Mit dem Auslösen einer Adaptierung verändert sich der Systemzustand und somit gegebenenfalls auch der Adaptierungsbedarf. Diese Rückkopplungsschleife muss berücksichtigt werden, damit Adaptierungen sich nicht kontraproduktiv auf die Systemleistung auswirken. Insoweit ist es erforderlich, eine Erfolgskontrolle der Zielerreichung durchzuführen, um die Adaptierung nötigenfalls anzupassen oder zu beenden. Dafür sind bewertbare Kriterien notwendig.

Es bietet sich an, ein Adaptierungsziel festzulegen, das über Leistungskriterien definiert ist, anhand derer die Zielerreichung überprüft werden kann. Um zu berücksichtigen, dass ein Adaptierungsziel auf verschiedene Weisen erreicht werden kann, bietet sich eine konzeptionelle Unterscheidung zwischen Adaptierungszielen und Adaptierungsstrategien an. Die Adaptierungsziele beschreiben, was erreicht werden soll, die Adaptierungsstrategie bestimmt, wie das passiert. Durch diese Entkopplung kann leicht überprüft werden, ob eine Strategie im vorliegenden Kontext praktikabel und zielführend ist. Beispielsweise ist eine Reduktion der Aufgabenzahl durch Automation nur möglich, wenn ausreichend automatisierbare Aufgaben vorhanden sind.

2.6.4 Umgang mit mehreren Problemzuständen ermöglichen

Eindimensionale Betrachtungen des Nutzerzustandes, wie sie beispielsweise beim Adaptive Aiding oder der adaptiven Automation (vgl. Abschnitt 2.4.2) üblich waren, berücksichtigen nicht, dass die verschiedenen Dimensionen des Nutzerzustands in Zusammenhang und gar Wechselwirkung miteinander stehen (vgl. Abschnitt 2.5.2). Eine Adaptierung basierend auf einem einzelnen Problemzustand kann zu einer übermäßigen Vereinfachung führen, bei der das Symptom statt der Ursache adressiert wird. Zum Beispiel kann die Aufmerksamkeit durch Arbeitsbelastung, Müdigkeit und sogar den emotionalen Zustand moduliert werden, aber abhängig vom modulierenden Zustand kann die Aufmerksamkeit auf sehr unterschiedliche Weise beeinflusst werden.

Die multifaktorielle Nutzerzustandsdiagnose erlaubt es, kritische Ausprägungen mehrerer Nutzerzustandsdimensionen zeitgleich zu detektieren. Das Dynamische Adaptierungsmanagement muss folglich auch effektiv sein, wenn mehrere Ziele gleichzeitig verfolgt oder gegeneinander abgewogen werden müssen. Es kann passieren, dass mehrere Adaptierungen direkt nacheinander oder gar gleichzeitig angewendet werden. Das Dynamische Adaptierungsmanagement sollte solche Fälle berücksichtigen, dabei aber verhindern, dass verschiedene Adaptierungen gegeneinander arbeiten oder um die kognitiven Ressourcen des Nutzers konkurrieren. Damit diese sich nicht stören oder gegenseitig negativ beeinflussen, sollte

eine Koordination verschiedener Adaptierungsstrategien und/oder -ziele erfolgen. Mögliche Ansätze wären, die durch Adaptierung zu erreichenden Ziele zu priorisieren oder die Kombination unverträglicher Adaptierungsstrategien technisch oder regelbasiert auszuschließen. Denkbar ist auch die Entwicklung von Transitions- oder Exitmechanismen, die einen problemlosen Übergang zwischen verschiedenen Adaptierungsmodi begünstigen.

2.6.5 Geeignete Interventionsvariablen ermitteln

Kognitive Zustände sind hypothetische Konstrukte, die nicht direkt manipuliert werden können (vgl. Abschnitt 2.5.2). Um kognitive Engpässe auflösen zu können, müssen die Adaptierungsstrategien geeignete Parameter aus dem Kontext der Aufgabenumgebung manipulieren, über welche die Ursache von Engpässen indirekt beeinflusst werden kann. Eignung und Verfügbarkeit von Interventionsvariablen sind daher für die Bestimmung der Angemessenheit von Adaptierungsstrategien von wesentlicher Bedeutung.

Beispiel: Ein plausibler Weg, um eine kritisch hohe Beanspruchung des Nutzers zu verringern, könnte darin bestehen, die Anzahl gleichzeitiger Aufgaben zu verringern. Diese Strategie funktioniert jedoch nur, wenn die Anzahl der Aufgaben hoch ist. Wenn die Beanspruchung aber steigt, weil beispielsweise ein Engpass in den exekutiven Funktionen ursächlich ist (z. B. aufgrund mangelnder Erfahrung) obwohl nicht viele Aufgaben vorhanden sind, kann diese Strategie nicht effektiv wirken und es muss eine Strategie gewählt werden, die zur Intervention auf eine andere Variable abzielt.

2.6.6 Oszillation von Nutzerzuständen und Adaptierungen vermeiden

Entfällt der situationsspezifische Bedarf für eine Adaptierung, sollte diese wieder deaktiviert werden, um kognitive Kosten zu vermeiden. Durch den Wegfall der Unterstützung kann sich der kognitive Zustand jedoch wieder in den Problembereich bewegen. Zur Vermeidung schneller Oszillationen des Adaptierungszustands und damit einhergehender Systeminstabilität (vgl. Abschnitt 2.4.3) ist ein schrittweises Vorgehen bei der Adaptierung denkbar, das so zurückhaltend wie möglich, aber so aufdringlich wie nötig ist. Tollar (2005) schlägt vor, dass Adaptierungen „abgestuft oder schrittweise in Stufen ausgelöst werden“ (S. 417). Auch Fuchs et al. (2006, 2007) beschreiben einen Ansatz, der Adaptierungsstufen („Stages of Adaptation“) verwendet, um die Intensität und Intrusivität der Adaptierung basierend auf der Aufgabenpriorität zu modulieren. Diesbezüglich wäre denkbar, verschiedene Konfigurationen von Adaptierungen mit unterschiedlicher Intensität oder Intrusivität zu ermöglichen.

2.6.7 Nicht-deterministischen Charakter der Kognition berücksichtigen

Damit der biokybernetische Loop funktioniert, müssen die Adaptierungen beim Nutzer bestimmte Änderungen in der kognitiven Verarbeitung wirksam auslösen und die gewünschte Reaktion auf der Seite des Menschen hervorrufen. Die Abhängigkeit eines technischen Systems von der menschlichen Kognition stellt jedoch ein „wicked Problem“ (Hevner, 2004) dar, denn es kann kein Determinismus der Bedienerkognition vorausgesetzt werden. Es ist nicht sichergestellt, dass jeder Nutzer dieselbe Information gleich interpretiert oder das mentale Modell der Situation über verschiedene Personen hinweg kongruent ist. Wie in Abschnitt 2.1 anhand von Modellen der menschlichen Kognition dargestellt wurde, wird die Kognition von vielerlei individuellen Aspekten beeinflusst – beispielhaft seien unterschiedliche Erfahrungen im Langzeitgedächtnis, individuelle Ausprägungen der Kapazitätsgrenzen und Engpässe sowie unterschiedliche Fähigkeiten zur bewussten Lenkung der Aufmerksamkeit genannt.

Der systemtechnische Ansatz nach Vorbild eines Regelkreises mag zwar ein valider konzeptioneller Ausgangspunkt ingenieurwissenschaftlicher Arbeiten sein, man sollte aber beachten, dass der Mensch und sein Handeln grundsätzlich nicht deterministisch sind und die Wirkung der Adaptierung dementsprechend unverlässlich ausfallen kann. Im Sinne des humanzentrierten Ansatzes dieser Arbeit sollte das Dynamische Adaptierungsmanagement daher die Wirkung der Adaptierungen überprüfen und in der Lage sein, die Strategie gegebenenfalls anzupassen oder zu ändern, wenn die angestrebten Zustandsänderungen beim Nutzer nicht eintreten.

2.6.8 Unzulänglichkeiten von Laboraufgaben vermeiden

Viele der betrachteten früheren Ansätze führten in Laborversuchen zu beachtlichen Ergebnissen. Trotzdem konnten sich die Methoden bis heute nicht in der Praxis etablieren. Dies mag daran liegen, dass die demonstrierten Adaptierungsmechanismen nicht hinreichend dynamisch sind, um die Komplexität eines unvorhersehbaren menschlichen Handelns in einer unvorhersehbaren Umwelt zu bewältigen. So funktionierten sie in der kontrollierbaren Künstlichkeit der Laborumgebung, konnten jedoch bisher nicht erfolgreich in operative Bedingungen transferiert werden. Daraus ergibt sich, dass Konzepte adaptiver MMI in möglichst praxisnahen Arbeitsumgebungen getestet und validiert werden sollten.

3 Entwurf und Operationalisierung der dynamischen Adaptierung der MMI

In Anlehnung an das in Abschnitt 2.5.1 vorgestellte Modell der MMI mit aktiver Wechselwirkung zwischen Operateur und technischer Systemkomponente (nach Fuchs & Schwarz, 2013) wird in diesem Kapitel eine Komponente für das Adaptierungsmanagement entworfen. Sie ist Teil einer technischen Zustandsregulierung und soll die in der Analysephase erarbeiteten Implikationen für die Gestaltung technikeitiger Adaptierung (vgl. Abschnitt 2.6) berücksichtigen. Durch eine dynamische Auswahl der Adaptierungen entsteht eine größere interne Variabilität des technischen Systems, das heißt es bestehen mehr Freiheitsgrade, das Systemverhalten zu verändern, um unerwünschte Ausprägungen des Nutzerzustands durch Wirkung auf deren Einflussfaktoren gezielt adressieren zu können. Schmidt (2014) beschreibt das wesentliche Vorgehen beim Entwurf kontextadaptiver Systeme in drei Stufen:

1. Definition einer Reihe von Kontexten, die für die Adaptierung relevant sind,
2. Auswahl einer Reihe von Funktionalitäten oder Anwendungen die [zur Adaptierung] verwendet werden und
3. Erstellen von Verknüpfungen zwischen den Kontexten und den Funktionalitäten.

Zur Adressierung von **Forschungsfrage 1** wird in Abschnitt 3.1 die Konzeption eines Dynamischen Adaptierungsmanagements beschrieben, das die kontextsensitive Auswahl, Konfiguration und Auslösung von Adaptierungsstrategien dynamisch steuern soll, um unerwünschten Zuständen und Leistungseinbrüchen entgegenzuwirken. Dabei wird auch auf die Nutzung von Kontext zur Ermittlung von Adaptierungsbedarf eingegangen. Die Verknüpfung von Kontext und Funktionalität erfolgt über sogenannte Adaptierungsziele. Unter Bezugnahme auf die in den Abschnitten 2.1 bis 2.3 eingeführten kognitionspsychologischen Hintergründe werden dann in Abschnitt 3.2 beispielhafte Ziele und Strategien für die Adaptierung hergeleitet, mit denen kontextsensitiv und bedarfsadäquat auf diagnostizierte Leistungseinbrüche und kritische Nutzerzustände reagiert werden kann (vgl. **Forschungsfrage 2**), um die Machbarkeit des Ansatzes zu demonstrieren. Das in Abschnitt 3.3 beschriebene Experteninterview dient der Ableitung von Implikationen für das weitere Vorgehen.

Abschnitt 3.4 beschreibt die Übertragung der erarbeiteten Konzepte in eine relevante Aufgabenumgebung sowie die Abbildung und technische Umsetzung der adaptiven Funktionalitäten darin. Zur Beantwortung von **Forschungsfrage 3** wird in Abschnitt 3.5 schließlich die Operationalisierung des Dynamischen Adaptierungsmanagements durch die Verbindung von Nutzer- und Aufgabenkontext mit der adaptiven Funktionalität beschrieben. Außerdem wird dargestellt, wie die hergeleiteten Adaptierungsstrategien für das Zusammenspiel im Rahmen eines Dynamischen Adaptierungsmanagements operationalisiert und in die gewählte Aufgabenumgebung gestalterisch integriert werden.

So kann schließlich durch die Kombination der Multifaktoriellen Nutzerzustandsdiagnose von Schwarz (2019; vgl. Abschnitt 2.5.2) mit der hier entwickelten Komponente für ein Dynamisches Adaptierungsmanagement eine Adaptierung der MMI erfolgen, die eine deutlich flexiblere Unterstützung des Menschen ermöglicht als bisherige Ansätze.

3.1 Konzept des Dynamischen Adaptierungsmanagements

Das Adaptierungsmanagement muss ermitteln, ob und wie ein diagnostizierter kritischer Nutzerzustand im Rahmen einer internen Variabilität technikseitig adressiert werden kann. Bei der Dynamischen Adaptierung soll dafür abhängig von Kontext und diagnostiziertem Zustand aus einem Pool möglicher Adaptierungen jeweils die Strategie ausgewählt, die hinsichtlich der jeweiligen Anforderungssituation und der individuellen Bedürfnisse des Operateurs am besten geeignet ist, den kritischen Nutzerzustand und schließlich die Leistung positiv zu beeinflussen.

Wie kann also ein Dynamisches Adaptierungsmanagement gestaltet sein, damit es seinen Zweck – bedarfsadäquate Auswahl, Konfiguration und Auslösung von Adaptierungen – erfüllen kann? Zur Beantwortung dieser Frage (**Forschungsfrage 1**) wird im Folgenden ein Vorgehen für ein Dynamisches Adaptierungsmanagement erarbeitet.

3.1.1 Feststellung von Adaptierungsbedarf

Ein soziotechnisches System, bestehend aus einem menschlichen und einem adaptiven technischen Subsystem, ist ein Spezialfall eines komplexen adaptiven Systems, in dem beide Komponenten ebenfalls adaptive Systeme sind. Menschliche Akteure verfügen über interne homöostatische Regelungsmechanismen zur Selbstanpassung (z. B. Bewältigungsstrategien). Das Vorhandensein dieser Mechanismen muss bei der Verwendung technikseitiger Adaptivität berücksichtigt werden, da andernfalls eine kontraproduktive Überlagerung der Effekte auftreten kann. Insbesondere ist zu vermeiden, dass die zwei adaptiven Komponenten kontraproduktiv in Wechselwirkung treten (vgl. Abschnitt 2.4.2). Veltman und Jansen (2004) zufolge funktioniert ein adaptives technisches System am wahrscheinlichsten dann erfolgreich, wenn es erst mit der Adaptierung beginnt, sobald der Bediener nicht mehr in der Lage ist, sich angemessen an sich ändernde Aufgabenanforderungen anzupassen. Auch Breton und Bossé (2003) sehen die optimale Zusammenarbeit zwischen Mensch und Technik dann erreicht, wenn die Technik den Menschen unterstützt, wo dessen kognitive Fähigkeiten nicht mehr ausreichen, um die Aufgabe adäquat zu bearbeiten. Ein zu frühes Eingreifen kann Complacency fördern („basierend auf einer ungerechtfertigten Annahme eines zufriedenstellenden Systemzustands“, Billings et al. (1976), S. 23; vgl. auch Abschnitt 2.3) und die Entwicklung von Resilienz und Bewältigungsstrategien verhindern. Daher soll im vorliegenden humanzentrierten Ansatz erst dann Adaptierungsbedarf angenommen werden, wenn die Leistung nicht mehr durch Selbstregulierung aufrechterhalten werden kann. Adaptierungsbedarf ist folglich indiziert, wenn die operateurinternen Regulierungsmechanismen nicht zielführend sind oder vollständig versagen.

Zur Feststellung des Adaptierungsbedarfs dient im Gesamtkonzept von Schwarz und Fuchs daher das Konstrukt des *Leistungseinbruchs*. Die Detektion eines Leistungseinbruchs soll als Voraussetzung für die Feststellung von Adaptierungsbedarf dienen, damit der Mensch zunächst die Möglichkeit hat, sich selbst an den Problemzustand anpassen zu können. Die Feststellung von Adaptierungsbedarf erfolgt auf Basis der multifaktoriellen Nutzerzustandsdiagnose: Ein Leistungseinbruch wird von der RASMUS-Diagnosekomponente (vgl. Abschnitt 2.5.2) diagnostiziert, wenn eine Aufgabe nicht in der dafür vorgesehenen Zeit korrekt bearbeitet wird. Dies wird als sicheres Indiz dafür gewertet, dass die Selbstregulierung des Menschen die Leistung nicht mehr effektiv aufrechterhalten kann. Da die Diagnosekomponente erfolgreich empirisch validiert wurde, werden mögliche Fehler in der Zustandsdiagnose in dieser ersten Annäherung nicht berücksichtigt.

Neben der Berücksichtigung der operateurinternen Selbstregulierung hat das Konstrukt des Leistungseinbruchs einen weiteren konzeptionellen Vorteil: Kritische Ausprägungen des Nutzerzustands können auf spezifische Aufgaben und die damit assoziierten Informationsobjekte sowie die Parameter der vorliegenden Anforderungssituation bezogen werden. Dadurch wird ereignisbasierter Kontext erzeugt, der für die Konfiguration der Adaptierung genutzt werden kann (vgl. Abschnitt 2.6.1).

3.1.2 Funktionsweise und Voraussetzungen der Adaptierung

Nutzerzustände sind latente Konstrukte, auf welche die Adaptierung nicht direkt wirken kann (vgl. Abschnitt 2.5.2). Daher muss die Wirkung auf den Nutzerzustand stets indirekt mithilfe einer geeigneten Interventionsvariable erfolgen (vgl. Abschnitt 2.6.5).

Das dieser Arbeit zugrundeliegende Nutzerzustandsmodell von Schwarz & Fuchs (2014; vgl. Abbildung 19) basiert auf der Feststellung, dass Leistung und Nutzerzustände sowie beobachtbare Reaktionen von zahlreichen Einflussfaktoren moduliert werden. Das Verhältnis zwischen Einflussfaktoren und Nutzerzuständen kann dabei einerseits der Ursachenermittlung für eine beobachtete Zustandsveränderung dienen, umgekehrt aber auch – sofern die Einflussfaktoren durch das technische System manipulierbar sind – der Einflussnahme auf den Nutzerzustand (Intervention) mittels Adaptierung. Dieses Wirkprinzip macht sich das Dynamische Adaptierungsmanagement zunutze. Seine Wirkung auf den Nutzerzustand erfolgt über manipulierbare Einflussfaktoren, im Folgenden auch als Interventionsvariablen bezeichnet, die in Wirkzusammenhang mit dem zu beeinflussenden Nutzerzustand stehen. Beispiele für solche Einflussfaktoren, die durch Adaptierung manipuliert werden können, sind die Anzahl der Aufgaben oder die Salienz von Informationen. So kann eine zu hohe Aufgabenanzahl eine kritisch hohe Beanspruchung ursächlich hervorrufen, umgekehrt kann die Verringerung der Aufgabenanzahl eine mögliche Adaptierungsstrategie darstellen, um die Beanspruchung zu reduzieren.

Der „Closed-Loop“-Ansatz des Dynamischen Adaptierungsmanagements soll also die Leistung wiederherstellen, indem durch Adaptierung der MMI über einen manipulierbaren Einflussfaktor auf den zugrundeliegenden kognitiven Problemzustand indirekt gewirkt wird (siehe Abbildung 3). Damit die Adaptierung im Sinne eines CLAS Einfluss auf die Leistung und den Nutzerzustand nehmen kann, liegen dem Konzept des Dynamischen Adaptierungsmanagements zwei wesentliche Annahmen zugrunde:

1. Leistungseinbrüche sind Symptome, die durch zugrundeliegende kognitive Problemzustände verursacht werden. Zum Beispiel kann die Nichtbearbeitung von Aufgaben durch mentale Zustände wie übermäßige Beanspruchung, falsch gerichtete Aufmerksamkeit oder eine verminderte Vigilanz verursacht werden.
2. Die Aufgabenleistung kann wiederhergestellt werden, indem die Interaktion so angepasst wird, dass dies eine Wirkung auf den zugrundeliegenden kognitiven Problemzustand hat und diesen auf ein unkritisches Niveau zurückführen kann.

Folglich können mit dem hier erarbeiteten Konzept nur solche Leistungseinbrüche adressiert werden, die mit mindestens einem kritisch ausgeprägten kognitiven Zustand zusammenfallen, denn es müssen stets mindestens ein Leistungseinbruch *und* mindestens ein kritischer Nutzerzustand vorliegen, damit die Adaptierung wirken kann. Leistungseinbrüche ohne identifizierte kognitive Problemzustände können zwar einen Adaptierungsbedarf signalisieren, könnten jedoch nicht durch Wirkung auf die kognitiven Zustände adressiert werden und bleiben

daher im vorliegenden Konzept unberücksichtigt. Das gilt in erster Annäherung ebenso für Leistungseinbrüche, die extrinsisch verursacht werden, z. B. durch Systemfehler.

3.1.3 Berücksichtigung der Aufgabenpriorität

Angesichts der Tatsache, dass in komplexen Systemen mit hoher Arbeitsbelastung oft zahlreiche Aufgaben zeitgleich auftreten und quasi-parallel ausgeführt werden (Multitasking; vgl. Abschnitt 2.2), sollte nicht jede ausgebliebene Reaktion auf ein Ereignis eine technische Intervention hervorrufen. Dies könnte sonst dazu führen, dass die Aufmerksamkeit des Nutzers auf ein zwar übersehenes, jedoch unwichtiges Ereignis gelenkt wird, obwohl er gerade mit einer Aufgabe hoher Priorität beschäftigt ist. In dem Fall wäre eine Intervention zugunsten einer übersehenen, jedoch gering priorisierten Aufgabe nicht zielführend. Auch hat sich herausgestellt, dass ein Wechsel des Automations-/Assistenzgrads inmitten einer Aufgabe ungünstig ist (z. B. Sherry & Ritter, 2002; Barker et al., 2004).

Daher sollte das System ebenfalls den Status der Aufgabenbearbeitung berücksichtigen und Unterbrechungen in der Aufgabenbearbeitung vermeiden, sofern dies nicht angemessen oder erforderlich ist. Beispielsweise sollte der Nutzer nicht bei der Aufgabenbearbeitung unterbrochen werden, wenn die aktuell von ihm bearbeitete Aufgabe die höchste Priorität hat. Diese Beziehungen werden berücksichtigt, indem die Adaptierung in Abhängigkeit von der Aufgabenpriorität erfolgt. Dazu wird es ermöglicht, Regeln für Adaptierungen zu formulieren, deren Bedingungen die Auslösung von Adaptierungen an die Präsenz oder Absenz von Aufgaben mit gewisser Priorität koppeln.

3.1.4 Ablauf der Dynamischen Adaptierung

Wird ein Leistungseinbruch festgestellt, prüft das Dynamische Adaptierungsmanagement, ob und wie der damit assoziierte diagnostizierte Problemzustand im vorliegenden Kontext am besten adressiert werden kann. In Hinblick auf das MMI-Modell (vgl. Abbildung 17) durchläuft das Dynamische Adaptierungsmanagement dabei fünf Schritte, die in Verbindung mit den Komponenten der Nutzerzustandsdiagnose einen „Closed Loop“ und damit die technische Zustandsregulierung (vgl. Abbildung 18) bilden. Daraus ergibt sich der in Abbildung 22 dargestellte Ablauf, der in den nachfolgenden Abschnitten detailliert beschrieben wird.

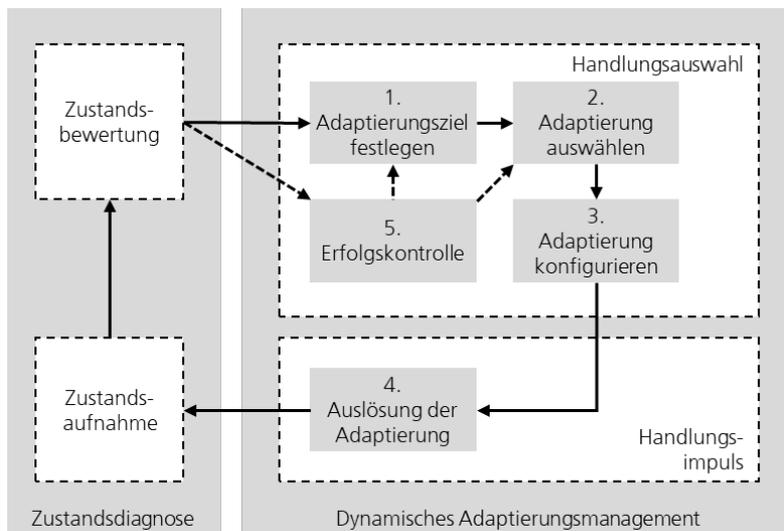


Abbildung 22. Die fünf Schritte des Dynamischen Adaptierungsmanagements im Zusammenspiel mit der RASMUS Zustandsdiagnose

Schritt 1: Ziel der Adaptierung festlegen

Stellt die Nutzerzustandsdiagnose anhand eines Leistungseinbruchs Adaptierungsbedarf fest (siehe Abschnitt 3.1.1), sollte das technische System durch Adaptierung der MMI eingreifen, um den zugrundeliegenden Problemzustand im Sinne eines biokybernetischen Loops zu adressieren. Dieses Vorgehen folgt der Annahme, dass das Symptom „Leistungseinbruch“ durch Beseitigung seiner vermeintlichen „Ursache“ (kritischer Nutzerzustand) ebenfalls beseitigt werden kann, erfordert jedoch eine Berücksichtigung der aktuellen Aufgaben- und Anforderungssituation, wenn unerwünschte Nebeneffekte vermieden werden sollen. Anstatt also einen Problemzustand mit einer vordefinierten Reaktion zu adressieren, muss unter Berücksichtigung der detaillierten Diagnoseergebnisse ein geeignetes Adaptierungsziel ausgewählt werden, das zielgerichtet auf die Ursache des Problems wirkt.

Gemäß den in Abschnitt 3.1.2 formulierten Annahmen wird bei Vorliegen eines Leistungseinbruchs daher zunächst geprüft, welche kritischen Nutzerzustände mit diesem assoziiert sind. Basierend auf dem vorliegenden Kontext der Aufgaben- und Anforderungssituation wird anschließend ein Ziel ausgewählt, das durch die Adaptierung erreicht werden soll und anhand dessen die Zielerreichung später überprüft werden kann (vgl. Abschnitt 2.6.3). Adaptierungsziele sind im vorliegenden Konzept abstrakte Kategorien kognitiver Manipulationen, die beschreiben, wie eine mit dem Leistungseinbruch assoziierte Nutzerzustandsausprägung über eine der Adaptierung zugängliche Einflussgröße derart beeinflusst werden kann, dass sie nicht mehr kritisch ausgeprägt ist.

Beispiele: Tritt ein Leistungseinbruch zusammen mit einem Zustand kritisch hoher Beanspruchung auf, könnte das Ziel möglicherweise darin bestehen, die Belastung zu verringern, um das Problem zu beheben. Fällt der Leistungseinbruch jedoch mit Ermüdung zusammen, wäre eine Verringerung der Belastung kontraproduktiv. In dem Fall könnte ein adäquates Adaptierungsziel sein, die Aktivierung und das Arousal des Bedieners zu erhöhen. Die Ziele sind jedoch nicht nur abhängig vom diagnostizierten Zustand, sondern es kann auch der gleiche Zustand durch verschiedene Ziele adressiert werden. Beispielsweise könnte falsch gerichtete Aufmerksamkeit dadurch korrigiert werden, dass sie aktiv umgelenkt wird. Ein alternatives Ziel wäre die Reduktion potenzieller Ablenkung.

Um zu bestimmen, welches Vorgehen im vorliegenden Kontext (vgl. Abschnitt 2.6.1) und in Bezug auf seine kognitiven Kosten (vgl. Abschnitt 2.6.2) besser geeignet ist, müssen für jedes Adaptierungsziel Regeln erzeugt werden, die definieren, bei welchen Kontextparametern das Ziel angemessen ist. Durch Abgleich dieser Regeln mit dem Diagnoseergebnis wird ein angemessenes Adaptierungsziel ausgewählt. Aus den Regeln ergeben sich außerdem Kriterien, die im Rahmen der Erfolgskontrolle überprüft werden und Auskunft über das Fortbestehen von Adaptierungsbedarf geben (vgl. Abschnitt 2.6.3).

Schritt 2: Geeignete Adaptierung auswählen

Voraussetzung für das Erreichen des ausgewählten Adaptierungsziels ist es, dass eine Adaptierungsstrategie vorhanden ist, die geeignet ist, den kritisch ausgeprägten Zustand zu mitigieren. Da eine Adaptierung, wie zuvor beschrieben, nicht direkt auf den (latenten) Nutzerzustand wirken kann, muss ihre Wirkung über zugängliche und manipulierbare Einflussgrößen erfolgen, die in Wirkzusammenhang mit der zu adressierenden Zustandsausprägung stehen (vgl. Abschnitt 2.6.5). Dabei kann es unterschiedliche Strategien geben, um das ausgewählte Adaptierungsziel zu erreichen. Das Dynamische

Adaptierungsmanagement sieht daher vor, dass aus einem Pool möglicher Adaptierungen je nach Ausprägung der aktuellen Situation eine geeignete Strategie dynamisch ausgewählt wird, die mit dem Adaptierungsziel verknüpft und für den vorliegenden Kontext geeignet ist. Abbildung 23 zeigt schematisch den Zusammenhang zwischen Nutzerzustand, Adaptierungszielen und Adaptierungsstrategien.

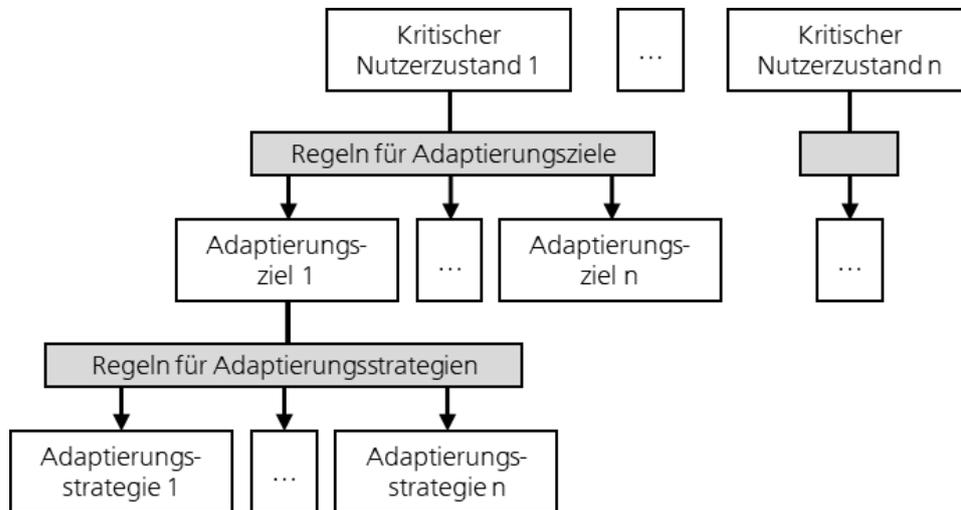


Abbildung 23. Generalisiertes Schema zur Auswahl der passenden Adaptierung

Kandidaten sind zunächst alle Adaptierungen, die in der Lage sind, das Adaptierungsziel zu erreichen. Es ist möglich, dass neben dem Vorhandensein einer manipulierbaren Einflussgröße weitere Bedingungen erfüllt sein müssen, damit eine Strategie wirken kann. Daher werden, analog zum Vorgehen bei mehreren Adaptierungszielen, für den Einsatz jeder Adaptierungsstrategie Voraussetzungen definiert und ein Regelsatz erstellt, der im Rahmen der Auswahl geprüft wird.

Beispiel: Die Nutzerzustandsdiagnose meldet einen Leistungseinbruch beim Nutzer in Verbindung mit einer kritischen Ausprägung des Nutzerzustands „Beanspruchung“. Als Adaptierungsziel für zu hohe Beanspruchung wurde die Verringerung der kognitiven Belastung des Nutzers gewählt. Dieses Ziel kann durch eine adaptive Automationsstrategie erreicht werden, die bestimmte Teilaufgaben übernimmt bis die Leistung wiederhergestellt ist. Die Automationsstrategie würde die Anzahl der zu bearbeitenden Aufgaben reduzieren, um die Belastung zu verringern. Das adaptive Automatisieren von Teilaufgaben ist allerdings nur dann sinnvoll, wenn zu diesem Zeitpunkt eine gewisse Mindestzahl von Aufgaben zu bearbeiten ist und mindestens eine davon automatisiert werden kann. Zudem sollte keine Aufgabe automatisiert werden, die der Nutzer bereits bearbeitet.

Anhand des Regelsatzes bewertet das Adaptierungsmanagement alle Optionen, um deren Eignung unter den vorliegenden Umständen zu ermitteln. Wenn die Voraussetzungen einer Strategie nicht erfüllt sind, wird diese im gegebenen Kontext als ungeeignet angesehen und verworfen. Erfüllen mehrere Strategien die Voraussetzungen, wird zunächst die erste passende ausgewählt. Im Rahmen der Erfolgskontrolle (siehe Schritt 5) kann dann gegebenenfalls auf die übrigen Strategien zurückgegriffen werden, falls die gewählte Strategie nicht erfolgreich war. Da bei multidimensionaler Betrachtung des Nutzerzustands mehrere Zustandsdimensionen kritisch ausgeprägt sein können und die Adaptierungsziele pro kritischer Dimension gewählt

werden kann, ist es auch möglich, dass mehrere Adaptierungen zeitgleich erforderlich sind. Idealerweise sollten die jeweiligen Regelsätze jedoch so definiert sein, dass sich die einzelnen Strategien gemäß ihrem Einsatzzweck voneinander abgrenzen und nur komplementär wirkende Strategien zeitgleich ausgelöst werden können. Beispielsweise kann der Einsatz einer Strategie per Bedingung unterdrückt werden, falls eine inkompatible Strategie bereits aktiv ist. Für die Definition geeigneter Regelsätze zur Adaptierungsauswahl gilt außerdem, dass physiologische Zustandsindikatoren (z. B. Pupillenweite, Herzrate) zwar die Diagnose von Nutzerzuständen unterstützen können, für die bedarfsgerechte Auswahl der Adaptierung aber nicht zweckdienlich sind, da sie lediglich auf Symptome hinweisen aber keine Rückschlüsse auf deren Ursache zulassen. Zur Auswahl geeigneter Adaptierungsstrategien sollten daher vorrangig verhaltensbasierte Maße und Merkmale der Anforderungssituation betrachtet werden, mittels derer der vorliegende Zustand mit dem Aufgabenkontext assoziiert werden kann.

Schritt 3: Adaptierung konfigurieren

Um eine Adaptierungsstrategie weiter an die situativen Gegebenheiten anzupassen, kann sie optional durch zusätzliche Bedingungen um kontextuelle Parameter erweitert werden, mit denen das Adaptierungsmanagement diese abhängig vom Gesamtkontext noch besser an die jeweilige Anforderungssituation anpassen kann.

Beispiel: Die Salienz eines Hinweises, also wie dezent oder intrusiv dieser ist, könnte von der Dringlichkeit der assoziierten Aufgabe abhängig gemacht werden, um die Kosten der Adaptierung (vgl. Abschnitt 2.6.2) soweit wie möglich zu verringern.

Wie eine Adaptierungsstrategie auf Basis von Kontextparametern konfiguriert wird, wird ebenfalls in Regeln definiert. Durch derartige Parametrisierung kann erreicht werden, dass Adaptierungen „abgestuft oder schrittweise in Stufen“ ausgelöst werden (Tollar, 2005, S. 4) und dabei so zurückhaltend wie möglich, aber so intrusiv wie nötig erscheinen, um eine Instabilität des Systems durch schnelle Oszillation von Nutzer- und Adaptierungszuständen zu vermeiden (vgl. Abschnitt 2.6.6). Die dynamische Konfiguration von Adaptierungsstrategien wurde in dieser Arbeit zwar konzeptionell berücksichtigt und in Teilen umgesetzt, jedoch nicht experimentell untersucht, um den nötigen Umfang der Versuchsbedingungen für die Evaluation im Rahmen zu halten.

Schritt 4: Adaptierung auslösen

Nach Auswahl und Konfiguration werden die durchzuführenden Änderungen an der MMI durch das Dynamische Adaptierungsmanagement in einer Nachricht an die Aufgabenumgebung übermittelt, die diese in der Benutzungsschnittstelle aktiviert. Dadurch wird die MMI entsprechend der Adaptierungsstrategie angepasst. Die Maßnahmen können nun im Sinne des Adaptierungsziels auf den kognitiven Problemzustand des Nutzers wirken und zu messbaren Änderungen in physiologischen Parametern, Verhalten oder der Leistung führen (vgl. biokybernetischer Loop; Abbildung 3).

Schritt 5: Erfolgskontrolle

Da die menschliche Reaktion auf die Adaptierung nicht deterministisch ist (vgl. Abschnitt 2.6.7), muss ihre Wirkung nach der Auslösung überprüft werden. Die Wirkung der Adaptierung auf die Aufgabenleistung und die adressierten kognitiven Zustände bestimmt, ob und wie die Adaptierung fortgesetzt wird. Sofern die Anpassung der MMI beobachtbare Veränderungen

verursacht, kann der Effekt der Adaptierung im Rahmen einer Erfolgskontrolle mit dem Adaptierungsziel abgeglichen und bewertet werden.

Die Erfolgskontrolle überprüft die Zielerreichung (vgl. Abschnitt 2.6.3) anhand der im Adaptierungsziel festgelegten Leistungskriterien sowie der Ausprägung der zu beeinflussenden Nutzerzustandsdimension. Wenn das Adaptierungsziel erreicht wurde und die zugrundeliegenden Problemzustände nicht mehr vorhanden sind, ist es wichtig, die Adaptierung zu beenden, da eine Fortsetzung negative Auswirkungen haben kann. Beispielsweise kann eine unangemessene Adaptierung kognitive Ressourcen beanspruchen, eine Aufgabe mit hoher Priorität unterbrechen oder die Aufmerksamkeit des Menschen von dieser weg lenken (vgl. Abschnitte 1.1.2 und 2.6.2).

Aus der Betrachtung von Leistung und Nutzerzustand ergeben sich vier mögliche Überwachungsergebnisse mit unterschiedlichen Auswirkungen auf das weitere Vorgehen (Tabelle 3). In der prototypischen Umsetzung des Adaptierungsmanagements wurden die Maßnahmen für das Fortbestehen des Leistungseinbruchs (rechte Spalte) jedoch noch nicht umgesetzt, da dann für jede Nutzerzustandsdimension mehrere Adaptierungsziele und für jedes Adaptierungsziel mehrere Adaptierungsstrategien hätten entwickelt und evaluiert werden müssen.

Tabelle 3. Mögliche Ergebnisse der Erfolgskontrolle und deren Implikationen

	Leistung wiederhergestellt	Leistungseinbruch besteht fort
Nutzerzustand unkritisch	<p><i>Adaptierung beenden</i></p> <p>Die Adaptierung war erfolgreich. Es besteht kein akuter Adaptierungsbedarf mehr. Sofern es sich um eine kontinuierliche Änderung der Interaktion handelt, kann diese eingestellt werden.</p>	<p><i>Adaptierungsstrategie ändern</i></p> <p>Obwohl die Adaptierung erfolgreich die adressierte Nutzerzustandsdimension beeinflussen konnte, war die Wirkung in Bezug auf die Leistung nicht hinreichend. Die Verwendung einer anderen Adaptierungsstrategie sollte in Betracht gezogen werden.</p>
Nutzerzustand bleibt kritisch	<p><i>Adaptierung beenden</i></p> <p>Obwohl die Adaptierungsstrategie den kritisch ausgeprägten Nutzerzustand nicht beeinflussen konnte, besteht kein Leistungseinbruch mehr, was auf erfolgreiche Selbstadaptierung des Nutzers hindeutet. Sofern es sich um eine kontinuierliche Änderung der Interaktion handelt, kann diese eingestellt werden.</p>	<p><i>Adaptierungsziel ändern</i></p> <p>Die Adaptierungsstrategie zeigt offenbar keine Wirkung auf Nutzerzustand und Leistung. Sofern weitere Nutzerzustandsdimensionen kritisch ausgeprägt sind, kann ein anderes Adaptierungsziel einen besseren Zugang zum Problem ermöglichen. Das Adaptierungsziel sollte daher geändert werden.</p>

3.2 Humanzentrierte Herleitung geeigneter Adaptierungen

Nachdem im vorherigen Abschnitt das Vorgehen des Dynamischen Adaptierungsmanagements beschrieben wurde, beschreibt dieser Abschnitt die Herleitung von Adaptierungsstrategien (**Forschungsfrage 2**). Die Gestaltung solcher Adaptierungen ist auf vielfältige Weise denkbar, wie beispielsweise Fuchs et al. (2007) und Feigh et al. (2012; vgl. Abschnitt 2.4.5) entnommen werden kann, weshalb die Anzahl hinterlegbarer Strategien konzeptionell nicht begrenzt ist. Zur Demonstration der Machbarkeit werden im Folgenden jedoch zunächst sechs komplementäre

Strategien für jene drei Dimensionen kognitiver Problemzustände beispielhaft hergeleitet, die mit der von Schwarz (2019) entworfenen Diagnosekomponente (vgl. Abschnitt 2.5.2) valide detektiert werden können:

- hohe Beanspruchung,
- passive aufgabenbezogene Müdigkeit,
- falsch gerichtete Aufmerksamkeit.

Eine Erläuterung dieser Zustandsdimensionen erfolgte in Abschnitt 2.5.3. Die Strategien werden zunächst abstrahiert dargestellt und kognitionspsychologisch begründet, so dass sie auf unterschiedliche Aufgabenumgebungen angewandt werden können. Die Umsetzung für die in dieser Arbeit gewählten Aufgabenumgebung erfolgt in Abschnitt 3.5.3.

3.2.1 Adaptierung bei hoher mentaler Beanspruchung

Wie bereits in Abschnitt 2.5.3 dargestellt, lässt sich die mentale Beanspruchung in perzeptive, kognitive und psychomotorische Beanspruchungsformen unterteilen. Diese drei Ausprägungen können jeweils durch passende Adaptierungsstrategien unterstützt werden. Welche Kognitionsstufe unterstützt werden soll, wird anhand von Kontextinformationen der Diagnose bestimmt.

Adaptierung bei hoher perzeptiver Beanspruchung

Ist der Operateur auf der perzeptiven Ebene zu stark beansprucht, kann es passieren, dass Informationen schon auf der sensorischen Ebene falsch oder gar nicht verarbeitet werden. Neben einer hohen Beanspruchung kann sich dies zusätzlich in einer falsch gerichteten Aufmerksamkeit äußern. Zur Adressierung solcher perzeptiven Engpässe, kann eine Modifizierung der Aufgabenplanung (vgl. Feigh et al., 2012; Abschnitt 2.4.4) Anwendung finden, die darauf Einfluss nimmt, wann welche Aufgaben bearbeitet werden, um die Aufgabenlast zu verteilen. Eine *Scheduling*-Strategie verzögert die Darstellung geeigneter Aufgaben. Zum einen wird die Aufgabenlast dadurch gleichmäßiger über die Zeit verteilt, so dass der Entstehung von Beanspruchungsspitzen und einer falschen Ausrichtung der Aufmerksamkeit vorgebeugt wird. Zum anderen werden Multitasking-Situationen entschärft und potenzielle Aufgabenwechsel sowie die damit verbundenen kognitiven Wechselkosten (vgl. Abschnitt 2.2) vermieden. Abbildung 24 illustriert die Wirkweise.

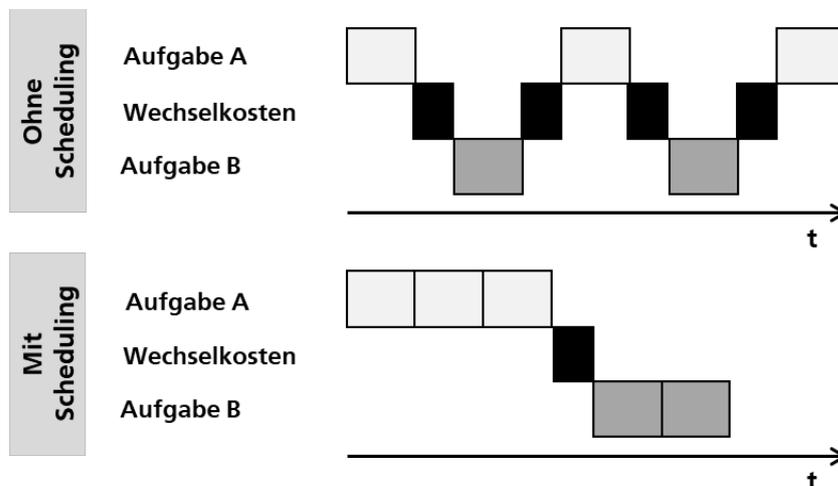


Abbildung 24. Vermeidung von Aufgaben-Wechselkosten durch Scheduling

Die Aufgaben werden unterdrückt, bis wieder Kapazitäten für deren Bearbeitung zur Verfügung stehen. Hierbei ist zu beachten, dass die Verzögerung von Aufgaben negative Auswirkungen auf das Situationsbewusstsein haben kann, da die Verfügbarkeit von Umweltinformationen verringert ist und wichtige Zusammenhänge verloren gehen können (Dorneich et al., 2004). Um mögliche Gefährdungen und die Kosten für das Situationsbewusstsein durch das Scheduling zu minimieren, sollten nur gering priorisierte und wenig zeitkritische Aufgaben verzögert werden.

Adaptierung bei hoher kognitiver Beanspruchung

Wurden die Informationen wahrgenommen, kann es auf der Kognitionsebene zu Problemen bei der Weiterverarbeitung kommen. Die exekutiven Funktionen haben die Aufgabe, neue Informationen zu organisieren, mit vorhandenem Wissen zusammenzuführen, das vorhandene mentale Modell anzupassen und Entscheidungen zu treffen (vgl. auch Abschnitt 2.2.3). Kommt es dabei zu Unstimmigkeiten oder Verzögerungen bei der Entscheidungsfindung, zum Beispiel durch widersprüchliche Informationen oder Lücken im vorhandenen mentalen Modell, kann dies zu Leistungseinbrüchen führen. Mögliche Gründe für eine stockende Entscheidungsfindung können beispielsweise sein, dass das zur Bearbeitung nötige prozedurale Wissen nicht oder nicht schnell genug bereitgestellt wird oder dass die Integration der zu verarbeitenden Information mit dem mentalen Modell nicht funktioniert. Ursächlich können mangelnde Erfahrung oder mentale Blockaden sein.

Eine Reduktion von Komplexität und Mehrdeutigkeit kann die Entscheidungsfindung unterstützen, indem sie die Beanspruchung der exekutiven Funktionen verringert. Dies kann beispielsweise erfolgen, indem die Auswahl aus mehreren Interpretationen einer Situation oder aus mehreren Handlungsoptionen unterstützt wird. Dazu können gemäß Feigh et al. (2012) Qualität, Quantität oder Abstraktionsgrad der dargestellten Inhalte modifiziert werden (vgl. Abschnitt 2.4.4). Nach Kirsh (2000) können Bediener mit *kontext-sensitiver Hilfestellung* Vorgehensweisen identifizieren, die sie sonst möglicherweise nicht bemerkt hätten. Fuchs et al. (2007) beschreiben „Context-Sensitive Help“ als Strategie, die den Bedarf für die Lokalisierung von Informationen eliminiert und physische oder kognitive Aufforderungscharakteristiken (engl.: *affordances*) dort platziert, wo der Nutzer sie benötigt. Konkret kann eine verzögerte Entscheidungsfindung unterstützt werden, indem das technische System den Nutzer durch Anzeige der erforderlichen Arbeitsschritte unterstützt, um die Blockade oder Erfahrungslücke zu überwinden. Im Dynamischen Adaptierungsmanagement kann die Strategie *Context-Sensitive Help* so zur Adressierung von Engpässen der exekutiven Funktionen dienen.

Adaptierung bei hoher psychomotorischer Beanspruchung

Bei einem Engpass der psychomotorischen Ressourcen aufgrund einer hohen Beanspruchung auf der Ausführungsebene kann angenommen werden, dass der Nutzer grundsätzlich zwar weiß, was er zu tun hat, bei der Ausführung aber mit der hohen Anzahl der Aufgaben nicht Schritt halten kann. In diesem Fall ist eine Reduktion der psychomotorischen Belastung zielführend. Die Aufgabenlast kann durch eine adaptive Modifizierung der Aufgabenzuweisung (vgl. Abschnitt 2.4.4) reduziert werden, die meist durch Regulierung des Automationsgrads vorgenommen wird. Durch eine *Automationsstrategie* würden vormals menschliche Aufgaben vom technischen System durchgeführt und dadurch die Aufgabenbelastung des Menschen reduziert. Dadurch wird das Ziel verfolgt, die Beanspruchung des Operators auf einem optimalen Niveau zu halten (Feigh et al., 2012). Automation kann also dazu dienen, die Aufgabenlast bei Engpässen der psychomotorischen Ressourcen zu reduzieren.

Bei Nutzung einer Automationsstrategie ändert sich der Automationsgrad, d.h. der Umfang der menschlichen Involvement in die Aufgabe. Während dies bei hoher oder angemessener Beanspruchung des Operateurs oft zielführend ist, kann Automation bei niedriger Beanspruchung ungewünschte Effekte hervorrufen, wenn sie zu Langeweile oder fehlender Einbindung in die Aufgabe führt (Kaber et al., 2001). Oft wird in der Literatur zudem kritisiert, dass die Reduktion des Operateurs auf reine Überwachungsaufgaben zu Motivationsverlust, Problemen mit dem Situationsbewusstsein oder Vigilanzminderung führt (vgl. Bainbridge, 1983; Parasuraman et al., 1992). Daraufhin entstand der Ansatz der Adaptiven Automation (z. B. Rouse, 1988; Scerbo, 1996, 2006), dessen Ziel es war, den Menschen „im Loop“ zu halten und Automation nur bei Bedarf zu aktivieren (vgl. auch Abschnitte 2.3 und 2.4.2).

Im Regelfall soll der Mensch also für die Bearbeitung der Aufgabe verantwortlich bleiben. Nur im Falle eines psychomotorischen Engpasses sollten niedrig priorisierte Aufgaben durch das technische System übernommen werden, um die Aufgabenlast zu reduzieren und kognitive Ressourcen für die Bearbeitung hoch priorisierter Aufgaben freizumachen. Die Beschränkung der Automation auf unkritische Aufgaben basiert auf den Erkenntnissen von Arciszewski, de Greef & van Delft (2009). Danach sollten sicherheitskritische Aufgaben beim Menschen verbleiben, um dessen Situationsbewusstsein aufrechtzuerhalten. Durch Übernahme der gering priorisierten Aufgaben durch die Technik werden kognitive Ressourcen frei, die zur Durchführung höher priorisierter Aufgaben genutzt werden können. Während sich in der Literatur mehrere Modelle mit bis zu zwölf Automationsgraden finden (vgl. Review in Scerbo, 1996), wurde für die vorliegende Arbeit zunächst eine einfache Form der Automation gewählt, bei der entweder der Mensch oder die Technik die betreffenden Aufgaben vollständig übernehmen.

In zukünftigen Ausbaustufen dieser Adaptierungsstrategie wären eine dynamische Auswahl der zu automatisierenden Aufgabe sowie die dynamische Auswahl der Automationsstufe im Sinne einer adaptiven Automation denkbar.

3.2.2 Adaptierung bei falsch gerichteter Aufmerksamkeit

Adaptierungsstrategien für falsch gerichtete Aufmerksamkeit können auf Basis des SEEV-Modells von Wickens & McCarley (2008; vgl. Abschnitt 2.2) hergeleitet werden. Demnach stellen die Salienz und die für die Informationsaufnahme benötigte Anstrengung Faktoren dar, die extern durch die Umwelt gesteuert sind und somit bottom-up die Aufmerksamkeit beeinflussen. Der externe Charakter dieser Komponenten ermöglicht es, diese zur Konstruktion von Adaptierungsstrategien heranzuziehen. Ein technisches System könnte Einfluss auf die Eigenschaften von Stimuli nehmen, um (bottom-up) die Salienz von Informationen und die für die Wahrnehmung benötigte Anstrengung derart zu manipulieren, dass sie mit höherer Wahrscheinlichkeit den Filter passieren. Dagegen sind die Faktoren Erwartung und Wert einem mentalen Modell inhärent, das der Informationsverarbeitung zugrunde liegt. Sie steuern die Aufmerksamkeit somit in einem Top-down-Prozess von innen. Diese Operateur-internen Prozesse sind der Adaptierung nicht direkt zugänglich. Folglich werden Adaptierungen durch Erhöhung der Salienz und durch Verringerung der benötigten Anstrengung konzipiert.

Adaptierung durch Erhöhung der Salienz

Es wird davon ausgegangen, dass saliente Informationen schneller und mit höherer Wahrscheinlichkeit wahrgenommen werden als weniger saliente Informationen (vgl. Abschnitt 2.1). Die Präsentation aufmerksamkeitsbezogener Hinweisreize (engl.: *cueing*) kann

die Aufmerksamkeit des Nutzers durch Erweiterungen der Informationsdarstellung manipulieren (Posner, 1980). Durch explizite und saliente Hinweise auf wichtige Informationsobjekte kann die Aufmerksamkeit gezielt ausgerichtet werden, z. B. um Tunnelblickeffekte (*attentional tunneling* – Wickens, 2005; Wickens & Alexander, 2009; *attentional spotlight effect* – Norman, 1968; Posner, Snyder & Davidson, 1980) aufzulösen. Durch solche *Interface Features* (vgl. Feigh et al., 2012, Abschnitt 2.4.4) kann die Wahrnehmung wichtiger Informationen aktiv unterstützt werden. Cueing ist dabei nicht auf die visuelle Modalität beschränkt, sondern kann auch auditiv, taktil oder multimodal sowie in verschiedenen Intrusionsstufen implementiert werden, was eine situationsabhängige Anpassung im Sinne einer dynamischen Konfiguration ermöglicht.

Sofern das Adaptierungsziel die Wahrnehmung von übersehenen Ereignissen oder Informationsobjekten mit hoher Priorität ist, stellt das Cueing eine einfache, aber effektive Strategie dar, da es die dargestellten Informationen nicht eliminiert oder beeinflusst und die Datenintegrität daher gewährleistet ist. So kann das Dynamische Adaptierungsmanagement die Salienz unbeachteter zeitkritischer Informationsobjekte durch einen Hinweis (engl.: *cue*) temporär erhöhen, wenn der Operateur diese nicht beachtet. Dabei bleiben alle angezeigten Informationen verfügbar und der Hinweis kann ohne weitere Implikationen deaktiviert werden, sobald das übersehene Ereignis oder Objekt wahrgenommen oder darauf reagiert wird.

Die aktive Umlenkung der Aufmerksamkeit durch Cueing kann jedoch zu spontanen Aufgabenunterbrechungen führen und dadurch das Situationsbewusstsein beeinträchtigen, was insbesondere bei komplexen oder kognitiv anspruchsvollen Aufgaben ungewünschte Effekte auf Leistung und Beanspruchung zur Folge haben kann (Gopher et al., 2000; McFarlane, 2002). Wickens et al. (1999) beschreiben zudem, dass Operateure die Verlässlichkeit von Cues oft überschätzen und durch Cueing gelenkte Aufmerksamkeit häufig überfokussiert ist, so dass andere wichtige Informationen vernachlässigt werden. Eine aktive Lenkung der Aufmerksamkeit sollte daher mit Bedacht eingesetzt werden und nur erfolgen, wenn der Nutzen die potenziellen Kosten überwiegt, beispielsweise bei wichtigen, zeitkritischen Aufgaben, deren Nichtbeachtung so schwerwiegende Konsequenzen hat, dass intrusive Maßnahmen gerechtfertigt sind.

Adaptierung durch Verringerung der benötigten Anstrengung

Ist die Aufmerksamkeit falsch gerichtet, während keine dringlichen Aufgaben vorhanden sind, ist es ausreichend, wenn das Dynamische Adaptierungsmanagement auf weniger intrusive Maßnahmen zur Aufmerksamkeitslenkung zurückgreift. Dies kann gemäß SEEV-Modell über die Verringerung der benötigten Anstrengung zur Informationsaufnahme geschehen. Die Anstrengung lässt sich operationalisieren als die Zeit, die benötigt wird, um eine gewünschte Information zu finden. Ist die Anstrengung hoch (z. B. aufgrund vieler Informationsobjekte auf dem Display), hat sie eine inhibitorische Wirkung auf die Aufmerksamkeit. Umgekehrt kann eine Verringerung der Anstrengung die Aufmerksamkeit begünstigen.

Eine Möglichkeit, die benötigte Anstrengung zur Aufmerksamkeitslenkung zu reduzieren, ist, die Menge oder Komplexität ablenkender Informationen zu begrenzen, um potenzielle Ablenkung zu verringern. Eine *Decluttering*-Strategie (z. B. Kroft & Wickens, 2001) reduziert die Salienz einiger Objekte gegenüber anderen und stellt somit eine Modifikation des Inhalts dar, die nach der Taxonomie von Feigh et al. (2012) in Bezug auf Qualität, Quantität oder Abstraktionsgrad erfolgen kann (vgl. Abschnitt 2.4.4). Als Adaptierungsstrategie kann Decluttering die Filtermechanismen des Operateurs unterstützen und so die zur Informationsaufnahme benötigte Anstrengung reduzieren. Anders als Cueing ermöglicht das Decluttering präattentive visuelle Informationsverarbeitung auf der sensorischen Ebene und

kann auch auf Objektgruppen angewandt werden, wodurch insbesondere bei Such- und Überwachungsaufgaben die kognitive Anstrengung verringert und Reaktionszeiten verbessert werden können (Yeh & Wickens, 2001).

Auch Decluttering ist jedoch mit Vorsicht einzusetzen, denn dynamische Filtermechanismen können zu übersteigertem Vertrauen in die Automation und anderen negativen automationsbezogenen Effekten führen (St. John et al., 2005). Außerdem kann die Strategie zu Beeinträchtigungen des Situationsbewusstseins und der Leistung führen, falls benötigte Informationen vom Decluttering betroffen sind (Yeh & Wickens, 2001). Wie beim Scheduling (vgl. Abschnitt 3.3.1) wird zudem die Verfügbarkeit von Umweltinformationen verringert und wichtige Zusammenhänge können verloren gehen (Dorneich et al., 2004). Die Strategie sollte daher mit Sorgfalt umgesetzt werden. Darüber hinaus müssen Exit-Strategien für diese Adaptierungen entwickelt und implementiert werden, welche die betroffenen Informationen wieder regulär darstellen, ohne den Benutzer plötzlich zu überwältigen.

3.2.3 Adaptierung bei passiver aufgabenbezogener Müdigkeit

Passive aufgabenbezogene Müdigkeit kann zu Leistungseinbrüchen durch Passivität führen – der Nutzer verarbeitet ihm dargebotene Informationen möglicherweise nicht mehr adäquat, da er „abschaltet“, was sich am ehesten durch ein stark abgesunkenes Arousal oder Ablenkung äußert. Dadurch erhöhen sich Wahrnehmungsfehler und Reaktionszeiten.

Ein mögliches Ziel ist, das Arousal zu erhöhen, um die Aktivität des Nutzers zu fördern. Bei Müdigkeit und monotonen Aufgaben können laut Hockey (1970) auditive Stimuli positiv anregend wirken. In einer vorwiegend visuellen Umgebung könnte das technische System mit einem auditiven Hinweis (*auditory cueing*) also in einer weniger beanspruchten Modalität auf das Vorhandensein einer unbeachteten Aufgabe hinweisen, wenn ein visueller Hinweis unter Umständen nicht wahrgenommen würde. Der zusätzliche Einsatz des auditiven Kanals (vgl. *modification of interaction* nach Feigh et al. 2012, vgl. Abschnitt 2.4.4) in einer visuellen Umgebung begünstigt dabei einerseits die Wahrnehmung und kann andererseits die Passivität des Nutzers durch Erhöhung des Arousals adressieren.

3.2.4 Übersicht der entworfenen Adaptierungsmechanismen

Zur Linderung der drei betrachteten kritischen Nutzerzustände wurden sechs Adaptierungsstrategien hergeleitet, aus denen das Dynamische Adaptierungsmanagement je nach Zustandsausprägung und Nutzungskontext eine passende auswählen kann. Tabelle 4 stellt die erarbeiteten Strategien und ihre Einsatzzwecke zusammenfassend in einer Übersicht dar. In Abschnitt 3.5 werden diese dann in einer Aufgabenumgebung konkretisiert und in ein Adaptierungsschema überführt.

Tabelle 4. Übersicht der Adaptierungsstrategien

Strategie	Adressierte Zustandsdimension	Interventionsvariable	Wirkweise
Context-Sensitive Help	Kritisch hohe Beanspruchung durch Engpass im Arbeitsgedächtnis bzw. den exekutiven Funktionen	<i>Cognitive Affordance</i> der Aufgabe	Bedarfsorientierte Bereitstellung aufgabenspezifischer Informationen
Automation	Kritisch hohe Beanspruchung durch (psychomotorischen) Reaktionsengpass	Anzahl simultaner Aufgaben	Verringerung der Aufgabenzahl durch Übertragung von Aufgaben an das technische System
Scheduling	Kritisch hohe Beanspruchung durch perzeptiven Engpass Aufmerksamkeitsengpass durch stark verteilte Aufmerksamkeit in Multitasking-Situationen	Anzahl simultaner Aufgaben	Sequenzierung simultaner Aufgaben Zurückhalten von Aufgaben bis zu einem geeigneteren Zeitpunkt
Visual Cueing	Nichtwahrnehmung dringlicher Informationen (Aufmerksamkeitsengpass)	Fokus der Aufmerksamkeit	Lenkung der Aufmerksamkeit durch Erhöhung der Salienz dringlicher Informationen mittels aufmerksamkeitsbindender Hinweise
Decluttering	Falsch gerichtete Aufmerksamkeit (Aufmerksamkeitsengpass) in unkritischen Fällen	Salienz der Aufgabe	Verringerung der Ablenkung durch Reduktion der Menge/Komplexität der dargestellten Information
Auditory Cueing	Vigilanzminderung (perzeptiver Engpass) aufgrund von passiver aufgabenbezogener Müdigkeit	Arousal	Erhöhung des Arousals durch multimodalen Hinweis auf das Vorhandensein einer zu bearbeitenden Aufgabe

3.3 Experteninterview

Viele der in Abschnitt 2.4 betrachteten bisherigen Ansätze adaptiver MMI führten zu beachtlichen experimentellen Ergebnissen, konnten sich jedoch trotzdem nicht in der Praxis etablieren, da sie nur in der kontrollierbaren Künstlichkeit der Laborumgebung überzeugen konnten (vgl. Abschnitt 2.6.8). Aufgrund dieser Erfahrungen sollte das Dynamische Adaptierungsmanagement in einer möglichst praxisnahen Aufgabenumgebung auf Funktion und Wirksamkeit untersucht und validiert werden.

Aufgrund seines generischen Charakters kann das Dynamische Adaptierungsmanagement für verschiedene Anwendungsfälle zugeschnitten werden. Die Operationalisierung des entwickelten Konzepts zur Adaptiven MMI war in einer realitätsnahen Aufgabenumgebung aus dem Kontext Luftverteidigung (Anti Air Warfare) geplant. Um vor Auswahl und Implementierung der Experimentalumgebung (siehe Abschnitt 3.4) Einsichten in diese Domäne hinsichtlich der mentalen Herausforderungen und relevanter Einflussfaktoren auf die Leistung zu erlangen, wurden semistrukturierte Experteninterviews durchgeführt, deren Antwort qualitativ ausgewertet wurden, um Implikationen für das Vorgehen im empirischen Teil der Arbeit abzuleiten.

3.3.1 Methode

Stichprobe

Als Experten befragt wurden drei Bundeswehr-Offiziere (alle männlich) des Einsatzführungsbereichs 2 (EinsFüBer2) im *Control and Reporting Center* (CRC) Erndtebrück im Rahmen eines Gruppeninterviews. Aus Datenschutzgründen wurden neben Dienstgrad, Namen und Rolle keine personenbezogenen Daten erhoben. Ein Soldat hatte den Dienstgrad Hauptmann (gehobener Dienst), zwei den Dienstgrad Major (höherer Dienst). Alle drei waren regulär im Ausbildungsbetrieb eingesetzt, zeitweise aber auch im operativen Betrieb tätig. Ein Teilnehmer nahm aus Zeitgründen nicht bis zum Ende der Befragung teil.

Fragebogen

Wesentliches Ziel der Befragung war es, Erkenntnisse zu erlangen, welche Nutzerzustände und welche Arten von Leistungseinbrüchen bei der militärischen Luftraumüberwachung in der Praxis auftreten und wie diese durch Adaptierung der MMI adressiert werden könnten. Zudem sollte auch der Frage nachgegangen werden, durch welche Faktoren relevante Nutzerzustände in der Praxis verursacht oder beeinflusst werden können. Weiterhin sollten Ideen für Methoden zur Induktion und Modulation des Nutzerzustands in zukünftigen Experimenten abgeleitet und praxisnahe Hinweise für die Gestaltung adaptiver MMI in einem operativen Kontext gewonnen werden. Neben diesen Aspekten enthielt die Frageliste auch Fragen aus einem anderen Projektkontext. Insgesamt waren folgende Fragen enthalten:

- Vorhandene Mensch-Maschine-Systeme
 - o Welche komplexen (Mensch-Maschine-) Systeme gibt es [im CRC]?
 - o Wofür werden diese jeweils verwendet?
 - o Was sind die besonderen Herausforderungen im Umgang mit dem System?
- Datenerfassung
 - o Welche Daten werden aufgezeichnet? Wie (z. B. Beobachtung, Sensorik)?
 - o Wie werden die Daten ausgewertet und miteinander verknüpft?
 - o Wie werden daraus Schlussfolgerungen gezogen?
- Leistung
 - o (Wie) wird Leistung überwacht und bewertet?
 - o Wie werden Fehler identifiziert?
 - o Wie werden Fehlerursachen ergründet?
 - o Welche der folgenden Einflussfaktoren auf die Leistungsfähigkeit sind relevant/werden erfasst? Wie werden diese ausgewertet und berücksichtigt? [Müdigkeit, Aufmerksamkeit/Ablenkung, Beanspruchung (körperlich, geistig), Motivation, Emotionaler Zustand, Langeweile, Situationsbewusstsein, Umgebungsfaktoren, zeitliche Einflüsse]
- Team-Aspekte
 - o Wie wird die Gruppenleistung bewertet?
 - o Inwieweit fließen Einzelleistungen mit ein?
- Ausbildungssysteme
 - o Gibt es Szenarien mit unterschiedlichen Schwierigkeitsgraden?
 - o Werden die Szenarien dynamisch an die Leistung angepasst? Wenn ja, wie findet diese Anpassung statt?
- Verbesserungsbedarf
 - o Gibt es bekannte Fähigkeitslücken bzgl. Datenerfassung, Auswertung, Entscheidungsfindung oder Mensch-Maschine-Interaktion?
 - o Sehen Sie sonstigen Verbesserungsbedarf bzgl. Datenerfassung, Auswertung, Entscheidungsfindung oder Mensch-Maschine-Interaktion?

Ablauf

Nach einer Vorstellungsrunde wurden der Projekthintergrund und Informationen zur Geheimhaltung erläutert. Das Vorgehen des semistrukturierten Interviews wurde erläutert und die Teilnehmer aufgeklärt, dass die Teilnahme freiwillig war, Antworten verweigert und die Interviews jederzeit abgebrochen werden konnten. Der vorbereitete Fragenkatalog wurde dann wechselnd von den beiden Interviewern durchgegangen, wobei häufig vertiefende Fragen ergänzt wurden und auch Sprünge zwischen den Fragen erfolgten, wenn die jeweiligen Themen zur Sprache kamen. Teilweise entwickelten sich offene Diskussionen, aus denen viele Hintergrundinformationen geschöpft werden konnten. Beide Interviewer protokollierten die Sitzung mit einem Laptop-Computer in einer MS-Word-Version des Fragebogens. Das Interview dauerte rund 2 Stunden.

Datenaufbereitung und Analyse

Aufgrund der digitalen Erfassung entfiel eine Transkription. Die Protokolle beider Interviewer wurden konsolidiert und interpretativ hinsichtlich der Zielsetzung ausgewertet.

3.3.2 Mentale Herausforderungen bei der Luftraumüberwachung

Die Ausführungen der befragten Experten weisen darauf hin, dass alle drei aktuell in der RASMUS-Diagnose implementierten und in dieser Arbeit betrachteten Zustandsdimensionen (Beanspruchung, Aufmerksamkeitsverteilung, passive aufgabenbezogene Müdigkeit; vgl. Abschnitt 2.5.3) bei der Luftraumüberwachung relevant sind. Insbesondere wurden die folgenden mentalen Herausforderungen genannt:

Stress

Als besonders relevant bei der Luftraumüberwachung wurde „Stress“ genannt. Nach Aussagen der Anwender entstehe Stress, wenn viele Aufgaben mit hoher Dringlichkeit in zu kurzer Zeit durchgeführt werden müssen. Stress entstehe auch, wenn der Controller sich ein Situationsbewusstsein verschafft und einen Plan zurechtgelegt hat, dieser aber durch Abweichungen von Erwartungen (z. B. Luftnotfall oder plötzliches Auftreten einer Bedrohung) überarbeitet werden muss. Auf der Verhaltensebene kann zeitlicher Stress sich durch hohe Beanspruchung und unproduktive Selbstadaptierung bemerkbar machen, indem Aufgaben falsch priorisiert oder gar ignoriert werden (vgl. *attentional tunneling*; z. B. Wickens, 2005; Wickens & Alexander, 2009). Unter Stress steigt laut Anwendern auch die Anfälligkeit für Fehler wie das Verwechseln von Luftfahrzeugen und Richtungen, Ablesen von falschen Zahlen oder das Vergessen von Prozessschritten. Die Angaben der Anwender decken sich mit den Ausführungen von Staal (2004), der als Auswirkung von Stress anführt, dass sich der Fokus der Aufmerksamkeit einengt und so die Informationsverarbeitungsprozesse, u. a. die Entscheidungsfindung, beeinträchtigt werden (vgl. Abschnitt 2.2, Aufmerksamkeitsengpass).

Überforderung

Die Anwender gaben auch an, dass in komplexen Lagen eine Überforderung durch hohe Beanspruchung auftreten kann, die weniger der zeitlichen Dringlichkeit als der Menge der zu verarbeitenden Informationen geschuldet ist. Auch hier werden häufig Verwechslungen (z. B. von Richtungen oder Kontakten) beobachtet, die das Situationsbewusstsein beeinträchtigen können und sich durch Fehlkommunikation weiter aufschaukeln können. Im Rahmen einer produktiven Selbstregulierung werden Bewältigungsstrategien zur Verringerung der Komplexität berichtet.

Ermüdung

Bei Aufgaben, in denen Daueraufmerksamkeit gefordert ist, kann es zu aufgabenbezogener Ermüdung kommen. Diese äußert sich in einer erhöhten Fehleranfälligkeit und kann auch zu vermindertem Situationsbewusstsein führen. Nach Angaben der Anwender spüren erfahrene Controller diese Effekte der Vigilanzminderung nach 1 bis 1.5 Stunden, Neulinge oft bereits nach 20 Minuten. Laut Angaben der Ausbilder ist Daueraufmerksamkeit zu einem gewissen Grad trainierbar und wird auch in der Ausbildung berücksichtigt.

Falsche Aufmerksamkeitsverteilung

Aus den Charakterisierungen von Stress, Überforderung und Ermüdung geht hervor, dass diese oftmals auch die Aufmerksamkeit beeinträchtigen. Insofern ist die Aufmerksamkeit ebenfalls als relevante Zustandsdimension zu nennen. Diese kann sich nach Angaben der Anwender in einer falschen Priorisierung oder dem Übersehen/Ignorieren von Aufgaben äußern. Auch eine zu starke Fokussierung auf eine Aufgabe („Tunnelblick“) ist möglich.

3.3.3 Relevante Einflussfaktoren bei der Luftraumüberwachung

Nach Angaben der Befragten könne sich die Dauer der Aufgabenbearbeitung (Time on Task) negativ auf die Leistungsfähigkeit auswirken. Besonders negative Wirkung könne dieser Faktor bei Müdigkeit oder Monotonie der Aufgabe entfalten. Abwechslungsreiche Aufgaben hingegen wirkten sich günstig auf die Durchhaltefähigkeit aus. Time on Task-Effekte träten bei Novizen deutlich schneller auf als bei Experten. Dementsprechend wurde von den Experten zu einer längeren Versuchsdauer (20-40 Minuten) geraten, in der insbesondere auch längere monotone Phasen vorkommen.

Aufgabenbelastung, d.h. die Belastung durch die Aufgabe selbst, könne sich ebenfalls negativ auf die Leistung auswirken, insbesondere bei hoher Kontaktdichte oder bei einer unvorteilhaften Verteilung der Kontakte. Auch geringe Erfahrung des Controllers würde eine hohe Aufgabenbelastung hervorrufen. Entsprechend kann die Aufgabenbelastung in einer Experimentalumgebung durch die Anzahl der auftretenden Tracks variiert werden.

In Übereinstimmung mit Literaturbefunden (z. B. Hockey, 1970; 1986) wurde ausgesagt, dass die negative Wirkung von Störgeräuschen besonders schwerwiegend bei Aufgaben sei, die Konzentration erfordern, oder wenn relevante Informationen auditiv präsentiert werden. Darüber hinaus sei auch sozialer Druck relevant, der dadurch entstehe, sich in der Truppe beweisen zu wollen. Gerade Neuzugänge seien oft aufgeregt und setzten sich selbst unter Druck. Die Leistung könne auch dadurch beeinflusst werden, dass Controller sich beobachtet und bewertet fühlen – sowohl durch Kollegen als auch durch Vorgesetzte.

Als kritischer Einflussfaktor für die Verteilung der Aufmerksamkeit wurden weiterhin besondere Ereignisse genannt, die den Aufbau von Situationsbewusstsein erschweren oder Aufmerksamkeit binden. Als Beispiele wurden Luftnotfälle und Änderungen in der Mission genannt, die sehr kurzfristig während der Durchführung der Mission auftreten können. Besonders schwerwiegend sei die Wirkung solcher Ereignisse bei hoher Belastung und bei Controllern mit wenig Erfahrung. Bei Müdigkeit oder Monotonie könnten solche Ereignisse allerdings auch eine willkommene Abwechslung darstellen, die sich positiv auswirkt.

3.3.4 Implikationen für die weitere Arbeit

In den Ausführungen der Anwender lassen sich Bezüge zu den kognitiven Engpässen erkennen, die in Abschnitt 2.2 diskutiert wurden:

- Der berichtete Einfluss von Stress auf das Situationsbewusstsein und die Fehlerrate legt nahe, dass WM-Kapazitätsengpässe und exekutive Engpässe, aber auch Aufmerksamkeitsengpässe experimentell durch die Menge und die Dringlichkeit der zu verarbeitenden Informationen hervorgerufen werden können. Dringliche Aufgaben, oder solche, die eine Neubewertung der Situation erfordern, könnten daher zur Induktion der genannten Engpässe genutzt werden.
- Perzeptive Engpässe, aber auch Reaktionsengpässe entstehen durch Überforderung in komplexen Lagen durch die Menge der zu verarbeitenden Informationen. Dieser Aspekt kann im Experimentaldesign genutzt werden, um perzeptive Engpässe zu erzeugen, indem die Menge der Aufgaben moduliert wird.
- Aufgabenbezogene Ermüdung führt zu Aufmerksamkeitsengpässen aufgrund von Vigilanzminderung. Diese könnte im Rahmen von Experimenten durch eine lange Dauer der Aufgabenbearbeitung induziert werden.

Zur Gestaltung empirischer Untersuchungen können insbesondere die genannten Einflussfaktoren herangezogen werden, um die Induktion bestimmter Nutzerzustände zu unterstützen. Tabelle 5 zeigt eine Übersicht der nach Expertenmeinung relevanten Einflussfaktoren sowie mögliche Implikationen für das Experimentaldesign.

Tabelle 5. Relevante Einflussfaktoren

Einflussfaktor	Implikationen
Time on Task	<ul style="list-style-type: none"> - kann aufgabenbezogene Müdigkeit erzeugen - kann (insb. in Verbindung mit monotonen Aufgaben) Vigilanzminderung begünstigen
Task Load	<ul style="list-style-type: none"> - kann durch die Anzahl der Aufgaben moduliert werden - kann die Leistung beeinträchtigen
Hintergrundgeräusche	<ul style="list-style-type: none"> - können die Aufmerksamkeit beeinträchtigen - können andere auditive Informationen überlagern
Besondere oder kurzfristig auftretende Ereignisse	<ul style="list-style-type: none"> - können den Aufbau oder die Erhaltung von Situationsbewusstsein erschweren - können Aufmerksamkeit binden
Sozialer Druck	(nicht relevant, da im Rahmen der Arbeit keine Teamuntersuchungen geplant sind)
Kooperation	

3.4 Experimenteller Prototyp und Experimentalaufgabe

Um das abstrakt konzipierte Dynamische Adaptierungsmanagement und die Adaptierungsstrategien in einer relevanten Aufgabenumgebung zu operationalisieren (vgl.

Forschungsfrage 3), wurde der im Folgenden beschriebene Apparat herangezogen. Dieser Hardware-Aufbau wurde im Rahmen der gemeinsamen Vorarbeiten entwickelt (vgl. Abschnitt 2.5 sowie Fuchs, Schwarz & Werger, 2016) und entspricht aus Kompatibilitätsgründen auch weitgehend dem von Schwarz (2019) zur Konzeption und Validierung der RASMUS

Nutzerzustandsdiagnose genutzten Apparatus. Im Verlauf der vorliegenden Arbeit wurde dieser softwareseitig verändert, um die adaptiven Funktionalitäten zu ergänzen und Erkenntnisse aus den experimentellen Untersuchungen zu berücksichtigen. Gemäß den Anforderungen des jeweiligen Experiments wurden Aufgabendichte, Szenarien und die verwendeten Adaptierungsstrategien im Verlauf des empirischen Teils der Arbeit verändert. Diese Abweichungen vom nachfolgend dargestellten Aufbau werden in den Apparatus-Abschnitten jedes Experiments separat beschrieben.

3.4.1 Technischer Apparat zur Realisierung Adaptiver MMI

Der verwendete Hardware-Aufbau (Abbildung 25) bestand aus zwei Computern und deren Peripherie sowie den Sensoren. Ein Computer diente der Darstellung der Aufgabenumgebung. Hier wurde den Probanden eine bereits vorhandene Benutzungsschnittstelle zur simulierten Luftzielbearbeitung dargeboten (siehe Abbildung 30, Abschnitt 3.4.3), die von der Simulationssoftware *Presagis Stage* (www.presagis.com/en/product/stage/) Szenarien empfängt. Die Aufgabenumgebung wurde dahingehend erweitert, dass sie Nachrichten vom Dynamischen Adaptierungsmanagement empfangen und die entworfenen Adaptierungen vor- und zurücknehmen konnte. Der zweite Computer erlaubte dem Versuchsleiter die Steuerung und Beobachtung der Experimente. Ein *Epiphan DVI2USB3.0* Video-Grabber wurde eingesetzt, um das Bild des Probanden-PC auf dem Versuchsleiter-PC darzustellen. Hier liefen zudem die Programme zum Abspielen der Simulation, zur Erfassung und Synchronisierung der verschiedenen Datenströme sowie die Softwarekomponenten für die multifaktorielle Nutzerzustandsdiagnose und das Dynamische Adaptierungsmanagement.

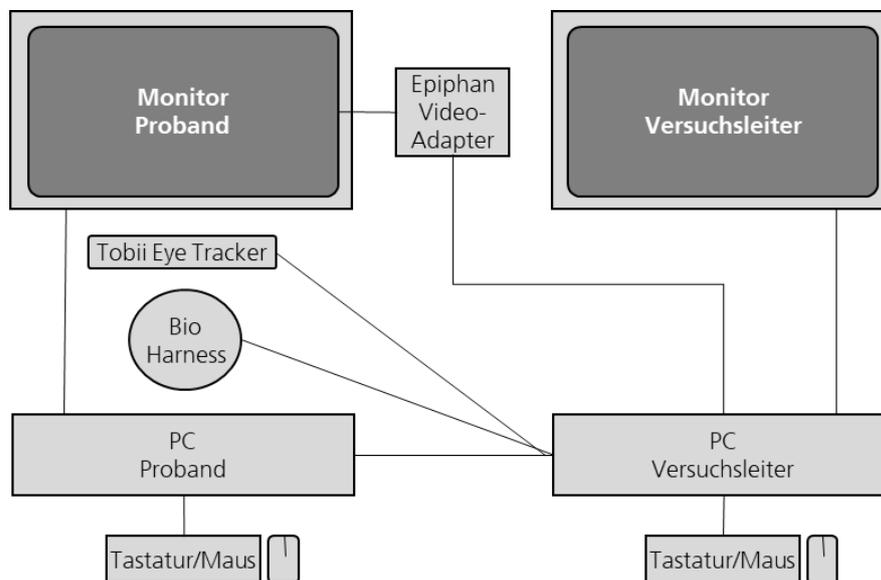


Abbildung 25. Hardware-Aufbau der Experimentalumgebung

Zur Erfassung der physiologischen Daten wurden außerdem ein Eye Tracker und ein Multisensor-Brustgurt angebunden. Der verwendete Eye Tracker *Tobii X3-120* (Abbildung 26) ist ein monitorbasiertes Modell, das unter dem Bildschirm positioniert wird und okulomotorische Maße mit einer Abtastrate von 120 Hz erfasst. Die validierte Version der multifaktoriellen Nutzerzustandsdiagnose verwendet die Pupillenweite als Arousalmaß.

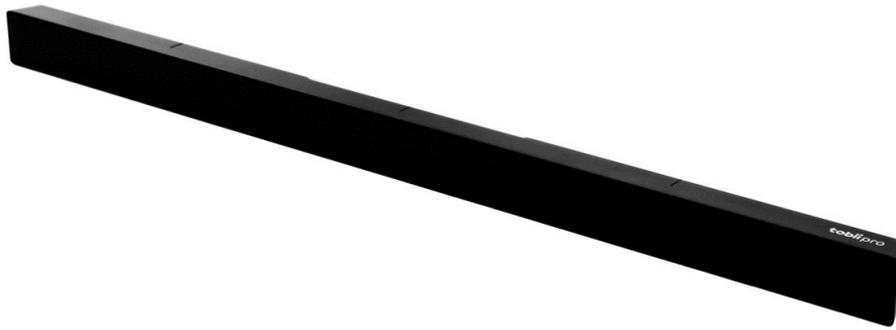


Abbildung 26. Eye Tracker Tobii Pro X3-120 zur Montage unter dem Bildschirm

Der *Zephyr BioHarness 3* (Abbildung 27) ist ein physiologischer Monitor, der ursprünglich für den athletischen Bereich entwickelt wurde. Ähnlich gängigen Pulssensoren wird der BioHarness an einem Brustgurt getragen. In der genutzten Version kann er neben herzschlagbasierten Maßen auch die Respiration, Temperaturveränderungen sowie über integrierte Beschleunigungssensoren auch Aktivität und Haltung (Oberkörperbeugung relativ zur vertikalen Körperachse) erfassen. Durch eine Bluetooth-Anbindung sind sämtliche Daten drahtlos und mit minimaler Latenz für die Auswertung verfügbar. Die validierte Version der multifaktoriellen Nutzerzustandsdiagnose nutzt den BioHarness 3 zur Erfassung von Herzratenvariabilität und Atemfrequenz als weitere Maße für das Arousal.



Abbildung 27. Physiologischer Multi-Sensor Zephyr BioHarness 3

In Abbildung 28 werden die Software-Komponenten des adaptiven Systems dargestellt. Die *iMotions Biometric Research Platform* (www.imotions.com/platform/) stellt die Kernkomponente für die Erfassung aller relevanten Daten dar. iMotions ermöglicht die Anbindung verschiedener Datenströme, visualisiert und synchronisiert diese und nimmt in bestimmten Fällen eine Vorverarbeitung vor. Die heterogenen Daten aus verschiedensten Quellen werden durch native Schnittstellen von iMotions direkt erfasst oder über ein *Input Application Programming Interface* (Input API) bereitgestellt. iMotions zeichnet alle erfassten Datenströme auf und konsolidiert diese in einen einzelnen Datenstrom, der schließlich über eine *Output API* per TCP/IP-Protokoll zur Weiterverarbeitung ausgegeben wird. Da die Output API weitgehend unabhängig von den Eingangssignalen arbeitet, ermöglicht iMotions eine stärkere Modularität und damit eine einfache Ergänzung oder den Austausch von Sensoren.

Auch die Aufgabenumgebung wurde an iMotions angebunden, um verhaltensbasierte Maße und aufgabenbezogene Kontextparameter zu erfassen.

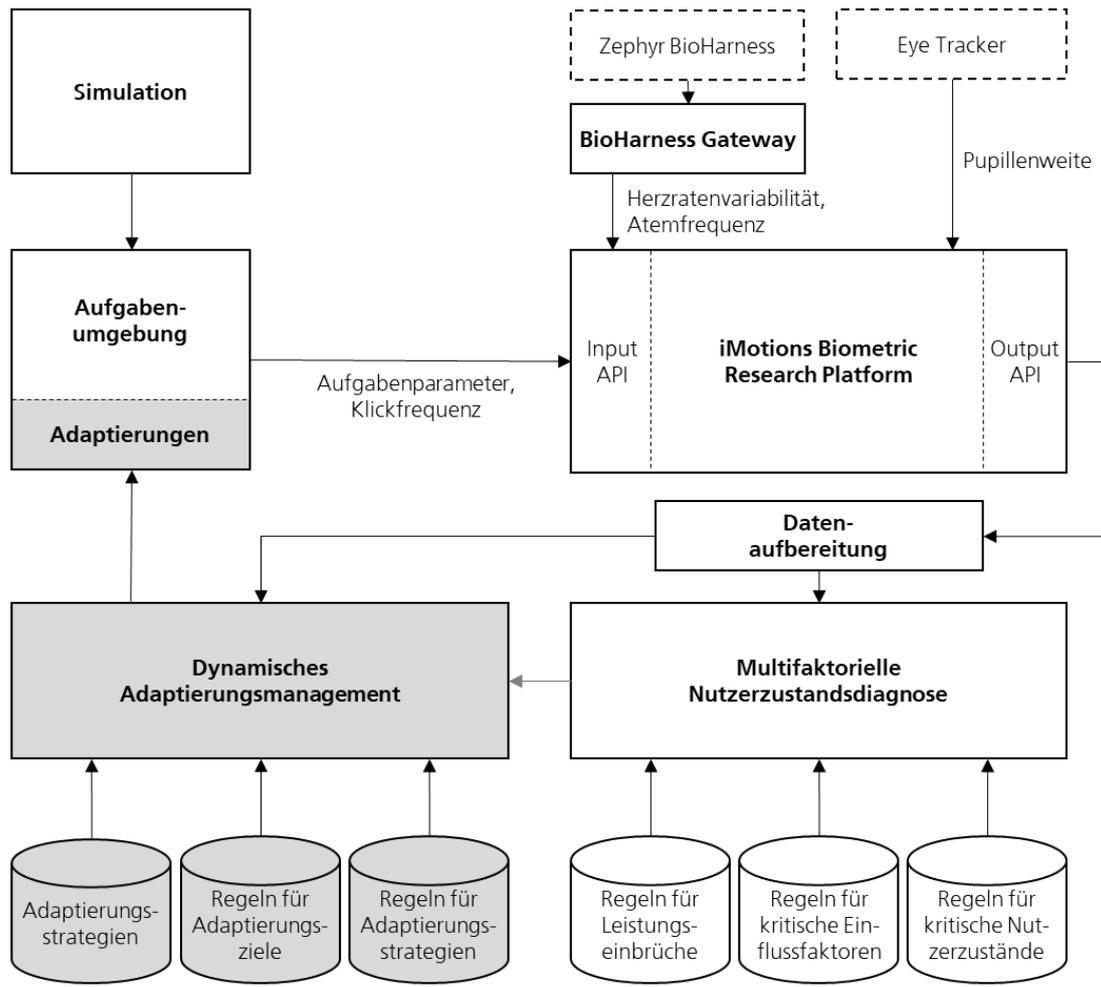


Abbildung 28. Software-Komponenten des Adaptiven Systems

3.4.2 Implementierung des Dynamischen Adaptierungsmanagements

Damit die Adaptierungsmanagement-Komponente geeignete Adaptierungsziele und Adaptierungsstrategien während der Aufgabenbearbeitung in Echtzeit auswählen kann, müssen die Ergebnisse der multifaktoriellen Zustandsdiagnose (insb. detektierte Leistungseinbrüche, kritisch ausgeprägte Nutzerzustände, kritisch ausgeprägte Einflussfaktoren) mit Kontextinformationen aus der Aufgabenumgebung zusammengeführt werden, denn diese bilden die Grundlage für eine dynamische Reaktion des technischen Systems. Das in Abschnitt 3.1 konzipierte Vorgehen für ein Dynamisches Adaptierungsmanagement wurde für die von RASMUS diagnostizierten Nutzerzustände und die in Abschnitt 3.2 hergeleiteten Adaptierungen für die beschriebene Experimentalaufgabe prototypisch in Java implementiert und an die bestehende Nutzerzustandsdiagnose (vgl. Abschnitt 2.5.2) sowie an eine Aufgabenumgebung (vgl. Abschnitt 3.4.3) angebunden. Konzeption und Entwurf der technischen Funktionalitäten erfolgten durch den Verfasser der vorliegenden Arbeit, die Implementierung in Java im Rahmen einer assoziierten Bachelorthesis (Werger, 2016), deren Thema vom Autor der vorliegenden Arbeit gestellt und betreut wurde.

Zur Demonstration der Machbarkeit im Rahmen dieser Arbeit wurde für die Umsetzung ein regelbasiertes Vorgehen gewählt. Regelbasierte Systeme werden oft als wissensbasierte Systeme bezeichnet, da in den Regelsätzen ein gewisses Expertenwissen für die Problemlösung hinterlegt werden kann. Erkenntnisse, die anhand von Regeln aus vorliegenden Informationen abgeleitet

werden können, repräsentieren das Wissen über diese Informationen (Haun, 2014). Die konkreten Wissensinhalte müssen Nutzern des Systems nicht bekannt sein, das in Regeln hinterlegte Expertenwissen kann aber genutzt werden, um bestimmte Sachverhalte aus der Information zu analysieren und technikseitig Aktionen auszulösen – im vorliegenden Fall beispielsweise die Ermittlung von Adaptierungsbedarf und die Auswahl eines Adaptierungsziels sowie einer passenden Adaptierungsstrategie. Regelsätze sind zudem leicht interpretierbar, anpassbar und erweiterbar. Sie begünstigen Modularität (Beierle & Kern-Isberner, 2014), indem Regelsätze separat vom Code der Anwendung verändert und angepasst werden können, die Geschäftslogik also von der Anwendungslogik getrennt wird (Groenewold & Bartonitz, 2011). Durch diese Trennung sind für Test und Optimierung des adaptiven Verhaltens folglich auch die Definition unterschiedlicher Regelsätze und deren Anwendung auf denselben Datenbestand möglich. Dies ist ein Vorteil gegenüber Methoden maschinellen Lernens, bei denen das Expertenwissen verloren geht, da dieses beispielsweise in neuronale Netze nicht nachvollziehbar eingebettet werden kann. Somit wäre es schwierig, die Ergebnisse zu analysieren oder zu interpretieren. Die Erstellung eines umfassenden und genauen Regelwerks erfordert jedoch viel Voraussicht, denn es sollte alle denkbaren Zustände abdecken, die das System annehmen kann (Todi et al., 2021). Im vorliegenden Kontext sind Lücken im Regelwerk jedoch vertretbar, da Adaptierungen nur für bekannte und sinnhafte Zustände ausgelöst werden. Bei unbekanntem Zuständen wird schlicht auf Adaptierung verzichtet.

Zur bedarfsgerechten und kontextsensitiven Ermittlung des Unterstützungsbedarfs müssen Regeln definiert werden, mit denen die Ergebnisse der multifaktoriellen Nutzerzustandsdiagnose und der Aufgabenkontext laufend überprüft werden. Der Ablauf von Regelerstellung, Regelprüfung und Lieferung sowie Ausführung des Ergebnisses werden im Folgenden näher beschrieben und in Abbildung 29 illustriert.

Regelerstellung

Die Regelerstellung umfasst die Erfassung und Verwaltung der Regeln über eine grafische Oberfläche und deren Bündelung in Regelsätzen. Das bietet den Vorteil, dass Regeländerungen keine Anpassungen im Programmcode erfordern. Dafür wurde ein bereits für die Konfiguration der Nutzerzustandsdiagnose implementierter Regeleditor erweitert, um auch Regeln zur Auswahl von Adaptierungszielen und Auslösung von Adaptierungsstrategien anlegen sowie vorhandene Regeln bearbeiten zu können. Auf einer grafischen Oberfläche werden sprachlich formulierte Regeln erstellt, die in einem XML-Format gespeichert und wieder geladen werden können. Nutzer müssen somit keinen Quellcode lesen könnten oder die interne Struktur des Programms kennen, um Regeln zu definieren. Regeltemplates helfen dabei, die Regeln fehlerfrei und im korrekten Format zu definieren.

Regelprüfung

In einem regelbasierten System repräsentieren Faktenwissen und Regelwissen die Wissensbasis (Haun 2014). Fakten sind in diesem Zusammenhang die Eingangsdaten – „deskriptives Wissen über beteiligte Objekte, Situationen und Zustände, die durch logische Ausdrücke dargestellt werden“ (S. 57). Regeln stellen Zusammenhänge zwischen den Fakten dar und bestehen jeweils aus einer Prämisse mit einer oder mehreren Bedingungen, gefolgt von einer Konklusion. Die Regelanwendung findet in einem Regelinterpretierer (engl.: *rule engine*) statt. Dieser hat die Funktion, die Eingangsdaten anhand der hinterlegten Regeln zu analysieren und zu interpretieren (Groenewold & Bartonitz, 2011). Im vorliegenden Fall wird ein Regelinterpretierer verwendet, um aus dem Output der Nutzerzustandsdiagnose und den Kontextdaten der

Aufgabenumgebung anhand von zwei Regelsätzen Adaptierungsziele auszuwählen (Regelsatz 1) und eine geeignete Adaptierungsstrategie auszuwählen und zu konfigurieren (Regelsatz 2).

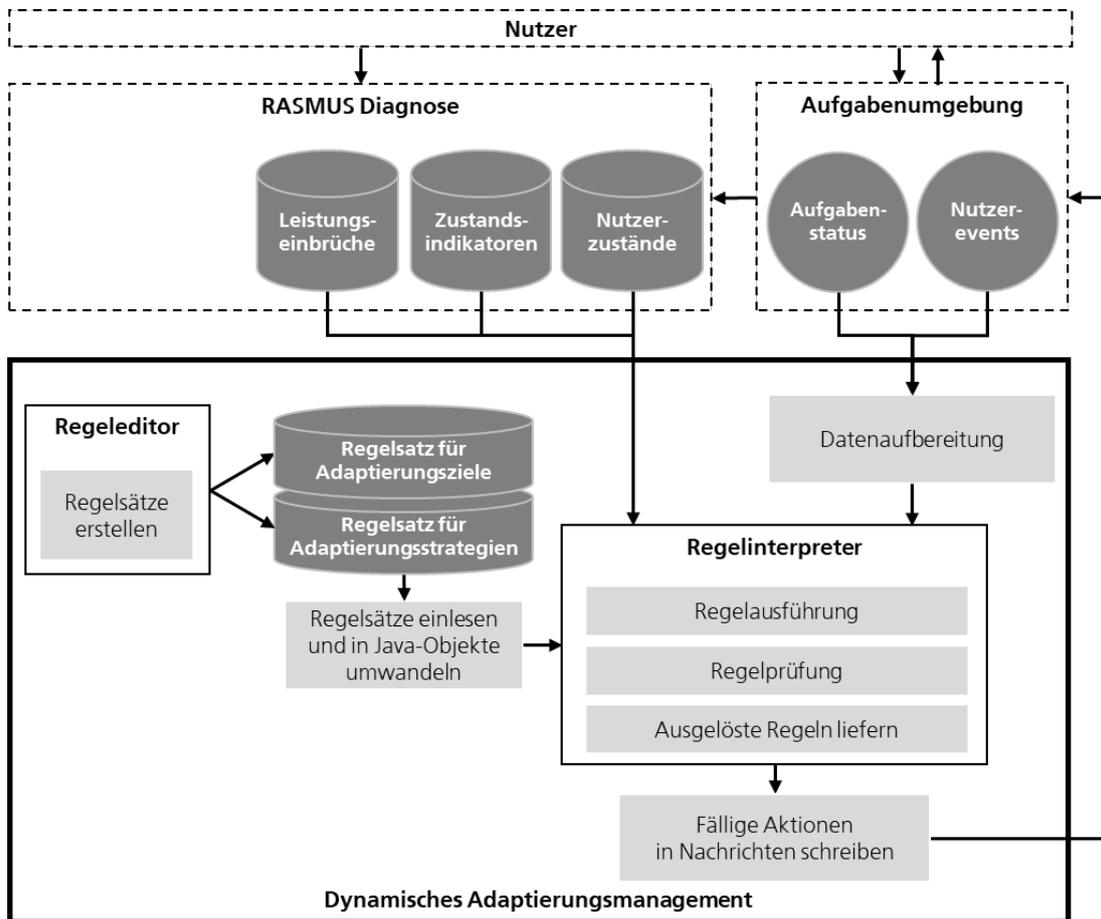


Abbildung 29. Ablauf des Dynamischen Adaptierungsmanagements

Dafür müssen zunächst die XML-Dateien mit den Regelsätzen eingelesen und deren Inhalt in Form einer zur Anwendung verwendbaren Regel verfügbar gemacht werden, weshalb das Adaptierungsmanagement die XML-Daten in Java-Objekte umwandelt. Um kontinuierlich den aktuellen Diagnoseoutput und Aufgabenkontext zu erhalten, verfügt das Adaptierungsmanagement über einen Server, mit dem sich die Clients von Aufgabenumgebung und Diagnose verbinden, um ihre Daten an das Adaptierungsmanagement zu senden. Vorteil dieser Kommunikationsweise ist eine Entkopplung von Diagnose, Adaptierungsmanagement und Aufgabenumgebung, um Abhängigkeiten zwischen diesen Komponenten zu minimieren. Der Server verfügt über einen Threadpool, in dem die Daten parallel und unabhängig voneinander abgearbeitet werden können.

Der Output der multifaktoriellen Zustandsdiagnose von Schwarz (2019) umfasst

1. Leistungseinbrüche bezüglich aller Aufgaben,
2. kritisch ausgeprägte Nutzerzustandsdimensionen,
3. die Ausprägung der mit den Zustandsdimensionen assoziierten Indikatoren des Nutzerzustands,
4. relevante Merkmale der Anforderungssituation, die für die dynamische Auswahl der Adaptierungsstrategien erforderlich sind.

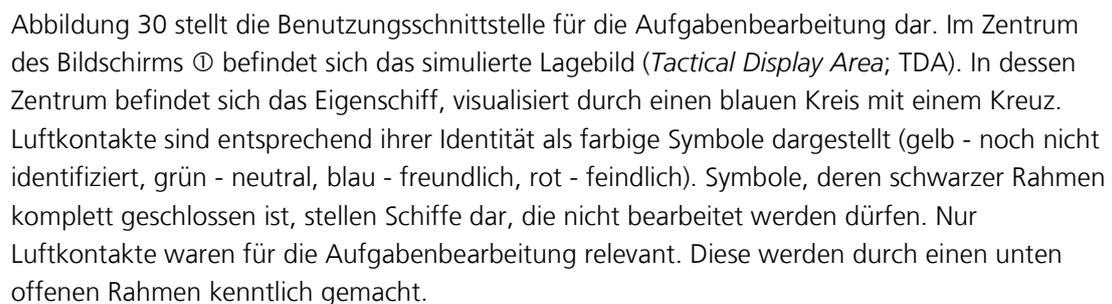
Im Laufe der Aufgabenbearbeitung werden die eingehenden Daten sekundlich mit Regeln abgeglichen, die zuvor über den Regeleditor eingegeben und in Regelsätzen gespeichert wurden. Das Zeitintervall der Regelanalyse orientiert sich an der Frequenz, mit der die Aufgabenumgebung und die Diagnosekomponente ihre Daten bereitstellen. Eine höhere Frequenz würde keinen Mehrwert bieten und ist auch für die adaptive Anpassung der MMI in der Aufgabenumgebung nicht erforderlich. Treffen alle Bedingungen einer Regel zu, wird diese Regel aktiviert und einer Ergebnisliste hinzugefügt. Erst nachdem alle Regeln überprüft wurden, werden die Konklusionen extrahiert und als vorzunehmende Aktionen (z. B. Auslösung oder Rücknahme einer Adaptierungsstrategie) in einer Nachricht an die Aufgabenumgebung bereitgestellt.

Ausführung des Ergebnisses

Die Aufgabenumgebung wird durch eine Zustandsänderung des Adaptierungsmanagements mittels eines Observers aktualisiert. Ein Observer ist ein Entwurfsmuster der Softwareentwicklung, das einen Benachrichtigungsmechanismus beschreibt. Sobald eine Zustandsänderung einer Softwarekomponente eingetreten ist, wird eine andere Softwarekomponente benachrichtigt. Der Vorteil der Nutzung eines Observer-Verfahrens besteht darin, dass die Aufgabenumgebung nur dann benachrichtigt wird, wenn die sekundliche Regelüberprüfung in einer Zustandsänderung resultiert, also Aktionen in der Aufgabenumgebung ausgeführt werden müssen. In dem Fall werden die nötigen Änderungen der MMI in der Aufgabenumgebung durchgeführt.

3.4.3 Beschreibung der Aufgabe

Die exemplarische Umsetzung des Closed-Loop Adaptive Systems, bestehend aus der multifaktoriellen Nutzerzustandsdiagnose von Schwarz und dem in dieser Arbeit entworfenen Dynamischen Adaptierungsmanagement, erfolgte anhand einer realitätsnahen Aufgabe aus dem Bereich der maritimen Luftraumüberwachung. Dafür wurde eine vorhandene Simulation eines Arbeitsplatzes zur Luftzielbearbeitung herangezogen. Auswahl und Priorisierung der Aufgaben erfolgten bereits durch Schwarz et al. (2012) und Schwarz (2013) in Absprache mit Marineoffizieren und wurden daher in gleicher Form übernommen. Die Kriterien zur Identifizierung der Kontakte (vgl. Anhang A.5) und die erforderlichen Schritte zur Durchführung von Bekämpfungen und Warnungen wurden jedoch im Rahmen der assoziierten Vorarbeiten (vgl. Abschnitt 2.5.2) für die Experimente von Schwarz (2019) sowie der vorliegenden Arbeit vereinfacht, um es auch Teilnehmern ohne Vorkenntnisse im Bereich der Luftzielbearbeitung zu ermöglichen, die Bearbeitung der Aufgaben schnell zu erlernen. Die Vereinfachungen wurden jedoch so ausgeführt, dass die wesentlichen kognitiven Anforderungen der realen Aufgabe erhalten blieben.

Abbildung 30 stellt die Benutzungsschnittstelle für die Aufgabenbearbeitung dar. Im Zentrum des Bildschirms  befindet sich das simulierte Lagebild (*Tactical Display Area*; TDA). In dessen Zentrum befindet sich das Eigenschiff, visualisiert durch einen blauen Kreis mit einem Kreuz. Luftkontakte sind entsprechend ihrer Identität als farbige Symbole dargestellt (gelb - noch nicht identifiziert, grün - neutral, blau - freundlich, rot - feindlich). Symbole, deren schwarzer Rahmen komplett geschlossen ist, stellen Schiffe dar, die nicht bearbeitet werden dürfen. Nur Luftkontakte, deren Rahmen unten offen ist, sind für die Aufgabenbearbeitung relevant. Diese werden durch einen unten offenen Rahmen kenntlich gemacht.

The screenshot displays a comprehensive military simulation interface. At the top, a 'Main Screen' section includes 'TDA', 'AAR/W Screen', 'Sensors', 'EO Electric Optical', 'OS Situation', 'Conditioning', and 'Help'. Below this is a 'Track List' table with columns for ID, TH, BRN, DST, CRS, SPD, ALT/Depth, and RVV. The table lists various tracks such as NEU 4000, NEU 4001, NEU 4002, etc., with their respective parameters.

The central part of the interface is a map showing a geographical area with various tracks and sensor footprints. A red circle highlights a specific track (4071), and a yellow circle highlights another (4072). A red line indicates a sensor's field of view.

On the right side, there are several control panels:

- Target Panel:** Shows target information for track 4072, including ID, Name, Class, and Country.
- Ballistics Panel:** Displays sensor and gun data, including range, angle, and velocity.
- TAC Ampl Panel:** Shows tactical amplifier settings for track 4072, including ID, Name, and Class.
- IO Panel:** Contains various input/output options like 'search & hook', 'new track', and 'define VA'.
- Global Panel:** Shows system status, including wind speed, visibility, and temperature.

Numbered callouts (1-8) are placed over the interface to indicate key areas:

- 1:** Points to the map area.
- 2:** Points to the TAC Ampl panel.
- 3:** Points to the Target panel.
- 4:** Points to the sensor's field of view on the map.
- 5:** Points to the Ballistics panel.
- 6:** Points to the IO panel.
- 7:** Points to the IO panel options.
- 8:** Points to the Target panel details.

Abbildung 30. Benutzungsschnittstelle für die Aufgabenbearbeitung

Operateure müssen alle in der Simulation auftretenden Aufgaben bearbeiten, wobei der Schwerpunkt darauf liegt, die Sicherheitszone (*Identification Safety Range*, kurz: ISR) rund um das Eigenschiff frei von Bedrohungen zu halten. Die ISR ist durch einen blauen Kreis um das Eigenschiff dargestellt. Die zu bearbeitende Aufgabe besteht aus vier Teilaufgaben:

- *Identifizieren*. Kontakte, die noch nicht über eine ID verfügen, müssen anhand bestimmter Kriterien identifiziert werden, die im *Track Attribute Control*-Segment (TAC) angezeigt werden. Das erste Kriterium ist der IFF-Code ② (*identification friend or foe*). Hat dieser den Wert 4, handelt es sich um einen freundlichen Kontakt. Bei einem anderen Wert muss das Verhalten des Kontakts beurteilt werden. Luftkontakte, die sich entlang der Luftstraßen bewegen (in der TDA durch rot gestrichelte Korridore symbolisiert), sind als neutral zu klassifizieren. Alle anderen Luftkontakte sind als feindlich einzustufen. Die Identität eines Kontaktes kann nach dessen Selektion im Menü „ID“ ③ zugewiesen werden.

Sonderfall „Faker“: Zur Induktion von Beanspruchung und Bindung von Aufmerksamkeit wurden Kontakte mit widersprüchlichen Informationen hinzugefügt, die ihr Verhalten im Verlauf des Szenarios verändern und nicht mehr der zugewiesenen Kategorie entsprechen. Dabei handelte es sich um neutrale Kontakte, die in ihrem Verlauf von der Luftstraße abweichen (sogenannte „Faker“), so dass eine Umidentifikation nötig ist.

- *Warnen*. Feindliche Kontakte, die in die ISR des Eigenschiffs eindringen, müssen gewarnt werden. Nachdem ein Kontakt selektiert wird, kann die Warnung durch einen Klick auf den Button „5th Warning“ ④ erfolgen. Auf weitere Warnungen wurde zur Vereinfachung der Aufgabe verzichtet. Ein grünes Häkchen an diesem Button zeigt eine erfolgreiche Warnung an.
- *Bekämpfen*. Feindliche Kontakte, die sich trotz Warnung dem Eigenschiff weiter nähern und in den Waffenwirkungsbereich (*Weapon Range*, kurz: WR; roter Kreis in der TDA) eindringen, müssen zeitnah bekämpft werden. Hierzu wird ein Kontakt zunächst ausgewählt und dann mit einem Klick auf den Feuerknopf ⑤ neutralisiert. Eine Bekämpfung ist nur möglich, wenn der feindliche Kontakt zuvor gewarnt wurde.
- *Anlegen von NRT-Tracks*. „Non real-time tracks“ (NRTTs) sind Kontakte, die der Operateur zu bestimmten Zeitpunkten innerhalb des Szenarios manuell in der TDA anlegen muss. Hierzu erhält er eine Meldung mit allen relevanten Informationen des jeweiligen Kontakts. Meldungen zu NRT-Tracks werden zunächst links unten durch einen verschlossenen Briefumschlag ⑥ angezeigt. Durch einen Klick kann der Umschlag geöffnet werden und alle relevanten Informationen zu einem NRTT werden angezeigt. Um einen Kontakt manuell anzulegen, muss zunächst „New Track“ ⑦ ausgewählt werden, anschließend werden Identität, Koordinaten, Geschwindigkeit und Kurs festgelegt ⑧.

Die Aufgaben treten während der Szenarien zu unterschiedlichen Zeitpunkten und unterschiedlich häufig auf. Für den Fall, dass mehrere Aufgaben zur gleichen Zeit bearbeitet werden mussten, wurden die Versuchsteilnehmer aufgefordert, die Aufgabe mit der höchsten Priorität zuerst zu bearbeiten. Die Prioritäten der Teilaufgaben sind in Tabelle 6 dargestellt. Der Zahlenwert 100 entspricht dabei der geringsten Priorität. Je höher der Zahlenwert, desto höher ist die Priorität. Das Bekämpfen ist somit die wichtigste Aufgabe mit der höchsten Priorität.

Tabelle 6. Priorisierung der Teilaufgaben

Aufgabe	Priorität
Bekämpfen	500
Warnen	400
Identifizieren innerhalb der ISRWR	300
Anlegen von NRTT	200
Identifizieren außerhalb der ISR	100

Um zur Ermittlung des Unterstützungsbedarfs festzustellen, wann ein Operateur nicht mehr in der Lage ist, seine Leistung durch Selbstregulation aufrecht zu erhalten, wurden Zeitlimits für die Aufgabenbearbeitung festgelegt. Die Zeitlimits unterscheiden sich je nach Aufgabenart, wie in Tabelle 7 aufgeführt. Bei der Festlegung der Zeiten wurde berücksichtigt, wie zeitkritisch die Aufgabe ist, und wieviel Zeit die Bearbeitung in Anspruch nimmt. Erfolgt die Bearbeitung einer Aufgabe nicht innerhalb dieses Zeitrahmens, wird von der Diagnosekomponente ein Leistungseinbruch detektiert und Unterstützungsbedarf angenommen. Die zulässigen Bearbeitungszeiten entsprachen den zur Validierung von Schwarz (2019) genutzten Werten; einzig die Zeit, die für die Bearbeitung einer Aufgabe zur Verfügung stand, bevor diese einen Leistungseinbruch auslöste, wurde bezüglich Identifizierungsaufgaben von 60 auf 30 Sekunden und für das Anlegen von NRTT-Kontakten von 90 auf 30 Sekunden reduziert, da sich in Voruntersuchungen Deckeneffekte in der Leistung gezeigt hatten.

Tabelle 7. Zeitlimits für die Aufgabenbearbeitung

Aufgabe	Zeitlimit
Kontakt identifizieren	
Korrektur einer fehlerhaften Identifizierung	30 Sekunden
Anlegen eines NRTT-Kontakts	
Kontakt warnen	20 Sekunden
Kontakt bekämpfen	10 Sekunden

3.5 Operationalisierung und Gestaltung der adaptiven Funktionalitäten in der Aufgabenumgebung

In diesem Abschnitt wird zunächst die Konfiguration der Nutzerzustandsdiagnose für die Zwecke dieser Arbeit detailliert dargestellt. Anschließend wird beschrieben, wie das Dynamische Adaptierungsmanagement und die Adaptierungsstrategien in der vorliegenden Aufgabenumgebung operationalisiert wurden. Die Operationalisierungen werden im Verlauf an die jeweiligen Ziele der Experimente und auf Basis der Ergebnisse vorangegangener Experimente angepasst. Die Regeln für die Auslösung sind im Apparat des jeweiligen Experiments beschrieben.

3.5.1 Konfiguration der Nutzerzustandsdiagnose

Die Diagnosekomponente wurde so konfiguriert, dass sie weitgehend der zur Validierung von Schwarz (2019) genutzten Version entsprach.

Leistungseinbrüche

Damit die in Abschnitt 3.2 hergeleiteten Adaptierungsstrategien den Nutzern in der Aufgabenumgebung bedarfsgerecht helfen, werden sie nur bei vorliegendem Unterstützungsbedarf ausgelöst. Dieser wird dann angenommen, wenn ein Operateur nicht mehr in der Lage ist, seine Leistung durch Selbstregulation aufrecht zu erhalten. Um festzustellen, wann dies der Fall ist, wurden Zeitlimits für die Aufgabenbearbeitung festgelegt, die sich je nach Aufgabenart unterscheiden (vgl. Abschnitt 3.4.3, Tabelle 7). Wurde eine Aufgabe nicht in der vorgegebenen Zeit bearbeitet, diagnostizierte das System einen Leistungseinbruch und somit prinzipiellen Unterstützungsbedarf durch Adaptierung der MMI.

Kritische Ausprägung von Kontextparametern

Die Regeln für die Diagnose kritischer Ausprägungen von Kontextparametern wurden aus dem validierten System von Schwarz (2019) unverändert übernommen. Diese Konfiguration umfasste drei Nutzerzustandsdimensionen und deren Zustandsindikatoren, für welche die Funktionsweise der Diagnose demonstriert und ihre Validität bestätigt wurde (vgl. Abschnitt 2.5.3). Da der Fokus der Diagnose darauf liegt, intraindividuelle Veränderungen des Nutzerzustands während der Aufgabenbearbeitung zu erkennen, setzen sich die Diagnoseregeln nur aus solchen Faktoren zusammen, die kontinuierlich erfasst werden können. Individuelle Faktoren, wie das Alter und die Erfahrung, wurden von Schwarz (2019) zwar in einer Vorabbefragung erhoben, aber nicht als Indikatoren einbezogen, da sie innerhalb eines Versuchs konstant bleiben. In der vorliegenden Operationalisierung werden demnach drei Arten von Kontextparametern erfasst und ausgewertet:

- physiologische Indikatoren des Nutzerzustands
 - o Herzratenvariabilität
 - o Atemfrequenz
 - o Pupillenweite
- verhaltensbasierte Maße
 - o Mausklickfrequenz
 - o Fokus der Aufmerksamkeit (ausgewählter Kontakt)
 - o Priorität der aktuell bearbeiteten Aufgabe
- Merkmale der Anforderungssituation
 - o Anzahl der aktuell vorhandenen Aufgaben
 - o Priorität der wichtigsten Aufgabe

In Tabelle 8 wird dargestellt, in welchen Fällen eine kritische Ausprägung der jeweiligen Kontextparameter angenommen wird. Die Grenzwerte für die Anzahl zu bearbeitender Aufgaben und die Anzahl an Mausklicks wurden analog zu Schwarz (2019) festgelegt. Die Überprüfung der Kritikalität der physiologischen Parameter erfolgt durch Vergleich der gleitenden Mittelwerte mit einer Baseline-Messung. Auf Basis der Ergebnisse von Bruder und Schwarz (2019) wird der Baseline-Wert als Mittelwert der Baseline-Messung über 120 Sekunden ermittelt. Während der Aufgabenbearbeitung erfolgt ein sekundlicher Abgleich der physiologischen Maße mit dem Baseline-Wert. Kritische Abweichungen werden dann angenommen, wenn der Mittelwert der letzten 30 Sekunden mindestens eine Standardabweichung ober- oder unterhalb des Baseline-Werts liegt (vgl. Schwarz, 2019; Bruder & Schwarz, 2019).

Tabelle 8. Regeln für kritische Ausprägung der Kontextparameter

Kontextparameter	Kritisch niedrige Ausprägung	Kritisch hohe Ausprägung
Anzahl der aktuell vorhandenen Aufgaben	< 2	> 2
Mausklickfrequenz	< 3 Klicks in den letzten 30 s	> 10 Klicks in den letzten 30 s
Fokus der Aufmerksamkeit	Priorität der Aufgabe des ausgewählten Kontakts < Priorität der wichtigsten Aufgabe	- nicht definiert -
Herzratenvariabilität	Durchschnitt der letzten 30 s	Durchschnitt der letzten 30 s
Atemfrequenz	> 1 Standardabweichung unter dem Baseline-Wert	> 1 Standardabweichung über dem Baseline-Wert
Pupillenweite		

Kritische Ausprägung von Nutzerzustandsdimensionen

Auf Basis der Ausprägungen der Kontextparameter wird gemäß den in Tabelle 9 beschriebenen Regeln die kritische Ausprägung der drei Zustandsdimensionen diagnostiziert. Auch diese wurden aus dem validierten System von Schwarz (2019) unverändert übernommen.

Mit Hilfe der physiologischen Sensoren – dem Eye Tracker Tobii X120 sowie dem Zephyr BioHarness 3 (vgl. Abschnitt 3.4.1) – wird der physiologische Erregungszustand (engl.: *Arousal*) erfasst. Als Indikatoren dienen hierbei die Pupillenweite, die Atemfrequenz und die Herzratenvariabilität. Ergänzt wurden die physiologischen Maße durch die Anzahl der gleichzeitig zu bearbeitenden Aufgaben als Merkmal der Anforderungssituation und die Anzahl der Mausklicks als verhaltensbasierter Indikator. Diese Parameter hatten sich in einem Experiment, das mit der gleichen Experimentalaufgabe durchgeführt wurde (Schwarz et al., 2012), als geeignet erwiesen, um zwischen Unter- und Überforderungssituationen zu unterscheiden. Eine Zustandsdimension wird erst dann als kritisch klassifiziert, wenn mindestens drei der fünf aufgeführten Indikatoren kritische Ausprägungen aufweisen (siehe Tabelle 9).

Für die Diagnose falsch gerichteter Aufmerksamkeit wird die Priorität der derzeitigen bearbeiteten Aufgabe als Indikator herangezogen. Der Diagnose muss somit bekannt sein, welche Prioritäten die Aufgaben haben, und mit welcher Aufgabe sich der Nutzer gerade beschäftigt. Die Prioritäten wurden den Aufgaben gemäß Tabelle 6 vorab zugewiesen. Zur Ermittlung mit welcher Aufgabe sich der Nutzer gerade beschäftigt wird, wie bei Schwarz (2019), die aktuelle Aufgabe des per Mausklick selektierten Kontakts herangezogen. Falsch gerichtete Aufmerksamkeit wird dann diagnostiziert, wenn die mit dem ausgewählten Kontakt assoziierte Aufgabe eine geringere Priorität hat als eine nicht bearbeitete Aufgabe. Falsch gerichtete Aufmerksamkeit wird ebenfalls angenommen, wenn nur eine Aufgabe vorhanden ist, diese aber nicht bearbeitet wird.

Tabelle 9. Regeln für kritische Ausprägung der Nutzerzustandsdimensionen

Zustandsdiagnose	Diagnoseregeln
Kritisch hohe Beanspruchung	Kritische Ausprägung von mindestens 3 der folgenden Kontextparameter: <ul style="list-style-type: none"> - Kritisch hohe Anzahl Aufgaben - Kritisch hohe Mausklickfrequenz - Kritisch niedrige Herzratenvariabilität - Kritisch hohe Atemfrequenz - Kritisch hohe Pupillenweite
Falsch gerichtete Aufmerksamkeit	Anzahl der Aufgaben > 1 und kritisch niedriger Fokus der Aufmerksamkeit - ODER - Anzahl der Aufgaben = 1 und kein Objekt mit Aufgabe ausgewählt
Kritisch hohe passive aufgabenbezogene Müdigkeit	Kritische Ausprägung von mindestens 3 der folgenden Kontextparameter: <ul style="list-style-type: none"> - Kritisch niedrige Anzahl Aufgaben - Kritisch niedrige Mausklickfrequenz - Kritisch hohe Herzratenvariabilität - Kritisch niedrige Atemfrequenz - Kritisch niedrige Pupillenweite

3.5.2 Operationalisierung des Dynamischen Adaptierungsmanagements

Um den verschiedenen Nutzerzustandsproblemen bedarfsadäquat zu begegnen, werden basierend auf der Ausprägung bestimmter Kontextparameter aus dem Diagnoseergebnis ein oder mehrere Adaptierungsziele dynamisch ermittelt. Tabelle 10 listet die Parameter und Regeln zur Auswahl der Adaptierungsziele auf.

Das Konzept des Dynamischen Adaptierungsmanagements sieht vor, dass zur Erreichung jedes Adaptierungsziels aus mehreren Strategien ausgewählt werden kann. Mit Blick auf den Umfang der Arbeit wird im ersten Schritt zur Demonstration der Machbarkeit jedoch nur zwischen verschiedenen Zielen gewählt und jedem Adaptierungsziel zunächst nur eine Adaptierungsstrategie zugeordnet. Die Erfolgskontrolle (vgl. Tabelle 3 in Abschnitt 3.1.4) beschränkt sich folglich auf das Beenden aktiver Strategien, wenn deren Einsatzvoraussetzungen nicht mehr vorliegen.

Zur einfachen Illustration wurden die adaptiven Funktionalitäten in einem Adaptierungsschema abgebildet, das die drei kritischen Zustandsdimensionen mit Adaptierungszielen und Adaptierungsstrategien verknüpft. Wenn die Diagnose Leistungseinbrüche meldet und das System Adaptierungsbedarf bezüglich einer kritisch ausgeprägten Zustandsdimension feststellt, wird eine Strategie gemäß diesem Schema ausgewählt. Der Zusammenhang zwischen Nutzerzustandsdiagnosen, Adaptierungszielen und Adaptierungsstrategien ist in Abbildung 31 dargestellt. Dieses Modell beschreibt das Ausgangsschema, das im Verlauf der Arbeit auf Basis der Erkenntnisse aus den Voruntersuchungen (Kapitel 4) und Experiment 1 (Kapitel 5) verfeinert wird. Das finale Modell wird schließlich in Kapitel 6 beschrieben.

Tabelle 10. Parameter und Regeln zur der Auswahl der Adaptierungsziele

Kritisch ausgeprägte Zustandsdimension	Beobachtete Kontextparameter	Angenommener Engpass	Adaptierungsziel
Hohe Beanspruchung	Geringe Mausclick-Frequenz	Verzögerte Bearbeitung der zahlreichen Aufgaben durch <i>Exekutiven Engpass</i>	Entscheidungsfindung unterstützen
Hohe Beanspruchung	Hohe Mausclick-Frequenz; Priorität der bearbeiteten Aufgabe hoch	Bei zu vielen zu bearbeitenden Aufgaben verhindern <i>psychomotorische Engpässe</i> eine ausreichend schnelle Abarbeitung.	Aufgabenlast reduzieren
Hohe Beanspruchung + falsch gerichtete Aufmerksamkeit	Hohe Mausclick-Frequenz	Zügiges Arbeiten bei hoher Aufgabenlast kann aufgrund <i>perzeptiver Filter</i> die Wahrnehmung von Aufgaben und die adäquate Verteilung der Aufmerksamkeit beeinträchtigen.	Aufgabenlast verteilen & falscher Ausrichtung der Aufmerksamkeit vorbeugen
Falsch gerichtete Aufmerksamkeit	Dringliche Aufgabe(n) vorhanden	Ohne Hinweise auf hohe Beanspruchung kann von einem <i>Aufmerksamkeitsengpass</i> ausgegangen werden, der je nach Dringlichkeit unterschiedlich adressiert werden kann.	Aufmerksamkeit (intrusiv) ausrichten
Falsch gerichtete Aufmerksamkeit	Keine dringliche(n) Aufgabe(n) vorhanden		Ablenkung verringern
Passive aufgabenbezogene Müdigkeit	Keine dringliche(n) Aufgabe(n) vorhanden	Verzögerte Bearbeitung der Aufgaben durch Vigilanzminderung und Passivität	Arousal erhöhen

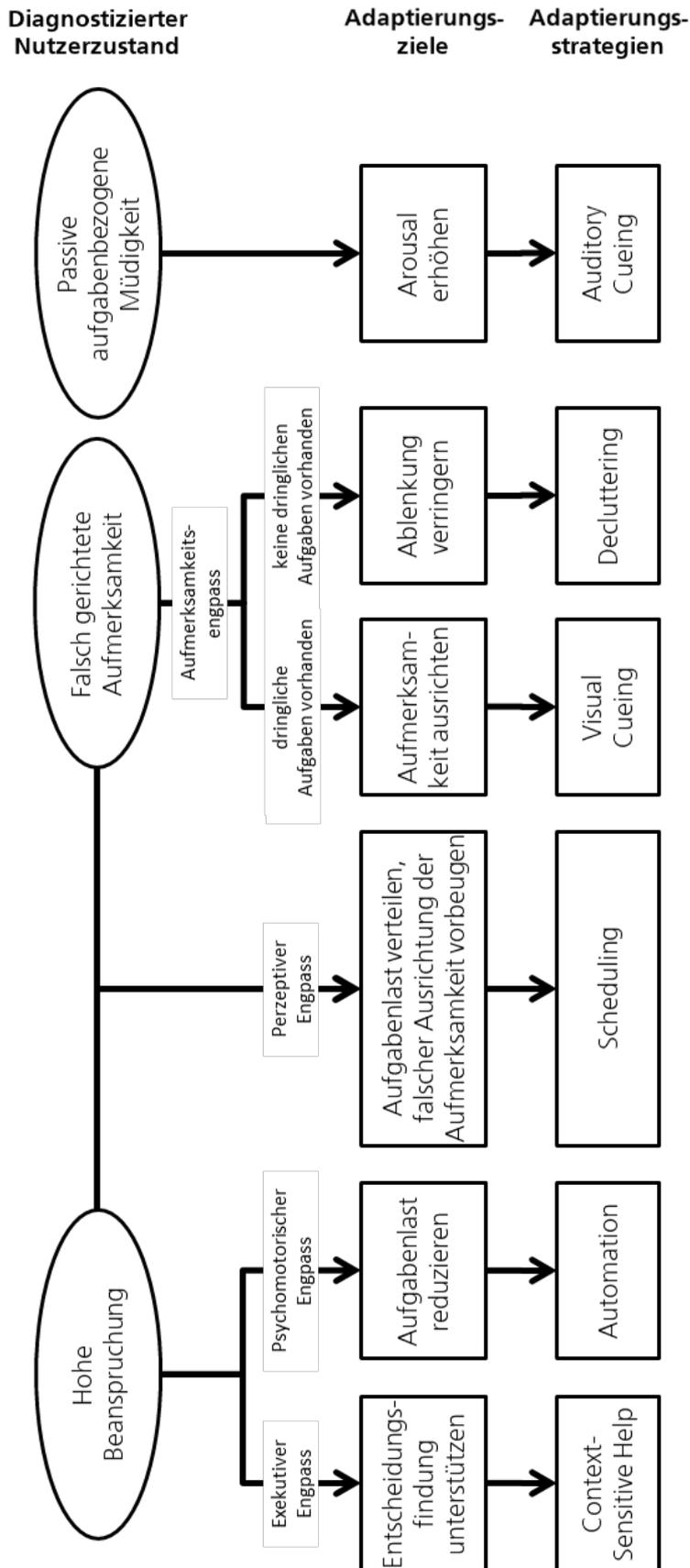


Abbildung 31. Adaptierungsschema zur Operationalisierung der adaptiven Funktionalitäten (Ausgangsversion)

3.5.3 Gestaltung der Adaptierungsstrategien

Die Adaptierungsstrategien wurden in Abschnitt 3.2 zunächst aufgabenagnostisch hergeleitet, um deren Nutzbarkeit für verschiedene Anwendungszwecke zu illustrieren. Dieser Abschnitt beschreibt nun die Umsetzung der sechs Strategien in der in Abschnitt 3.4.3 dargestellten Aufgabenumgebung.

Context-Sensitive Help

Die Context-Sensitive-Help-Strategie zielt darauf ab, Nutzern bei Engpässen in den exekutiven Funktionen Hilfestellung zu leisten, indem sie auf den nächsten Handlungsschritt hingewiesen werden. Ein Engpass in den exekutiven Funktionen wird angenommen, wenn kritisch hohe Beanspruchung besteht, während die Bearbeitung der Aufgaben stockt. Die stockende Aufgabenbearbeitung wurde in der vorliegenden Aufgabe durch eine langsame Mausklickfrequenz operationalisiert. Zur Auslösung von Context-Sensitive Help in Situationen hoher kognitiver Beanspruchung müssen demnach drei Bedingungen erfüllt sein:

1. ein Leistungseinbruch liegt vor,
2. eine kritisch hohe Beanspruchung ist diagnostiziert und
3. der Nutzer führt eine niedrige Anzahl an Mausklicks aus.

Um eventuelle Blockaden oder Erfahrungslücken zu überwinden, wird bei Auslösung dieser Adaptierung den Nutzern angezeigt, welcher Arbeitsschritt („Identify“, „Warn“ oder „Engage“) aktuell zu erledigen ist. Dafür wird an der Aufgabe mit der höchsten Priorität ein gelbes Label dargestellt. Hat eine NRTT-Aufgabe die höchste Priorität, wird der NRTT-Umschlag gelb eingefärbt (Abbildung 32). Die Adaptierung wird deaktiviert, sobald die Aufgaben, die den Leistungseinbruch ausgelöst haben, nicht mehr vorliegen oder die Beanspruchung nicht mehr kritisch hoch ist.



Abbildung 32. Darstellung der Adaptierungsstrategie „Context-Sensitive Help“ durch gelbe Hervorhebung an Kontakten (links) und an den Umschlägen der NRTT-Aufgaben (rechts)

Automation

Ziel der Automationsstrategie im Rahmen des dynamischen Adaptierungsmanagements ist die Adressierung psychomotorischer Engpässe bei der Aufgabenbearbeitung. Dem Ansatz der Adaptiven Automation (z. B. Rouse, 1988; Scerbo, 1996, 2006) folgend, ist der Nutzer dabei aber „im Loop“ zu halten und Automation nur bei Bedarf zu aktivieren.

Um die Unterstützung durch Automation auf Situationen psychomotorischer Engpässe zu beschränken, wird die Strategie nur aktiviert, wenn aus Kontextparametern eine hohe psychomotorische Belastung erkennbar ist. Ein Indiz für Letztere ist eine hohe Frequenz der Mausklicks während der Aufgabenbearbeitung. Demnach müssen drei Bedingungen erfüllt sein, um Unterstützung durch Automation auszulösen:

1. ein Leistungseinbruch liegt vor,
2. eine kritisch hohe Beanspruchung ist diagnostiziert und
3. der Nutzer führt eine hohe Anzahl an Mausklicks aus.

Sind diese Bedingungen erfüllt, wird die Identifizierung unkritischer (d.h. außerhalb der ISR befindlicher) Kontakte technikseitig durchgeführt. Um Automationsfehlern vorzubeugen und Complacency-Effekte (z. B. Parasuraman et al., 1993) zu vermeiden, werden jedoch alle automatischen Identifizierungen durch eine Markierung gekennzeichnet (vgl. Abbildung 33) und sollen zu einem späteren Zeitpunkt vom Nutzer manuell verifiziert werden. In Zeiten hoher Beanspruchung wird der Nutzer demnach entlastet und kann sich auf die wichtigsten Aufgaben konzentrieren, in weniger kritischen Momenten kann er die automatisch zugewiesenen Identitäten verifizieren, wodurch die Belastung gleichmäßiger verteilt wird.

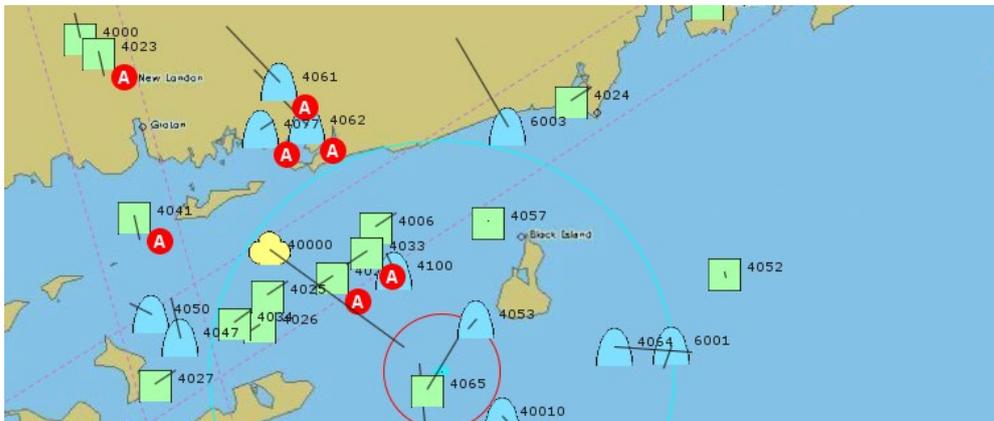


Abbildung 33. Initiale Darstellung der Adaptierungsstrategie „Automation“ mit Markierung der automatisch identifizierten Kontakte

Die automatische Identifikation wird deaktiviert, sobald die Aufgaben, die den Leistungseinbruch ausgelöst haben, nicht mehr vorliegen oder die Beanspruchung nicht mehr kritisch hoch ist. Die Identität bereits automatisch identifizierter Kontakte sowie deren Markierung bleiben jedoch bestehen, um Inkonsistenzen in der Informationsdarstellung zu vermeiden. Eine Rücknahme der automatisch zugewiesenen Identität könnte auch einen sprunghaften Anstieg der Belastung bedeuten, der zu ungewünschten Oszillationseffekten im Adaptierungsmanagement führen könnte (Stanney et al., 2009).

Scheduling

Ein Engpass der perceptiven Ressourcen wird angenommen, wenn hohe Beanspruchung zusammen mit falsch gerichteter Aufmerksamkeit auftritt. Die Scheduling-Strategie verzögert bei kritischer Ausprägung dieser beiden Zustandsdimensionen die Darstellung neu auftretender, gering priorisierter Aufgaben (Identifikation außerhalb der ISR und NRTT-Aufgaben; vgl. Abschnitt 3.4.1), sofern zu der Zeit auch unbearbeitete höherpriorisierte Aufgaben vorliegen. Demnach müssen vier Bedingungen erfüllt sein, um Unterstützung durch Scheduling auszulösen:

1. ein Leistungseinbruch liegt vor,
2. eine kritisch hohe Beanspruchung ist diagnostiziert,
3. falsch gerichtete Aufmerksamkeit ist diagnostiziert und
4. es sind hoch priorisierte Aufgaben (Identifikation in ISR, Warnen oder Bekämpfen) vorhanden.

Durch das Scheduling wird die Aufgabenlast gleichmäßiger verteilt und eine Ablenkung durch unkritische neue Aufgaben ausgeschlossen, während der Operateur die vorliegenden hoch priorisierten Aufgaben abarbeitet. Die Unterdrückung unkritischer neuer Aufgaben endet, sobald nicht mehr alle auslösenden Bedingungen vorliegen.

Visual Cueing

Im Dynamischen Adaptierungsmanagement wird Visual Cueing genutzt, um die Aufmerksamkeit unverzüglich auf dringliche Aufgaben zu lenken. Visual Cueing wird angewandt, wenn Aufgaben mit hoher Dringlichkeit vorliegen, die Aufmerksamkeit aber nicht auf diese gerichtet ist. Demnach müssen drei Bedingungen erfüllt sein, um diese Strategie auszulösen:

1. ein Leistungseinbruch liegt vor,
2. falsch gerichtete Aufmerksamkeit ist diagnostiziert und
3. es sind hoch priorisierte Aufgaben (Identifikation in ISR, Warnen oder Bekämpfen) vorhanden.

Sind diese Bedingungen erfüllt, wird ein visueller Hinweis dargestellt.

Während eine Erhöhung der Salienz durch eine Farbänderung oder Blinken des Zielobjekts zu erreichen wäre, bestünde dabei die Gefahr, dass diese Veränderung übersehen wird, wenn sie im peripheren Sichtfeld auftritt. Die Diagnose „falsch gerichtete Aufmerksamkeit“ bedingt jedoch, dass der Nutzer sich mit einer minder priorisierten Aufgabe beschäftigt. Daher kann angenommen werden, dass er dabei den (zur Aufgabendurchführung benötigten) Mauszeiger beachtet. Die Adaptierung kann dort einen Hinweis auf die wichtigste Aufgabe einblenden, um die Aufmerksamkeit möglichst effektiv von der minder priorisierten Aufgabe wegzulenken.

Der Hinweis besteht aus einem roten Pfeil, der an den Mauszeiger angeheftet wird, sich mit diesem bewegt und stets in Richtung des Informationsobjekts mit der höchstpriorisierten Aufgabe zeigt (siehe Abbildung 34: hier muss Track 4071 gewarnt werden und ist daher die wichtigste Aufgabe). Der Pfeil dient als deutlicher Hinweis auf das Vorhandensein einer wichtigeren Aufgabe, lässt dem Operateur allerdings die Möglichkeit, die aktuelle Aufgabe zu beenden. Treten während der Adaptierung weitere, noch höher priorisierte Aufgaben auf, richtet sich der Pfeil stets zur höchstpriorisierten Aufgabe aus. Länge und Gestaltung des Pfeils sind konfigurierbar, so dass in späteren Ausbaustufen eine dynamische Anpassung der Pfeildarstellung an Aufgabencharakteristiken (z. B. Priorität) realisiert werden kann.

Der Pfeil bleibt so lange sichtbar, bis die Aufgaben, die den Leistungseinbruch ausgelöst haben, abgeschlossen wurden (d.h. die Kriterien für den Leistungseinbruch nicht mehr gegeben sind) oder bis die adressierte Zustandsdimension nicht mehr kritisch ausgeprägt ist. In letzterem Fall wird davon ausgegangen, dass der durch die Adaptierung beeinflusste Nutzerzustand keinen Einfluss mehr auf die Leistung hat und somit die Adaptierung nicht mehr zielführend ist. Bleibt der Leistungseinbruch bestehen, wird eine neue Adaptierung ausgelöst, sobald erneut ein kritischer Nutzerzustand diagnostiziert wird.

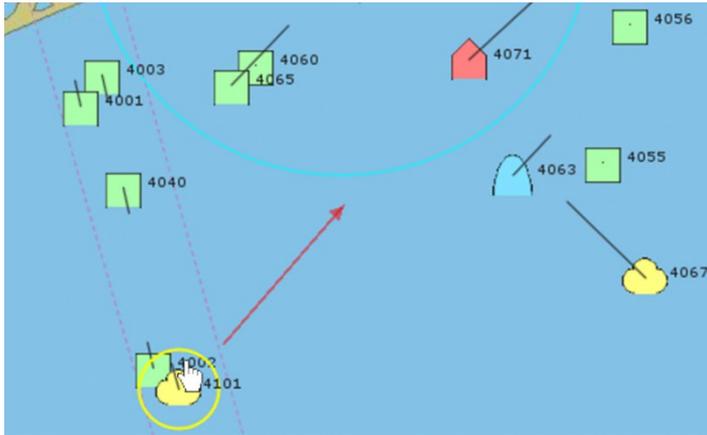


Abbildung 34. Initiale Darstellung der Adaptierungsstrategie „Visual Cueing“ durch einen roten Pfeil in Richtung des am höchsten priorisierten Kontakts

Decluttering

Ziel der Decluttering-Strategie ist die Verringerung der Ablenkung durch aktuell irrelevante Informationsobjekte. In der vorliegenden Aufgabenumgebung soll die Decluttering-Strategie die Ablenkung dadurch verringern, dass aktuell irrelevante Informationsobjekte in ihrer Salienz reduziert werden. Kontakte ohne durchzuführende Aufgabe werden halbtransparent dargestellt, damit der Bediener die Objektgruppe der zu bearbeitenden Kontakte leichter erkennt.

Um die Unterstützung durch Decluttering auf Situationen zu beschränken, in denen eine nur wenig intrusive Maßnahme zur Aufmerksamkeitslenkung angemessen ist, müssen drei Bedingungen für die Auslösung erfüllt sein:

1. ein Leistungseinbruch liegt vor,
2. falsch gerichtete Aufmerksamkeit ist diagnostiziert und
3. es liegen nur Aufgaben mit niedriger Priorität (Identifikation außerhalb der ISR) vor.

Sind diese Bedingungen erfüllt, werden alle Objekte ohne Aufgaben halbtransparent dargestellt (Abbildung 35). Decluttering bleibt so lange aktiv, bis die Aufgaben, die den Leistungseinbruch ausgelöst haben, abgeschlossen wurden (d.h. die Kriterien für den Leistungseinbruch nicht mehr gegeben sind) oder bis die adressierte Zustandsdimension nicht mehr kritisch ausgeprägt ist.



Abbildung 35. Darstellung der Adaptierungsstrategie „Decluttering“ durch reduzierte Salienz von Kontakten, die aktuell nicht mit einer Aufgabe assoziiert sind

Auditory Cueing

Ziel des Auditory Cueings ist im vorliegenden Fall die Adressierung passiver aufgabenbezogener Müdigkeit, die zu Leistungseinbrüchen durch Passivität führen kann – der Nutzer „schaltet ab“.

Das Auditory Cueing soll das Arousal fördern, den Nutzer „in die Aufgabe zurückzuholen“ und auf das Vorhandensein einer Aufgabe aufmerksam machen. Die Strategie wird dann ausgelöst, wenn die folgenden Bedingungen vorliegen:

1. ein Leistungseinbruch liegt vor und
2. passive aufgabenbezogene Müdigkeit ist diagnostiziert und
3. es ist eine Aufgabe vorhanden, deren Informationsobjekt jedoch nicht selektiert ist.

In dem Fall wird ein sich wiederholender Alarmton abgespielt, der dem Nutzer signalisiert, dass Aufgaben bearbeitet werden müssen. Das Ziel ist erreicht, wenn der Nutzer sich einer bestehenden Aufgabe zuwendet. Folglich bleibt der auditive Alarm bestehen, bis der Nutzer die Zuwendung zur Aufgabe durch Mausklick auf das zu bearbeitende Informationsobjekt bestätigt.

In späteren Ausbaustufen könnte die Intrusivität des Alarmtons durch die Wichtigkeit oder Dringlichkeit der Aufgabe moduliert werden. Die technischen Voraussetzungen dafür wurden bereits geschaffen.

3.6 Zusammenfassung der Entwurfsphase

Das Diagnosekonzept von Schwarz (2019) ermöglicht eine deutlich flexiblere Unterstützung von Adaptierung als bisherige Diagnoseansätze, bei denen oft nur auf Basis physiologischer Merkmale über Aktivierung und Deaktivierung einer statischen Adaptierung entschieden wurde. Die multifaktorielle Zustandsdiagnose bietet die Möglichkeit, im Falle eines Leistungseinbruchs kritische Nutzerzustände in Echtzeit zu diagnostizieren und anhand der Ausprägung der jeweiligen Einflussfaktoren auf kognitive Engpässe als mögliche Ursachen zurückzuführen.

Diese Engpässe zu adressieren ist das Ziel des im vorliegenden Promotionsvorhaben erarbeiteten Dynamischen Adaptierungsmanagements, das in diesem Kapitel humanzentriert hergeleitet und zunächst aufgabenagnostisch entworfen wurde (**Forschungsfrage 1**). Anschließend wurde das Rahmenwerk mit relevanten Adaptierungszielen und –strategien ausgestaltet, um darüber kritische mentale Zustände adressieren zu können (**Forschungsfrage 2**). Die Adaptierungsstrategien wirken über die Linderung leistungsrelevanter kritischer Nutzerzustände. Daher muss neben einem Leistungseinbruch auch mindestens eine kritisch ausgeprägte Zustandsdimension (kritisch hohe Beanspruchung, falsch gerichtete Aufmerksamkeit oder aufgabenbezogene Müdigkeit) vorliegen, damit das Adaptierungsmanagement eine passende Änderung der MMI auslöst. Diese wirkt dann über einen geeigneten Einflussfaktor mitigierend auf den unerwünschten Nutzerzustand, wodurch die Leistung sich verbessern sollte. Die übrigen Abschnitte beschreiben, wie der aufgabenagnostische Entwurf schließlich für eine Luftraumüberwachungsaufgabe operationalisiert und in Form eines experimentellen Prototyps umgesetzt wurde (**Forschungsfrage 3**).

Mit dieser funktionsfähigen Experimentalumgebung kann nun zur Beantwortung von **Forschungsfrage 4** das Wirkprinzip des Dynamischen Adaptierungsmanagements evaluiert werden. Dabei sollen empirische Erkenntnisse über Funktion und Wirksamkeit des Konzepts zur adaptiven Systemgestaltung erlangt und die ergonomischen Auswirkungen adaptiver Mensch-Technik-Interaktion auf die Leistungsfähigkeit von Operateuren quantifiziert werden.

4

Voruntersuchung zu Funktion und Nutzerakzeptanz der Adaptierungsstrategien

Der empirische Teil der Arbeit umfasst drei Studien, die in den Kapiteln 4 bis 6 dargestellt werden. Er dient der Beantwortung der **Forschungsfrage 4**, also der Nachweisführung, dass mit dem Dynamischen Adaptierungsmanagement Leistungseinbrüchen und kritischen mentalen Zuständen der Nutzer in der gewählten Aufgabenumgebung effektiv entgegengewirkt werden kann. Da es sich um eine Fragestellung im angewandten Kontext handelt, wurde für die Durchführung eine realitätsnahe Umgebung gewählt (vgl. Abschnitt 2.6.8), welche jedoch die experimentellen Zugänge limitiert.

Vor diesem Hintergrund diente eine explorative Voruntersuchung zunächst der Überprüfung der Funktion des technischen Konzepts und der Ermittlung eines geeigneten Experimentalparadigmas für die Hauptexperimente. Mit Blick auf Versuchsbedingungen und Untersuchungsparameter sollte sichergestellt werden, dass die kritischen Nutzerzustandsdimensionen erfolgreich induziert und die sechs operationalisierten Adaptierungsstrategien (vgl. Abschnitte 3.2 und 3.5.3) auf Basis der Regelsätze von der Diagnosekomponente wie vorgesehen und hinreichend häufig ausgelöst und von den Nutzern bemerkt werden. In Bezug auf die Forschungsfrage 4 wurde zudem bereits die subjektive Wirkung der Adaptierungen auf die betrachteten Zustandsdimensionen untersucht.

Jede Adaptierungsstrategie wurde für einen bestimmten Kontext konzipiert und grenzt sich dadurch von den anderen Strategien ab, weshalb die Wirkung jeder Adaptierungsstrategie zunächst einzeln untersucht werden sollte. Dafür wurden diese Zustandsdimensionen separat induziert und die jeweiligen Adaptierungsstrategien in vier aufeinanderfolgenden, aber voneinander unabhängigen Testphasen einzeln im Vergleich zu einer Kontrollbedingung untersucht. Die jeweils *aktive Adaptierungsstrategie* diente als unabhängige Variable (UV) und wurde als Innersubjektfaktor manipuliert. Zwischen den verschiedenen Testphasen wurden zudem das Aufgabenvolumen, die Komplexität der Situation und das Auftreten von aufmerksamkeitsbindenden Aufgaben manipuliert. Da diese Faktoren innerhalb der Testphasen konstant blieben und die einzelnen Testphasen unabhängig voneinander ausgewertet wurden, handelt es sich jedoch nicht um unabhängige Variablen. Dies wäre nur erforderlich gewesen, wenn das Forschungsziel darin bestanden hätte, die Adaptierungsstrategien vergleichend zu untersuchen, um die wirksamste Strategie zu ermitteln.

Der Effekt der Adaptierungen wurde explorativ anhand ihrer subjektiven Wirkung auf den Nutzerzustand untersucht. Zur Erfassung der Beanspruchung und der aufgabenbezogenen Müdigkeit wurde der NASA Task Load Index (NASA-TLX; Hart & Staveland, 1988) herangezogen. Dabei handelt es sich um eine multidimensionale Bewertungsskala, die Subskalen für sechs beanspruchungsrelevante Faktoren umfasst und aufgrund seiner Einfachheit besonders gut in operationellen Umgebungen einsetzbar ist. Als abhängige Variablen (AV) wurden die Beanspruchung mit dem NASA-TLX-Item „Anstrengung“ sowie die passive aufgabenbezogene Müdigkeit mit dem NASA-TLX-Item „Müdigkeit“ erfasst. Auf eine subjektive Bewertung der Ausrichtung der Aufmerksamkeit wurde verzichtet, da eine Selbsteinschätzung hier als nicht verlässlich erachtet wurde. Zudem wurde der emotionale Zustand in den drei Emotionsdimensionen Valenz, Arousal und Dominanz mit dem Self-Assessment Manikin (SAM; Bradley & Lang, 1994) erhoben. Jedoch wird dessen Auswertung nicht berichtet, da die Daten

für separate Untersuchungen des emotionalen Zustands miterhoben wurden (Schmitz-Hübsch, 2019; Schmitz-Hübsch et al., 2021).

Als weitere abhängige Variable wurde die subjektive Beurteilung der Adaptierungsstrategien explorativ untersucht. Dafür wurde mit einem eigenen Fragebogen eine Einschätzung der Nutzer hinsichtlich der Nützlichkeit der Adaptierungsstrategien sowie deren empfundenen Einfluss auf Leistung, Aufmerksamkeit und Beanspruchung abgefragt.

4.1 Methode

4.1.1 Stichprobe

$N = 37$ Mitarbeitende des Fraunhofer FKIE nahmen an der Voruntersuchung teil. Sieben Datensätze mussten ausgeschlossen werden, weil während der Untersuchung technische Schwierigkeiten auftraten. Zwölf der 30 verbleibenden Probanden waren weiblich. Die Altersspanne der Teilnehmenden lag zwischen 17 und 52 Jahren ($M = 30.96^1$; $SD = 9.7$). 47% der Probanden gaben an, sich sehr gut oder gut mit Computerspielen auszukennen, 53% hatten wenige oder gar keine Kenntnisse mit Computerspielen.

4.1.2 Apparat

Die Versuchsteilnehmer saßen auf einem höhenverstellbaren Stuhl an einem Schreibtisch vor der Versuchsanordnung (Abbildung 36). Die Augen hatten ca. 60 cm Abstand vom Bildschirm. Die Experimentalaufgabe entsprach der Beschreibung in Abschnitt 3.4.3. und wurde auf einem 24-Zoll-Bildschirm mit einer Auflösung von 1920x1200 Pixeln präsentiert.



Abbildung 36. Experimentalumgebung mit den Sensoren für die Nutzerzustandserfassung

Die Aufgabenbearbeitung in der Anti-Air-Warfare-Simulation erfolgte über Tastatur und Maus. Die physiologischen Maße wurden mit einem *Tobii Pro X3-120* Eye Tracker und einem *Zephyr*

¹ Die Nutzung eines Punkts als Dezimaltrennzeichen in dieser Arbeit basiert auf den Richtlinien zur Manuskriptgestaltung der Deutschen Gesellschaft für Psychologie (2019).

BioHarness 3 Multisensor-Brustgurt erfasst (vgl. Abschnitt 3.4.1). Der Eye Tracker befand sich mittig unter dem Bildschirm und übertrug okulomotorische Maße mit einer Messrate von 120 Hz. Atemfrequenz, Herzfrequenz, Herzratenvariabilität, Hauttemperatur und Körperhaltung wurden von dem Multisensor-Brustgurt mit einer Messrate von 1 Hz an die Diagnosekomponente übertragen. Von diesen Maßen flossen allerdings analog zu Schwarz (2019) nur die Atemfrequenz und die Herzratenvariabilität in die Auswertung ein.

Das aktuelle Geschehen auf dem Probandenbildschirm wurde mit einem *Epiphan DVI2USB3.0* Videoadapter auf einen zweiten Computer übertragen. Mithilfe des Leistungs- und Zustandsmonitors der multifaktoriellen Nutzerzustandsdiagnose (siehe Anhang A.1) sowie im „Live Viewer“ der *iMotions*-Software konnte die Versuchsleitung so Veränderungen in der Leistung, im Nutzerzustand und in den physiologischen Parametern beobachten. Mit einer *Logitech C920 Webcam* wurden Videos vom Gesicht der Probanden mit einer Auflösung von 640 x 480 Pixel übertragen und aufgezeichnet.

Regelsätze für Diagnose und Adaptierung

Zur Erfassung der drei kritischen Zustandsdimensionen wurde die empirisch validierte Multifaktorielle Nutzerzustandsdiagnose von Schwarz (2019) verwendet. Während der Versuchsdurchführung bestimmte diese Diagnosekomponente die Leistung anhand der Korrektheit und Dauer der Aufgabenpräsenz. Leistungseinbrüche wurden diagnostiziert, wenn die in Abschnitt 3.4.3 beschriebenen Vorgaben für die Bearbeitungsdauer überschritten wurden.

Kritische Ausprägungen der Zustandsdimensionen wurden anhand der in Abschnitt 3.5.1 beschriebenen Indikatorausprägungen bestimmt. Die Regeln zur Auslösung der Adaptierungen sind in Tabelle 11 dargestellt. Da zunächst in jeder Versuchsbedingung nur maximal eine vorher festgelegte Adaptierungsstrategie genutzt wurde, war die Auswahl eines Adaptierungsziels nicht erforderlich, da dieser Schritt nur erforderlich ist, wenn aus mehreren möglichen Adaptierungsstrategien dynamisch ausgewählt werden soll (vgl. Abschnitt 3.1.4). Aus demselben Grund waren keine Konflikte zwischen Strategien möglich, so dass auch keine Abgrenzung der Strategien voneinander (vgl. Abschnitt 2.6.4) notwendig war.

Tabelle 11. Regeln zur Auslösung der Adaptierungsstrategien

Adaptierungsstrategie	als kritisch diagnostizierte Zustandsdimension	vorliegende Kontextparameter
Context-Sensitive Help (CSH)	kritisch hohe Beanspruchung	
Automation (AUT)	kritisch hohe Beanspruchung	hohe Mausclickfrequenz
Scheduling (SCH)	kritisch hohe Beanspruchung + falsch gerichtete Aufmerksamkeit	hohe Mausclickfrequenz
Visual Cueing (CUV)	falsch gerichtete Aufmerksamkeit	
Decluttering (DEC)	falsch gerichtete Aufmerksamkeit	
Auditory Cueing (CUA)	kritisch hohe Müdigkeit	

4.1.3 Versuchsdesign

Die konzipierten Adaptierungsstrategien wurden in vier aufeinanderfolgenden, jedoch voneinander unabhängigen Testphasen separat auf ihre Wirksamkeit untersucht. Für die

einzelnen Testphasen wurden Szenarien mit unterschiedlichen Charakteristiken entwickelt, um die jeweils betrachteten Nutzerzustände (hohe Beanspruchung, falsch gerichtete Aufmerksamkeit und passive aufgabenbezogene Müdigkeit) zu induzieren. Abbildung 37 illustriert das Versuchsdesign.

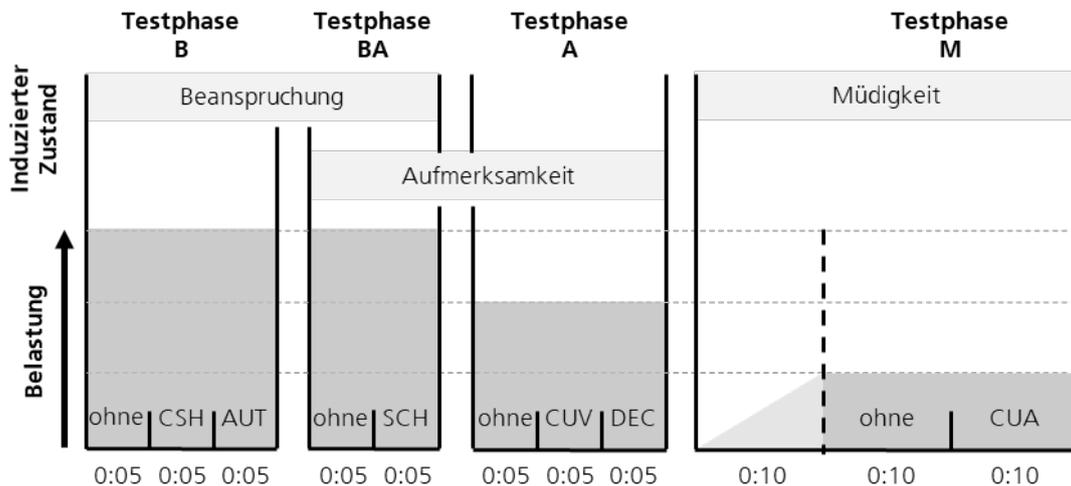


Abbildung 37. Versuchsdesign der Voruntersuchung. Für jede Testphase wurden separate Szenarien gestaltet, die in je eine Kontroll- und ein bis zwei Adaptierungsbedingungen (Abkürzungen siehe Tabelle 11) aufgeteilt wurden.

Ziel der *Testphase Hohe Beanspruchung (B)* war es, die Induktion hoher Beanspruchung zu überprüfen sowie die Funktion, subjektive Wirkung und Nutzerakzeptanz der Adaptierungsstrategien *Context-Sensitive Help* und *Automation* im Vergleich zu einer Bedingung ohne Adaptierung zu untersuchen. Für Testphase B wurde ein 15-minütiges Szenario konzipiert, das Beanspruchung durch eine hohe Aufgabenlast induziert. Eine hohe Aufgabenlast wird erzeugt, indem durch zwei bis drei zeitgleich vorliegende Aufgaben eine kognitiv anspruchsvolle Multitasking-Situation herbeigeführt wird, die gezielt Ressourcen-Konflikte provoziert (vgl. Abschnitt 2.1; Multiple Resource Theory; Wickens, 1984, 2002).

Ziel der *Testphase Hohe Beanspruchung und Falsch Gerichtete Aufmerksamkeit (BA)* war es, die Induktion hoher Beanspruchung und falsch gerichteter Aufmerksamkeit zu überprüfen sowie die Funktion, subjektive Wirkung und Nutzerakzeptanz der Adaptierungsstrategie *Scheduling* im Vergleich zu einer Bedingung ohne Adaptierung zu untersuchen. Für Testphase BA wurde ein 10-minütiges Szenario konzipiert, das sowohl hohe Beanspruchung induziert als auch falsch gerichtete Aufmerksamkeit provoziert. Die Aufgabendichte wurde analog zur Testphase B gewählt, um Beanspruchung zu induzieren. Zusätzlich wurde die Art der Aufgaben variiert, um durch mehr aufmerksamkeitsbindende Aufgaben (Anlegen von NRTTs; vgl. Abschnitt 3.4.3) und das Timing der Aufgaben falsch gerichtete Aufmerksamkeit zu erzeugen. Zudem wurden Kontakte mit widersprüchlichen Informationen (Faker) hinzugefügt, die ihr Verhalten verändern und dadurch eine erneute Identifizierung erfordern.

Ziel der *Testphase Falsch Gerichtete Aufmerksamkeit (A)* war es, die Induktion von falsch gerichteter Aufmerksamkeit zu überprüfen sowie die Funktion, subjektive Wirkung und Nutzerakzeptanz der Adaptierungsstrategien *Visual Cueing* und *Decluttering* im Vergleich zu einer Bedingung ohne Adaptierung zu untersuchen. Für Testphase A wurde ein 15-minütiges Szenario konzipiert, das falsch gerichtete Aufmerksamkeit provoziert. Die Aufgabendichte

wurde gegenüber den zuvor beschriebenen Testphasen halbiert, um eine moderate Belastung zu erreichen. Auch wurden gezielt aufmerksamkeitsbindende Situationen erzeugt, um falsch gerichtete Aufmerksamkeit zu provozieren, sowie Kontakte mit widersprüchlichen Informationen (Faker) hinzugefügt, die ihr Verhalten verändern und dadurch eine erneute Identifizierung erfordern.

Ziel der *Testphase Passive Aufgabenbezogene Müdigkeit (M)* war es, die Induktion von passiver aufgabenbezogener Müdigkeit zu überprüfen sowie die Funktion, subjektive Wirkung und Nutzerakzeptanz der Adaptierungsstrategie *Auditory Cueing* im Vergleich zu einer Bedingung ohne Adaptierung zu untersuchen. Nach Befunden von Mackworth (1948) lässt die Vigilanzleistung bei Radarbeobachtern nach 30 Minuten stark nach. Um sich diesen Effekt für die Induktion der aufgabenbezogenen Müdigkeit zu Nutze zu machen, wurde Testphase M stets als letzte Testphase durchgeführt (vgl. Abbildung 37). Die lange Bearbeitungszeit der Aufgaben (Time on Task) aus der vorangegangenen Durchführung der anderen Testphasen sollte das Auftreten passiver aufgabenbezogener Müdigkeit begünstigen. Es wurde ein 30-minütiges Szenario konzipiert, welches passive aufgabenbezogene Müdigkeit provoziert. Um mögliches Arousal durch die vorangegangene Testphase abzubauen, wurde zunächst eine 10-minütige Transitionsphase durchlaufen, die in der Datenanalyse nicht berücksichtigt wurde. Da Leistungseinbrüche (und damit auch Adaptierungen) in dieser Monotoniephase aufgrund der reduzierten Stimulusdichte seltener auftreten, wurde die Dauer der darauffolgenden Kontroll- und Versuchsbedingungen auf jeweils 10 Minuten verdoppelt, um eine ausreichende Anzahl von Beobachtungen erzeugen zu können. Außerdem wurde die Aufgabendichte gegenüber der moderaten Beanspruchung in Testphase Aufmerksamkeit nochmals etwa halbiert. Die Belastung blieb durchgehend gering und die Aufgaben größtenteils unkritisch. Auf Bekämpfungsaufgaben wurde gänzlich verzichtet, um dem Auftreten passiver aufgabenbezogener Müdigkeit nicht durch zeitkritische Aktivitäten entgegenzuwirken.

Die Modulation der Belastung erfolgte innerhalb der Szenarien auf Basis des Cognitive Task Load (CTL)-Modells von Neerinx (2003; vgl. Fuchs et al., 2016). Die drei Dimensionen des CTL-Modells – beschäftigte Zeit, Niveau der Informationsverarbeitung und Aufgabenwechsel – wurden in ähnlicher Weise wie bei De Greef und Arciszewski (2009) moduliert, nämlich über (1) das Aufgabenvolumen (Anzahl zu bearbeitender Aufgaben), (2) die Komplexität der Situation (Anzahl an Kontakten mit widersprüchlichen Informationen; „Faker“) und (3) die Variation der aufmerksamkeitsbindenden Aufgaben (Anlegen von NRTTs; vgl. Abschnitt 3.4.3). Tabelle 12 zeigt die Anzahl und Verteilung der Aufgabenarten in den verschiedenen Testphasen der Voruntersuchung.

Tabelle 12. Anzahl der Aufgabenarten nach Testphase

Testphase	Aufgabendichte	Identifizieren	NRTT	Warnen	Bekämpfen	Faker
B	4 Aufg./min	27 (9/Bed.)	6 (2/Bed.)	15 (5/Bed.)	12 (4/Bed.)	keine
BA	4 Aufg./min	18 (9/Bed.)	6 (3/Bed.)	8 (4/Bed.)	8 (4/Bed.)	4 (2/Bed.)
A	2 Aufg./min	18 (6/Bed.)	6 (2/Bed.)	3 (1/Bed.)	3 (1/Bed.)	3 (1/Bed.)
M	0.9 Aufg./min	12 (6/Bed.)	2 (1/Bed.)	4 (2/Bed.)	keine	keine

In einem Innersubjekt-Design wurden in einer Sitzung ein Training und vier aufeinanderfolgende Testphasen durchgeführt. In jeder Testphase wurden die von Schwarz (2019) validierten Zustandsdimensionen separat oder kombiniert induziert (Abbildung 37). Die Zuteilung der Adaptierungsstrategien erfolgte gemäß den von ihnen adressierten Zustandsdimensionen (vgl. Abbildung 31). Die jeweiligen Testphasen wurden in gleich lange Abschnitte aufgeteilt, zwischen denen als unabhängige Variable die Adaptierungsstrategie als Innersubjektfaktor variiert wurde. Pro Versuchsbedingung wurde nur eine Adaptierungsstrategie aktiviert. Zusätzlich wurde in jeder Testphase eine Kontrollbedingung ohne aktive Adaptierungsstrategie ergänzt.

Zur Vermeidung von Reihenfolgeeffekten wurde der Versuchsplan entsprechend einem reduzierten Lateinischen Quadrat gestaltet, in dem sowohl die Testphasen als auch die Bedingungen innerhalb der Testphasen in ihrer Reihenfolge permutiert wurden (vgl. Anhang A.2). Von der Permutation ausgenommen war die Testphase Müdigkeit. Da für die Induktion der passiven aufgabenbezogenen Müdigkeit eine lange Bearbeitungszeit von Aufgaben (Time on Task) erforderlich ist, wurde diese Phase stets als letztes durchgeführt.

4.1.4 Versuchsablauf

Zunächst wurde den Probanden eine Einverständniserklärung (Anhang A.3) vorgelegt, in der sie informiert wurden, dass die Teilnahme am Experiment freiwillig ist und die Auswertung der Daten anonym erfolgt. Nachdem diese gelesen und unterschrieben war, wurden die Kontaktflächen des Zephyr BioHarness3-Multisensor-Brustgurt desinfiziert und angefeuchtet, um die Leitfähigkeit zu verbessern. Dann legten die Probanden den Brustgurt an. Anschließend wurde ein Fragebogen in elektronischer Form vorgelegt, in dem demografische Daten, Erfahrung mit Computerspielen und das aktuelle Befinden (Müdigkeit, Motivation, emotionaler Zustand) abgefragt wurden (Anhang A.4). Eine schriftliche Instruktion der Aufgabe (Anhang A.5) sollte sorgfältig gelesen werden, der Versuchsleiter stand für Rückfragen zur Verfügung. Schließlich wurden Eye Tracker und Emotionserkennung kalibriert.

In einer 5-minütigen Trainingsphase zu Beginn der Sitzung bearbeiteten die Probanden unter Anleitung des Versuchsleiters ein Übungsszenario, in dem jede Teilaufgabe mindestens einmal vorkam. Im Anschluss folgte, wie von Bruder und Schwarz (2019) empfohlen, eine 2-minütige Baseline-Phase, in der die Aufgaben bei moderater Beanspruchung selbständig bearbeitet wurden. Dabei wurden Baseline-Werte für die physiologischen Indikatoren erfasst, die den unkritischen Zustand widerspiegeln, so dass eine Auswertung dieser Maße auf Basis der Abweichungen von der Baseline erfolgen kann (vgl. Abschnitt 3.5.1). Diese Baseline wurde, da in relativ unbeeinträchtigtem Zustand gemessen, für die Diagnose in allen Testphasen herangezogen. Das Training-/Baseline-Szenario wurde – abgesehen von den ermittelten Baseline-Werten – nicht in der Datenanalyse berücksichtigt.

Schließlich wurden die vier Testphasen mit den Adaptierungen und Kontrollbedingungen in der durch das Rotationsschema vorgegebenen Reihenfolge (siehe Anhang A.2) durchgeführt. Vor jeder Testphase wurde der Proband via Informationsblatt (siehe Anhang A.6) über die zu erwartenden Adaptierungen instruiert. Nach jeder Adaptierungsbedingung wurde ein Fragebogen (siehe Anhang A.7) in elektronischer Form automatisiert angezeigt. Die Probanden schätzten darin – analog zum Validierungsexperiment der Zustandsdiagnose (Fuchs et al., 2016) – ihre Anstrengung, ihre Müdigkeit und den emotionalen Zustand subjektiv ein. Die Bewertungen wurden, wie bereits in vorangegangenen Untersuchungen (z. B. Witt et al., 2012; Schwarz, 2019), mit der Kategorienunterteilungsskala (Heller, 1982) vorgenommen. Diese 15-

stufige Skala ist in fünf verbale Oberkategorien mit je drei Abstufungen unterteilt und wurde so konzipiert, dass sie differenzierte und reliable Beurteilungen von Empfindungen ermöglicht (Heller, 1982; Keilhacker, 2013). Weiterhin wurde mit den Post-Test-Fragebögen subjektives Feedback zu Effektivität und Situationsangemessenheit der jeweils aktiven Adaptierungsstrategie erhoben. Dazu wurde nach den Adaptierungsbedingungen jeweils erfragt, ob die Adaptierung nach Meinung des Nutzers:

- einen subjektiven Einfluss auf die Leistung hatte,
- einen subjektiven Einfluss auf die adressierte Dimension des Nutzerzustands hatte,
- zu angemessenen Zeitpunkten aufgetreten ist und
- zu angemessenen Zeitpunkten beendet wurde.

Unter jeder Frage wurde ein Feld für freie Kommentare dargeboten. Während des Versuchs protokollierte die Versuchsleitung zudem Auffälligkeiten, Unregelmäßigkeiten oder relevante Beobachtungen in einem Versuchsprotokoll (Anhang A.8). Die gesamte Versuchsdauer betrug pro Proband rund 150 Minuten.

4.1.5 Datenaufbereitung

Adaptierungsbedingungen, in denen keine Adaptierungen aktiviert wurden, weil die entsprechenden Regeln (vgl. Abschnitt 4.1.2) nicht auslösten, wurden aus der Auswertung entfernt. Hier konnten die Adaptierungen keinen Einfluss auf die abhängigen Variablen nehmen. Dadurch verringerte sich die Stichprobengröße für die jeweilige Adaptierungsstrategie (siehe Tabelle 13, Spalte 4).

Tabelle 13. Stichprobengröße der vier Testphasen mit Adaptierungen

Testphase	Induzierte Zustandsdimension	Adaptierung	Probanden bei denen Adaptierungen aufgetreten sind (N = 30)	Probanden, die die aufgetretenen Adaptierungen bemerkt haben (N = 30)
B	Hohe Beanspruchung	Context-Sensitive Help	27	20
		Automation	22	22
BA	Hohe Beanspruchung, falsch gerichtete Aufmerksamkeit	Scheduling	19	10
A	Falsch gerichtete Aufmerksamkeit	Visual Cueing	20	18
		Decluttering	25	24
M	Passive aufgabenbez. Müdigkeit	Auditory Cueing	9	9

Von der Untersuchung der subjektiven Beurteilung der Adaptierungsstrategien wurden sowohl diejenigen Probanden ausgeschlossen, bei denen die Adaptierung nicht aufgetreten ist, als auch diejenigen, die angaben, keine Adaptierung bemerkt zu haben, da diesen Probanden dann auch keine verlässliche Beurteilung möglich war (siehe Tabelle 13, rechte Spalte).

4.1.6 Statistische Analysen

Statistische Analysen wurden mit SPSS (Version 25) durchgeführt. Zu jedem inferenzstatistischen Test wurden die Voraussetzungen für seine Anwendung überprüft. Per Konvention wurde das

Signifikanz-Niveau für alle statistischen Tests auf $\alpha = .05$ gesetzt. Um einer Alphafehler-Kumulierung entgegenzuwirken, war eine Bonferroni-Korrektur notwendig, wenn mehrere Adaptierungsbedingungen mit der gleichen Kontrollbedingung verglichen wurden (Testphasen B und A). Die Bonferroni-Korrektur verringert jedoch die Teststärke und erhöht so die Wahrscheinlichkeit falsch-negativer Ergebnisse. Deshalb werden auch marginale Signifikanzen als statistische Trends interpretiert und diskutiert, wenn die Effektstärke mindestens auf einen mittelgroßen Effekt hinweist. Als Maß für die Effektstärke wurde Pearsons r verwendet. Ein Effekt von $r = .10$ gilt dabei als klein, $r = .30$ ist ein mittlerer Effekt und $r = .50$ stellt einen großen Effekt dar (Cohen, 1988).

Um die Wirkung der Adaptierung auf den subjektiven Nutzerzustand zu untersuchen, wurde die Kontrollbedingung der Testphasen mit den einzelnen Adaptierungsbedingungen verglichen. Die inferenzstatistische Analyse des subjektiven Nutzerzustands umfasste die Fragebogen-Items *Anstrengung* und *Müdigkeit*, die in den Post-Test-Fragebögen nach jeder Bedingung erhoben wurden (vgl. Anhang A.7). Da kein Vergleich der Adaptierungen untereinander angestrebt war, wurden t -Tests für abhängige Stichproben herangezogen sofern die Voraussetzungen erfüllt waren. Andernfalls wurde der Wilcoxon-Vorzeichen-Rangtest für abhängige Stichproben durchgeführt. Welcher Test jeweils durchgeführt wurde, ist anhand des berichteten statistischen Kennwerts erkennbar: Wird ein t -Wert berichtet, konnte bei diesem Vergleich von einer Normalverteilung der Messwertdifferenzen ausgegangen werden und es wurde ein t -Test für abhängige Stichproben durchgeführt. Ein z -Wert kennzeichnet hingegen die Verwendung des Wilcoxon-Vorzeichen-Rangtests aufgrund fehlender Normalverteilung. Für die Testphasen BA und M, in denen die Kontrollgruppe nur mit einer Adaptierungsbedingung verglichen wurde, wurde von einer Signifikanz ausgegangen, wenn der p -Wert unter dem Alpha-Niveau von $\alpha = .05$ lag. In den Testphasen B und A wurden die Daten der Kontrollgruppe für jede Zustandsdimension mit zwei Adaptierungsstrategien verglichen, weshalb das Alpha-Niveau hier nach Bonferroni auf $\alpha = .025$ halbiert wurde.

Die Analyse der subjektiven Beurteilung der Adaptierungsstrategien erfolgte deskriptiv. Für die Untersuchung von Reihenfolgeeffekten sollte eine Varianzanalyse mit Messwiederholung durchgeführt werden, für die Kontrolle dieser Effekte eine Kovarianzanalyse. Da für beide Modelle die Voraussetzung der Normalverteilung nicht erfüllt war, wurden bivariate Korrelationen nach Pearson zwischen dem Messzeitpunkt und den Zustandsdimensionen berechnet.

4.2 Ergebnisse und Diskussion

Ziel der Voruntersuchung war die Überprüfung der Funktion des technischen Konzepts und die Ermittlung geeigneter Versuchsbedingungen und Untersuchungsparameter für die Hauptexperimente. Dafür wurde ein Versuchsdesign mit vier voneinander unabhängigen Testphasen genutzt, in denen die jeweils betrachteten Nutzerzustände induziert wurden.

Die detaillierten Ergebnisse der Voruntersuchung für die verschiedenen Testphasen und Post-hoc-Analysen werden aus Gründen der Übersichtlichkeit in Anhang B dargestellt.

Angesichts der Ergebnisse durchgeführter Post-hoc-Analysen zur Untersuchung von Reihenfolgeeffekten ist nicht davon auszugehen, dass die Reihenfolge der Testphasen einen Einfluss auf die Dauer und Anzahl der kritisch ausgeprägten Nutzerzustandsdimensionen hatten, weshalb diese in der Diskussion vernachlässigbar sind. Lediglich für die kumulierte Dauer falsch gerichteter Aufmerksamkeit gab es nicht-signifikante Hinweise auf eine Verbesserung nach der

ersten Testphase, was möglicherweise auf Lerneffekte zurückzuführen ist. Die Lernkurve wird daher in den Hauptexperimenten durch eine Verlängerung der Trainingsphase abgeflacht. Im Folgenden werden die Ergebnisse für die vier Testphasen noch einmal kurz zusammengefasst und dann diskutiert.

4.2.1 Testphase B

Ziel der Testphase B war zunächst, die Induktion hoher Beanspruchung und die Funktion und Auslösung der entsprechenden Adaptierungsstrategien zu überprüfen. Im Vergleich zu den Testphasen mit geringer Belastung war die Beanspruchung der Versuchspersonen signifikant höher (zur Unterscheidung zwischen Belastung und Beanspruchung siehe Abschnitt 2.5.3). Deshalb ist davon auszugehen, dass der Mechanismus zur Induktion von Beanspruchung grundsätzlich funktionierte. Allerdings wurden nur 22.2% der Zeit kritisch hohe Beanspruchung diagnostiziert. Auch fiel der subjektive Beanspruchungsgrad relativ gering aus: Nur 31% der Probanden gaben an, dass sie sich stark oder sehr stark anstrengen mussten (Durchschnittswert 8.13 auf einer Skala von 1 bis 15). Das äußerte sich auch darin, dass bei einigen Versuchspersonen keine Beanspruchungsadaptierungen auftraten (Context-Sensitive Help wurde bei 3 Probanden nicht ausgelöst, Automation bei 8). Auch bei den übrigen Probanden traten die Adaptierungen durchschnittlich nur knapp vier Mal auf, was vermuten lässt, dass die Aufgabendichte und/oder Anzahl an Ablenkungsaufgaben zu niedrig war. Daher sollte in künftigen Untersuchungen die Belastung erhöht werden.

Ein weiteres Ziel war die Untersuchung der subjektiven Wirkung und Nutzerakzeptanz der genutzten Strategien. Dabei zeigte sich, dass Context-Sensitive Help entgegen der Erwartung zu subjektiv höherer Beanspruchung führte, was unter anderem in der Umsetzung des Adaptierungsmechanismus begründet sein kann. Versuchspersonen kommentierten, dass die Unterstützung oft erst auftrat, wenn der Kontakt bereits wahrgenommen und in Bearbeitung war. Tatsächlich wurde, wenn die Bedingungen (Leistungseinbruch und die Diagnose kritisch hoher Beanspruchung) erfüllt waren, Context-Sensitive Help erst beim Anklicken eines Kontaktes aktiviert. So können Versuchspersonen sich durch die Verarbeitung der zusätzlichen textuellen Information eventuell mehr beansprucht gefühlt haben. Aufgrund des Feedbacks der Versuchspersonen und der Tatsache, dass nicht alle Versuchspersonen (20 von 27) die ausgelöste Strategie bemerkten, werden bei einer erneuten Untersuchung Anpassungen an der Gestaltung von Context-Sensitive Help vorgenommen. Die Hilfe sollte deutlicher dargestellt sowie früher und häufiger ausgelöst werden. Da auch die adäquate Auswahl einer Aufgabe durch den exekutiven Engpass beeinträchtigt sein kann, sollte die Strategie nicht nur bei bereits ausgewählten Kontakten auslösen, sondern auch bei solchen Kontakten, auf welche die Aufmerksamkeit vermutlich nicht gerichtet ist.

Die Strategie Automation wurde durchschnittlich vier Mal ausgelöst und von allen Versuchspersonen bemerkt, bei denen sie auslöste. Zudem war die subjektive Müdigkeit mit Automation signifikant geringer als in der Kontrollbedingung. Dieser kontraintuitive Befund kann auf Automationsprobleme (vgl. Abschnitt 2.3) hinweisen. Eine Erklärung kann die hohe Salienz der roten Hinweise („Badges“; vgl. Abbildung 33) sein. Vier Versuchspersonen kommentierten, dass die Badges an den Kontakten ablenkend wirkten. Von einer Versuchsperson wurden diese als „bestrafend“ kommentiert. Dennoch empfand die überwiegende Mehrheit der Versuchspersonen (72.7%) die Automationsstrategie als hilfreich. Da die Badges Kontakten mit niedriger Bearbeitungspriorität eine hohe Salienz verleihen und dadurch ablenkend wirken können, sollten in weiteren Untersuchungen die Hinweise auf

automatisch identifizierte Kontakte unauffälliger und weniger salient gestaltet werden. Ferner konnten Versuchsleiter beobachten, dass Probanden es als irritierend empfanden, wenn in Bearbeitung befindliche Kontakte durch Automation identifiziert wurden. Dies sollte in weiteren Experimenten durch Anpassung der Auslösungsregeln verhindert werden.

4.2.2 Testphase BA

Ziel der Testphase BA war zunächst, die Induktion hoher Beanspruchung und falsch gerichteter Aufmerksamkeit zu überprüfen sowie die Funktion und Auslösung der Adaptierungsstrategie Scheduling zu untersuchen. Auch in Testphase BA war die Beanspruchung im Vergleich zu Testphasen, in denen diese nicht induziert wurde, signifikant höher. Allerdings gaben, vergleichbar mit der Testphase B, lediglich 35% der Versuchspersonen an, sich stark oder sehr stark anstrengen zu müssen (Durchschnittswert 8.15 auf einer Skala von 1 bis 15). In Zusammenhang mit der relativ seltenen Diagnose kritisch hoher Beanspruchung (28.4%) ist dies ein Indikator für eine zu geringe Aufgabenbelastung.

Hingegen ist der diagnostizierte Anteil falsch gerichteter Aufmerksamkeit (56.6%) eine gute Basis dafür, um Auswirkungen der Adaptierungen auf den Aufmerksamkeitsfokus zu untersuchen. Durch die Ergänzung von Ablenkungsaufgaben („Faker“) konnte bezüglich falsch gerichteter Aufmerksamkeit jedoch keine hinreichende Abgrenzung zur Testphase B erzielt werden. Es wird vermutet, dass die erhöhte Anzahl niedrig priorisierter Aufgaben die Ausrichtung der Aufmerksamkeit auf die höherpriorisierten Aufgaben in beiden Testphasen gleichermaßen stört. Dadurch wird möglicherweise die visuelle Suche der höherpriorisierten Aufgaben erschwert. So zeigte Wolfe (1998), dass sich die Leistung bei der visuellen Suche durch die Erhöhung von Distraktoren („visual clutter“) stark verringert. Niedrig priorisierte Aufgaben stellen in diesem Fall eine Art von Distraktoren dar. Dies erklärt auch, dass der zeitliche Anteil der falsch gerichteten Aufmerksamkeit in Testphase BA signifikant höher ist als in der Aufmerksamkeitsbedingung, in der zwar ebenfalls Faker vorhanden sind, aber eine geringere Anzahl an Distraktoren vorliegt.

Ein weiteres Ziel war die Untersuchung der subjektiven Wirkung und Nutzerakzeptanz der Scheduling-Strategie. Auf die subjektive Anstrengung wirkte sich das Scheduling nicht aus. Als Erklärung kann der geringe Beanspruchungsgrad dienen. Scheduling wurde konzipiert, um perzeptive Engpässe durch eine Verteilung der Aufgabenlast zu adressieren. Daher kann die Strategie ihre Stärken möglicherweise nur bei wesentlich höherer Beanspruchung ausspielen. Soweit Scheduling zum Einsatz kam, wurden niedrig priorisierte Aufgaben (NRTT und Identifizieren außerhalb der ISR) nur durchschnittlich 6.4 s zurückgehalten. Möglicherweise reicht diese kurze Verzögerung nicht aus, um eine messbare Wirkung auf die Anstrengung zu entfalten. Auch könnten kurzfristige positive Effekte wieder eliminiert worden sein, wenn nach Abschaltung der Strategie eine hohe Anzahl zurückgehaltener Aufgaben auftaucht.

Wie schon bei Automation wirkte sich auch das Scheduling auf die empfundene Müdigkeit aus – sie war mit Scheduling signifikant erhöht. Auch war sie deskriptiv deutlich höher als alle Bedingungen anderer Testphasen (mit Ausnahme der Testphase M, in der passive aufgabenbezogene Müdigkeit induziert wurde). Dieser Effekt lässt sich möglicherweise dadurch erklären, dass kritische Multitasking-Situationen, die das Arousal besonders stark steigern können, durch die Scheduling-Strategie erfolgreich entzerrt wurden.

4.2.3 Testphase A

Ziel der Testphase A war zunächst, die Induktion falsch gerichteter Aufmerksamkeit und die Funktion und Auslösung der entsprechenden Adaptierungsstrategien zu überprüfen. Mit durchschnittlich 21.79% falsch gerichteter Aufmerksamkeit unterschied sich diese Testphase signifikant von den Testphasen B (47.04%) und M (1.21%), jedoch war die Aufmerksamkeit deutlich seltener falsch gerichtet als in Testphase B. Dies untermauert die in der Diskussion von Testphase BA aufgestellte Annahme, dass mit der Erhöhung der Belastung durch Distraktoren auch der Anteil falsch gerichteter Aufmerksamkeit stärker erhöht wird als durch die Maßnahmen, die zur Beeinflussung der Aufmerksamkeit eingesetzt wurden.

Ein weiteres Ziel war die Untersuchung der subjektiven Wirkung und Nutzerakzeptanz der genutzten Strategien. Aufgrund des geringen Auftretens falsch gerichteter Aufmerksamkeit wurden sowohl Visual Cueing als auch Decluttering jedoch relativ selten ausgelöst. Obwohl diese Strategien visuell wirken, wurden sie nicht von allen Probanden wahrgenommen. Daher muss auch in dieser Testphase davon ausgegangen werden, dass die geringe Aufgabendichte und der damit einhergehende geringe Anteil kritischer Zustandsausprägungen über alle Bedingungen hinweg eine Erklärung dafür sind, dass sich keine Wirkung der Adaptierungen auf den subjektiven Nutzerzustand nachweisen ließ.

Trotzdem empfand eine große Mehrheit der Probanden Visual Cueing als hilfreich (77.8%) und leistungssteigernd (61.1%) und gab an, dass die Strategie die Aufmerksamkeit erhöhte (66.7%). Knapp ein Viertel (22.2%) der Teilnehmer gab jedoch an, dass der Hinweispfleil die Aufmerksamkeit reduzierte. Mehrere Versuchspersonen empfanden den Hinweis als nicht eindeutig, weil die Pfeilspitze nicht bis zum zu bearbeitenden Kontakt reichte, sondern sich in der Mitte zwischen Mauszeiger und der wichtigsten Aufgabe befand, um die Richtung anzuzeigen, in welche Richtung die Aufmerksamkeit gelenkt werden sollte. Auch dies kann ein Grund dafür sein, warum die Aufmerksamkeit nicht effektiver ausgerichtet werden konnte. Die Darstellung wird in den Folgeexperimenten daher derart angepasst, dass der Pfeil bis zum Kontakt mit der zu bearbeitenden Aufgabe reicht.

Auch Decluttering wurde von der Mehrheit der Probanden (66.7%) als hilfreich, leistungssteigernd (58.3%) und aufmerksamkeits erhöhend (66.7%) empfunden. Nur rund ein Fünftel (20.8%) der Versuchspersonen gab an, dass die Aufmerksamkeit durch die Strategie reduziert und diese als störend empfunden wurde. Probanden kommentierten, den Wechsel zwischen Aktivierung und Deaktivierung der Adaptierung als irritierend empfunden haben. Die Änderung des Transparenzwerts erfolgte abrupt, sodass die Kontakte bei häufigem Wechseln langsam zu blinken schienen. Die plötzliche Änderung der Saliienz vieler Kontakte kann den beobachtbaren Trend erklären, dass diese Bedingung objektiv beanspruchender war als die Kontrollbedingung. Ein sanfteres Ein- und Ausblenden kann diesen Phänomenen bei zukünftigen Untersuchungen entgegenwirken, könnte jedoch im Gegenzug das Auftreten von Veränderungsblindheit (engl.: Change Blindness; vgl. z. B. Rensink, 2002) – also der Nichtwahrnehmung einer visuellen Veränderung – begünstigen. Veränderungsblindheit tritt häufig auf, wenn ein visueller Stimulus während einer Unterbrechung verändert wird. Bei graduellen Veränderungen (z. B. Einblenden) der Szene kann sie aber auch ohne Unterbrechung auftreten (Simons et al., 2000).

4.2.4 Testphase M

Ziel der Testphase M war zunächst, die Induktion passiver aufgabenbezogener Müdigkeit zu überprüfen sowie die Funktion und Auslösung der Adaptierungsstrategie Auditory Cueing zu untersuchen. Der gewünschte Nutzerzustand konnte in der Testphase M signifikant länger (53.5% der Szenariodauer) als in den Testphasen B (1.9%), BA (0.4%) und A (8.1%) induziert werden. Auch subjektiv fühlten sich Probanden signifikant stärker ermüdet als in den anderen Testphasen. Die diagnostizierte Müdigkeit trat also unverkennbar auf. Jedoch gab es aufgrund der geringen Aufgabendichte nur wenige Leistungseinbrüche, weshalb die Adaptierungsstrategie nur bei wenigen Probanden ausgelöst wurde (12 Auslösungen bei 9 Versuchspersonen).

Ein weiteres Ziel war die Untersuchung der subjektiven Wirkung und Nutzerakzeptanz der Auditory Cueing-Strategie. Die geringe Fallzahl kann eine Erklärung dafür sein, dass anhand der subjektiven Einschätzung der Müdigkeit keine Wirkung der Strategie gezeigt werden konnte. Da Müdigkeit erfolgreich induziert wurde, die Versuchsdauer jedoch relativ kurz war, ist es möglich, dass Versuchspersonen selbstregulierende Strategien anwenden, um der Langeweile zu entgehen. Struk et al. (2016) berichten, dass Traits wie Selbstkontrolle mit einer erhöhten Selbstregulierung einhergehen und so Langeweile reduzieren können.

Eine Möglichkeit zur Steigerung der Auslösungen wäre es, die Strategie bereits dann auslösen zu lassen, wenn Müdigkeit ohne Leistungseinbruch auftritt, um das Arousal zu erhöhen. Dies würde allerdings bedeuten, dass ein Hinweiston auch dann auftreten könnte, wenn gar keine Aufgabe vorliegt. Auditory Cueing wurde jedoch schon jetzt als eher störend empfunden und im qualitativen Feedback als „stressauslösend“ bezeichnet. Eine Häufung auditiver Müdigkeitshinweise ohne Implikationen für die Aufgabe könnte das Vertrauen in die Adaptierung und damit deren Wirksamkeit mindern. Eine Verlängerung der Versuchsdauer zur Erhöhung der Anzahl der Beobachtungen ist in Anbetracht der bereits relativ langen Dauer des Experiments und der von Probanden geäußerten Frustration über die Langeweile in der Monotoniebedingung ebenfalls nicht zu rechtfertigen.

4.3 Schlussfolgerungen

Die Voruntersuchung zeigte, dass die technische Funktion der konzipierten Adaptierungsmechanismen im Zusammenspiel mit der multifaktoriellen Zustandsdiagnose in einer realitätsnahen Aufgabenumgebung grundsätzlich gut funktioniert. Die Aktivierung und Deaktivierung von Adaptierungen basierend auf diagnostizierten Nutzerzuständen und Kontextfaktoren erfolgten wie vorgesehen. Es wurden trotzdem wichtige Erkenntnisse für das weitere Vorgehen in den Hauptexperimenten, insbesondere zur Operationalisierung der Adaptierungsstrategien, zum Experimentaldesign und zur Experimentalaufgabe gewonnen.

Eine wesentliche Erkenntnis aus der Voruntersuchung ist die Wirkweise der Nutzerzustandsinduktion und insbesondere der Zusammenhang zwischen den induzierten Zustandsdimensionen hohe Beanspruchung und falsch gerichtete Aufmerksamkeit. Das Kombinieren der vier einzelnen Experimente in eine Untersuchung mit separaten Testphasen ermöglichte einen inferenzstatistischen Vergleich der in den einzelnen Testphasen aufgetretenen Zustandsdiagnosen. Aus den Ergebnissen konnte abgeleitet werden, dass die Aufgabendichte einen starken Einfluss auf die Aufmerksamkeit hatte. Andererseits erhöhten aber auch Aufgaben, die falsch verteilte Aufmerksamkeit induzieren sollten, die Beanspruchung. So zeigte sich, dass die Zustandsdimensionen Aufmerksamkeit und Beanspruchung nicht trennscharf

unterschieden und induziert werden konnten. Derartige Wechselwirkungen zwischen Zustandsdimensionen sind nachvollziehbar und werden im Konzept der multifaktoriellen Nutzerzustandsdiagnose erwartet.

In der Konsequenz sollten in zukünftigen Untersuchungen sowohl die Aufgabendichte als auch die Anzahl aufmerksamkeitsbindender Aufgaben erhöht werden, um hohe Beanspruchung und falsch gerichtete Aufmerksamkeit gleichzeitig zu induzieren, wie es in der Testphase BA getan wurde. Es kann dann anhand der Anzahl und Dauer der jeweiligen Zustandsdiagnosen untersucht werden, ob die Adaptierungen auf die jeweilig adressierte Zustandsdimension wirken. Die Testphase BA der Voruntersuchung wies jedoch nur einen mittleren Beanspruchungsgrad auf. Dies führte dazu, dass Adaptierungen relativ selten, bei manchen Probanden gar nicht ausgelöst wurden. Bei weiteren Untersuchungen ist daher zusätzlich eine Erhöhung der Aufgabendichte und der Anzahl aufmerksamkeitsbindender Aufgaben ratsam.

Ein weiteres Ziel war die Untersuchung der subjektiven Wirkung und Nutzerakzeptanz der Adaptierungsstrategien. Ein positiver Einfluss auf die subjektive Anstrengung und die subjektive Müdigkeit konnte dabei für keine der Strategien experimentell bestätigt werden. Zwar wirkten sich Scheduling und Automation signifikant auf die empfundene Müdigkeit aus, konnten ihren eigentlichen Zweck, die Reduktion der Anstrengung, aber statistisch nicht erfüllen. Mit Context-Sensitive-Help wiesen die Teilnehmenden sogar einen Trend zu höherer Anstrengung auf.

Für die meisten Adaptierungsstrategien wurde jedoch eine deutliche Diskrepanz zwischen subjektiver Bewertung und dem gemessenen Einfluss auf den subjektiven Nutzerzustand festgestellt. Trotz empirischer Wirkungslosigkeit wurden die Adaptierungen mehrheitlich als hilfreich und leistungssteigernd beurteilt. Lediglich Scheduling und Auditory Cueing stellten Ausnahmen dar. Scheduling wurde zwar als aufmerksamkeitsmindernd empfunden, was sich durch die Kosten der Aufgabenunterdrückung für das Situationsbewusstsein erklären lässt, in Bezug auf Nützlichkeit und Leistung jedoch positiv bewertet. Einzig Auditory Cueing wurde, obwohl selten aufgetreten, von der Mehrzahl der Probanden subjektiv als eher störend und leistungsmindernd bewertet.

Effekte passiver aufgabenbezogener Müdigkeit ließen sich allerdings kaum beobachten. Zwar stieg die Müdigkeit der Probanden in dieser Testphase deutlich an, die Adaptierung für diesen Zustand trat aber trotzdem nur in sehr geringer Zahl auf, was zu einer geringen Teststärke der inferenzstatistischen Analyse führte. Es wird vermutet, dass die Probanden erfolgreich Selbstregulierungsstrategien zur Aufrechterhaltung der Leistung einsetzen konnten. Es ist deshalb davon auszugehen, dass die passive aufgabenbezogene Müdigkeit innerhalb einer realistischen Versuchsdauer zwar wirksam induziert, die Wirkung einer Adaptierung zur Adressierung der kritischen Müdigkeit aber nicht untersucht werden kann.

Im Versuchsablauf zeigte sich außerdem, dass viele Probanden die NRTT-Aufgaben (vgl. Abschnitt 3.4.3) nicht gewissenhaft bearbeiteten, was zu deutlichen Störeffekten führte. Bei den Versuchspersonen, die NRTTs nicht anlegten, waren dauerhafte Leistungseinbrüche zu beobachten, was wiederum das häufige Auslösen von Adaptierungsstrategien begünstigte und eine starke Oszillation der Adaptierungszustände verursachte, wenn die jeweiligen kritischen Ausprägungen des Nutzerzustands nur für kurze Zeit auftraten. Auf Nachfrage, warum NRTT-Aufgaben nicht bearbeitet wurden, gaben Versuchspersonen an, diese schlichtweg übersehen zu haben, da der Fokus mehr auf das Kartensegment gerichtet sei. Ein zusätzlicher Hinweis auf der Karte soll daher zukünftig auf vorhandene NRTT Aufgabe hinweisen, um Störfaktoren zu minimieren bzw. konstant zu halten.

Die aus den Voruntersuchungen gewonnenen Erkenntnisse sowie die abgeleiteten Maßnahmen für die weiteren Experimente sind in Tabelle 14 noch einmal zusammenfassend dargestellt.

Tabelle 14. Erkenntnisse und abgeleitete Maßnahmen aus der Voruntersuchung

Erkenntnis	Maßnahme für das Folgeexperiment
Starke Diskrepanz zwischen überwiegend positiver subjektiver Bewertung und objektiver Wirkung der Adaptierungen (keine oder nicht erwartungskonforme Effekte auf den diagnostizierten Nutzerzustand)	Anpassung der Gestaltung der Adaptierungen, um deren kognitive „Kosten“ zu verringern <ul style="list-style-type: none"> - Automation: Hinweise auf automatisch identifizierte Kontakte unauffälliger und weniger salient gestalten - Automation: Auslöseregeln anpassen, um Verwirrung durch Auslösung zu verringern - Context-Sensitive Help: auch bei Kontakten auslösen, auf welche die Aufmerksamkeit vermutlich nicht gerichtet ist - Decluttering: sanfteres Ein- und Ausblenden der Kontakte - Visual Cueing: Pfeil bis zur zu bearbeitenden Aufgabe verlängern
Passive aufgabenbezogene Müdigkeit kann nicht wirksam untersucht werden	Verzicht auf die Induktion passiver aufgabenbezogener Müdigkeit und auf die dazugehörige Adaptierung Auditory Cueing
Hinweise auf eine Verbesserung falsch gerichteter Aufmerksamkeit nach der ersten Testphase	Längere Dauer des Trainingsszenarios
Hohe Varianz in der Leistung zwischen den Probanden	Steigerung des Schwierigkeitsgrads des Trainingsszenarios
Probanden empfanden die Bedingungen mit hoher Beanspruchung nur mäßig beanspruchend	Erhöhung der Schwierigkeit durch Steigerung der Aufgabendichte
Teils keine oder nur wenige Auslösungen der Adaptierungen	Erhöhung der Schwierigkeit durch Erhöhung von Aufgabendichte und Länge der Bedingungen
Beanspruchung ließ sich nicht induzieren, ohne ebenfalls die falsch gerichtete Aufmerksamkeit zu steigern	Verzicht auf unterschiedliche Testphasen, die verschiedene Zustandsdimensionen induzieren, da keine separate Untersuchung der Konstrukte möglich ist
NRTT-Aufgaben wurden häufig nicht bearbeitet	Ergänzung eines Hinweises auf der Karte, der auf das Vorliegen von NRTT-Aufgaben aufmerksam macht

5 Experiment 1 – Untersuchung der Wirksamkeit der Adaptierungsstrategien

In der Voruntersuchung konnten zahlreiche Erkenntnisse für die Planung und Durchführung der Folgeexperimente gewonnen werden. Folglich wurden Modellverfeinerungen und Änderungen am Experimentaldesign, der Operationalisierung der Adaptierungsstrategien und der Aufgabe vorgenommen, um die möglichen Ursachen für die beschriebenen Unstimmigkeiten und Probleme zu adressieren. Die Erkenntnisse aus den Voruntersuchungen boten insbesondere Gelegenheit, von den Probanden rückgemeldete Schwächen in Bezug auf Darstellung und Funktion der Adaptierungsstrategien (vgl. Abschnitt 3.5.2) zu adressieren. Änderungen an der Operationalisierung der Adaptierungsstrategien werden im Apparat (Abschnitt 5.1.1) beschrieben. Das angepasste Versuchsdesign wird in Abschnitt 5.1.3 erläutert.

Nachdem in der Voruntersuchung keine wesentliche Wirkung auf den subjektiven Nutzerzustand nachgewiesen wurde, soll nun in Experiment 1 die objektive Wirkung der einzelnen Adaptierungsstrategien auf Problemzustände, Aufgabenbearbeitung und Leistung untersucht werden. Demgemäß wurden für dieses Experiment folgende Hypothesen aufgestellt:

- H1: Die Adaptierungen verringern das Auftreten von Leistungseinbrüchen:
- H1a: In den Bedingungen mit Adaptierung ist die Anzahl der Leistungseinbrüche (AV) geringer als in der jeweiligen Kontrollbedingung ohne Adaptierung.
 - H1b: In den Bedingungen mit Adaptierung ist die durchschnittliche Dauer der Leistungseinbrüche (AV) geringer als in der jeweiligen Kontrollbedingung ohne Adaptierung.
 - H1c: In den Bedingungen mit Adaptierung ist die kumulierte Dauer der Leistungseinbrüche (AV) geringer als in der jeweiligen Kontrollbedingung ohne Adaptierung.
- H2: Die Adaptierungen sorgen für eine effizientere Bearbeitung von Aufgaben:
- H2a: In den Bedingungen mit Adaptierung ist die Anzahl der bearbeiteten Aufgaben (je Aufgabentyp) (AV) höher als in der jeweiligen Kontrollbedingung ohne Adaptierung.
 - H2b: In den Bedingungen mit Adaptierung ist die durchschnittliche Dauer der Aufgabenpräsenz (je Aufgabentyp) (AV) geringer als in der jeweiligen Kontrollbedingung ohne Adaptierung.
 - H2c: In den Bedingungen mit Adaptierung ist die kumulierte Dauer der Aufgabenpräsenz (je Aufgabentyp) (AV) geringer als in der jeweiligen Kontrollbedingung ohne Adaptierung.
- H3: Die Adaptierungen vermindern das Auftreten diagnostizierter kritischer Nutzerzustände:
- H3a: In den Bedingungen mit Adaptierung ist die Anzahl der kritischen Nutzerzustandsdiagnosen (AV) geringer als in der jeweiligen Kontrollbedingung ohne Adaptierung.
 - H3b: In den Bedingungen mit Adaptierung ist die durchschnittliche Dauer der kritischen Nutzerzustandsdiagnosen (AV) geringer als in der jeweiligen Kontrollbedingung ohne Adaptierung.
 - H3c: In den Bedingungen mit Adaptierung ist die kumulierte Dauer der adressierten kritischen Nutzerzustandsdiagnosen (AV) geringer als in der jeweiligen Kontrollbedingung ohne Adaptierung.

Wie schon in der Voruntersuchung diente allein die *aktive Adaptierungsstrategie* als unabhängige Variable (UV) und wurde als Innersubjektfaktor manipuliert. Die abhängigen Variablen (AV) basieren auf der Funktionsweise der dynamischen Adaptierung. Auf Basis der Erkenntnisse aus bisherigen Ansätzen adaptiver MMI (vgl. Abschnitt 2.4) wird für das Konzept des dynamischen Adaptierungsmanagements angenommen, dass die Adaptierung das Auftreten von kritischen Nutzerzuständen reduziert und sich dies durch einen Rückkopplungsmechanismus im Sinne eines biokybernetischen Loops positiv auf die Leistung auswirkt. Die Wirkung auf die Leistung kann einerseits über die Anzahl der korrekt bearbeiteten Aufgaben und die Dauer der Aufgabenpräsenz operationalisiert werden, zudem können Anzahl und Dauer der von der Diagnosekomponente detektierten Leistungseinbrüche herangezogen werden. Wie bereits in Abschnitt 3.4.3 beschrieben, werden Leistungseinbrüche immer dann angenommen, wenn Teilaufgaben nicht innerhalb eines vorgegebenen Zeitlimits bearbeitet werden. Um die Wirkung der Adaptierungen auf die Leistung zu erfassen, wurden Anzahl und Dauer sowohl von bearbeiteten Aufgaben als auch von Leistungseinbrüchen herangezogen. Der Nutzerzustand kann dann als wirksam adressiert betrachtet werden, wenn sich die Anzahl kritischer Zustandsdiagnosen, die durchschnittliche Dauer von Episoden mit kritischem Nutzerzustand und/oder die Gesamtzeit mit kritischen Nutzerzuständen (kumulierte Dauer kritischer Nutzerzustandsepisoden) reduziert. Daraus ergeben sich folgende abhängige Variablen:

- Anzahl der
 - o Leistungseinbrüche
 - o korrekt bearbeiteten Aufgaben
 - o kritischen Nutzerzustandsepisoden
- Durchschnittliche Dauer der
 - o Leistungseinbrüche
 - o korrekt bearbeiteten Aufgaben
 - o kritischen Nutzerzustandsepisoden
- Kumulierte Dauer der
 - o Leistungseinbrüche
 - o korrekt bearbeiteten Aufgaben
 - o kritischen Nutzerzustandsepisoden

Weiterhin wurde der subjektive Nutzerzustand erfasst wie bereits in der Voruntersuchung (vgl. Kapitel 4) beschrieben. Die Beanspruchung wurde auch im vorliegenden Experiment mit dem NASA-TLX-Item „Anstrengung“ erfasst, die passive aufgabenbezogene Müdigkeit mit dem NASA-TLX-Item „Müdigkeit“. Auf eine subjektive Bewertung der Ausrichtung der Aufmerksamkeit wurde verzichtet, da eine Selbsteinschätzung hier als nicht verlässlich erachtet wurde. Auch die subjektive Beurteilung der Adaptierungsstrategien erfolgte analog zur Voruntersuchung explorativ.

5.1 Methode

5.1.1 Stichprobe

$N = 24$ Mitarbeitende des Fraunhofer FKIE nahmen am Experiment teil. Zwölf davon hatten bereits an der Voruntersuchung teilgenommen. Sechs Personen waren weiblich und 18 männlich. Die Teilnehmenden waren zwischen 19 und 48 Jahren alt ($M = 31.96$; $SD = 7.18$).

62.5% der Probanden gaben an, sich sehr gut oder gut mit Computerspielen auszukennen, 37.5% hatten wenige oder gar keine Kenntnisse mit Computerspielen.

5.1.2 Apparatus

Der Versuchsaufbau und die technische Ausstattung entsprachen dem Apparatus der Voruntersuchung (vgl. Abschnitt 4.1.2), jedoch wurden aufgrund der dort gemachten Erfahrungen einige Modellverfeinerungen und Änderungen an der Aufgabe vorgenommen. Auf die Strategie Auditory Cueing wurde aus genannten Gründen verzichtet, ansonsten kamen aber alle in Abschnitt 3.5.2 beschriebenen Adaptierungsstrategien erneut zur Anwendung. Auf Basis der Beobachtungen und des qualitativen Probandenfeedbacks aus der Voruntersuchung wurden einige Regeln für die Auslösung und die Operationalisierungen der visuell ersichtlichen Adaptierungsstrategien Context-Sensitive Help, Automation, Visual Cueing und Decluttering angepasst.

Experimentalaufgabe

Die Experimentalaufgabe entsprach auch in diesem Experiment der in Abschnitt 3.4.3 beschriebenen Aufgabe. Für dieses Experiment wurden jedoch basierend auf den Erfahrungen der Voruntersuchung zwei 24-minütige Szenarien konzipiert, die hohe Beanspruchung und falsch gerichtete Aufmerksamkeit gleichzeitig induzieren sollten und in insgesamt sechs jeweils 8-minütige Bedingungen unterteilt wurden (fünf Adaptierungsbedingungen und eine Kontrollbedingung). Für die Induktion der kritischen Nutzerzustände wurden die Techniken genutzt, die bereits in der Testphase BA der Voruntersuchung zum Einsatz kamen: Die Art der Aufgaben wurde so variiert, dass durch aufmerksamkeitsbindende (NRTT-) Aufgaben und das Timing der Aufgaben falsch gelenkte Aufmerksamkeit provoziert werden sollte. Zudem traten erneut Kontakte mit widersprüchlichen Informationen (Faker) auf, die ihr Verhalten verändern und dadurch eine erneute Identifizierung erfordern.

Während der Voruntersuchung berichteten Probanden selbst in der Beanspruchungsphase nur moderate Beanspruchung. Es wird jedoch angenommen, dass die Adaptierungen nur nahe der Leistungsgrenze wirksam unterstützen, weil erst dann die Selbstregulierung versagt. Daher wurde die Aufgabendichte um ca. 40% erhöht. Insgesamt mussten nun 296 Aufgaben bearbeitet werden, die gleichmäßig auf die Szenarien und Bedingungen verteilt wurden (Tabelle 15).

Tabelle 15. Anzahl der Aufgabenarten in Experiment 1

Aufgaben- dichte	Identifizieren (inkl. Faker)	NRTT	Warnen	Bekämpfen	Faker
6.16 Aufg./min.	152 (25.33/Bed.)	20 (3.33/Bed.)	68 (11.33/Bed.)	56 (9.33/Bed.)	10 (1.66/Bed.)

Anpassungen der Regelsätze für die Adaptierung

Aufgrund von Beobachtungen und Feedback von Probanden im Rahmen der Voruntersuchung wurden folgende Änderungen an den Regeln zur Auslösung der Adaptierungen vorgenommen:

- Die Auslösung von *Automation* wurde so angepasst, dass die Strategie erst auslöste, wenn die bearbeitete Aufgabe höher priorisiert war als „Identifizieren außerhalb der ISR“ (100; vgl. Tabelle 6). Diese Änderung verhinderte die Automation dieser Aufgaben, wenn der Nutzer solche gerade bearbeitete.

- Bei *Visual Cueing* wurde in diesem Experiment nur auf Tracks hingewiesen, die eine höhere Priorität als „Identifizieren außerhalb der ISR“ (100; vgl. Tabelle 6) haben, da Probanden in der Voruntersuchung angemerkt hatten, dass die Strategie zu früh und häufig auftrat.

Im Übrigen konnten die Regeln zur Auslösung der Adaptierungen aus der Voruntersuchung übernommen werden. Der Regelsatz für Experiment 1 ist in Tabelle 16 noch einmal vollständig dargestellt.

Tabelle 16. Regeln zur Auslösung der Adaptierungsstrategien in Experiment 1

Adaptierungsstrategie	Kritisch ausgeprägte Zustandsdimension	Vorliegende Kontextparameter
Context-Sensitive Help	kritisch hohe Beanspruchung	
Automation	kritisch hohe Beanspruchung	hohe Mausclickfrequenz + bearbeitete Aufgabe höher priorisiert als „Identifizieren außerhalb der ISR“
Scheduling	kritisch hohe Beanspruchung und falsch gerichtete Aufmerksamkeit	hohe Mausclickfrequenz
Visual Cueing	falsch gerichtete Aufmerksamkeit	Aufgabe vorhanden mit höherer Priorität als „Identifizieren außerhalb der ISR“
Decluttering	falsch gerichtete Aufmerksamkeit	

Anpassung der Darstellung von NRTT-Aufgaben

Auf Basis der Voruntersuchungen wurde ein Hinweis auf das Vorhandensein von NRTT-Aufgaben ergänzt (vgl. Abbildung 38), um zu vermeiden, dass NRTT-Aufgaben übersehen oder ignoriert werden. Lag eine NRTT-Aufgabe vor, wurde der Mauscursor durch einen kleinen Umschlag ergänzt, der auf die Aufgabe hinweisen sollte. Zur Vereinfachung der Leistungsmessung wurde zudem ergänzt, dass NRTT-Aufgaben nicht gleichzeitig bearbeitet werden können. Diese Begrenzung wurde so implementiert, dass ein Umschlag sich nur dann öffnete, wenn keine unbearbeitete NRTT-Aufgabe bereits geöffnet war.

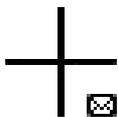


Abbildung 38. Hinweis auf NRTT am Mauscursor

Anpassung der Operationalisierung von Context-Sensitive Help

Probanden regten an, dass die Hilfestellung durch die Context-Sensitive Help-Strategie nicht erst erscheinen sollte, wenn ein Kontakt ausgewählt wurde. Da der exekutive Engpass bereits die Auswahl der zu bearbeiteten Aufgabe beeinträchtigen kann, wurde die Operationalisierung dahingehend angepasst, dass die Labels bei Aktivierung der Strategie an allen Kontakten mit Aufgaben der höchsten Priorität dargestellt werden (vgl. Abbildung 39). Somit ist leicht ersichtlich, welche Aufgabe als nächstes durchzuführen ist und an welchen Kontakten diese Aufgabe auftritt. Hatte eine NRTT-Aufgabe die höchste Priorität, wurde nicht mehr nur der Umschlag im NRTT-Bereich, sondern auch der Hinweis-Umschlag am Mauszeiger (Abbildung 38) orange eingefärbt, damit das Auslösen der Strategie nicht nur in der Peripherie erkennbar war.

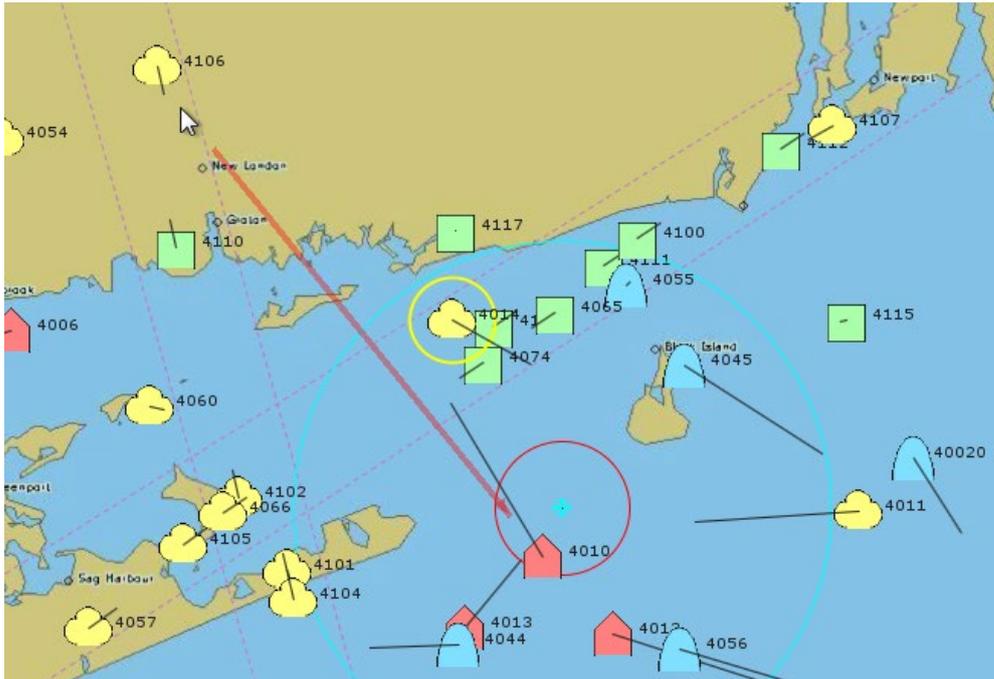


Abbildung 41. Darstellung der Adaptierungsstrategie Visual Cueing in Experiment 1

Operationalisierung von Decluttering

Ursprünglich wurde das Decluttering lediglich zwischen zwei Zuständen – 100% sichtbar und 30% sichtbar – umgeschaltet. Bei häufiger Aktivierung und Deaktivierung führt diese Lösung zu Oszillationseffekten, die von vielen Probanden als unruhig empfunden wurden. Die Übergänge wurden daher in diesem Experiment sanfter gestaltet, indem ein gradueller Übergang zwischen den Zuständen realisiert wurde: Bei Auslösen der Strategie wurde die Transparenz der betreffenden Kontakte jede Sekunde in 10%-Stufen bis auf 70% erhöht, so dass der Übergang 6 Sekunden dauerte. Bei Deaktivierung des Decluttering wurde die Transparenz alle 500 ms in 10%-Schritten wieder verringert, bis nach 3 Sekunden wieder eine solide Darstellung des Kontakts erreicht war.

5.1.3 Versuchsdesign

Die Voruntersuchung zeigte, dass die technische Adaptierung an passive aufgabenbezogene Müdigkeit innerhalb einer unter den gegebenen Bedingungen realistischen Versuchsdauer nicht wirksam untersucht werden kann. Entsprechend wurde in den Folgeexperimenten auf die Induktion dieser Zustandsdimension verzichtet. Da die Strategie Auditory Cueing ausschließlich der Adressierung der passiven aufgabenbezogenen Müdigkeit diene, entfiel diese ebenfalls, sodass in den weiteren Experimenten fünf Adaptierungsstrategien zur Adressierung von zwei Zustandsdimensionen (hohe Beanspruchung und falsch gerichtete Aufmerksamkeit) untersucht wurden.

Falsch gerichtete Aufmerksamkeit ließ sich in der Voruntersuchung besser durch die gesteigerte Aufgabendichte in der Testphase B erzeugen als durch andere Maßnahmen. Daher wurde entschieden, hohe Beanspruchung und falsch gerichtete Aufmerksamkeit gemeinsam zu induzieren (wie bereits in der kombinierten Testphase BA der Voruntersuchung; vgl. Abschnitt 4.1.3). Somit sind keine separaten Testphasen mehr erforderlich.

Aus diesen Änderungen ergab sich ein deutlich vereinfachter Versuchsplan mit fünf Adaptierungsbedingungen, in denen die Adaptierungsstrategien jeweils einzeln als unabhängige Variable aktiviert wurden und separat mit einer Kontrollbedingung ohne Adaptierung verglichen wurden. Um den Probanden eine Möglichkeit zur Erholung zu geben, wurden zwei Szenarien mit je 24 Minuten Dauer und identischer Aufgabendichte erstellt. Diese wurden in sechs gleich lange Abschnitte aufgeteilt (Abbildung 42). Die Dauer der einzelnen Versuchsbedingungen wurde somit auf 8 Minuten ausgedehnt, um die Anzahl der beobachtbaren Adaptierungen zu erhöhen. Zwischen den Szenarien erholten sich die Probanden, bis sie ihre Bereitschaft zur Fortsetzung anzeigten, jedoch nicht mehr als 5 Minuten.

Ein unerwünschter Effekt der Aufteilung der Szenarien in verschiedene Bedingungen war, dass Aufgaben nicht immer innerhalb der Phase beendet wurden und aufgrund solcher *Überhangaufgaben* die Anzahl der innerhalb einer Phase bearbeiteten Aufgaben nicht konstant war. Die Verwendung separater Szenarien war jedoch zum einen aus versuchsökonomischen Gründen nicht möglich, zum anderen hätte der nötige technische Neustart von Szenarien nach jeder Bedingung zu einer erheblichen Verlängerung der Versuchsdauer geführt. Um die Nachteile des gewählten Vorgehens zu minimieren und um Reihenfolgeeffekte zu vermeiden, wurden sowohl Szenarien als auch die Versuchsbedingungen ausbalanciert (siehe Versuchsplan; Anhang C.1). Verzerrungen der abhängigen Variablen durch Überhangaufgaben wurden dadurch reduziert, dass diese gänzlich von der Auswertung ausgeschlossen wurden.

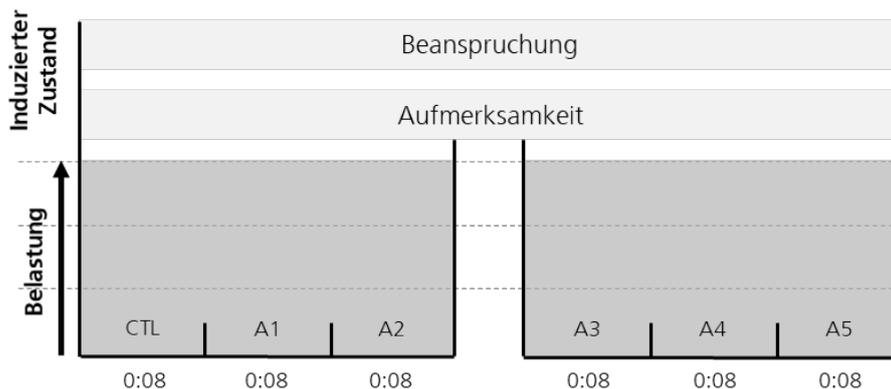


Abbildung 42. Versuchsdesign von Experiment 1. Zwei Szenarien wurden in sechs 8-minütige Bedingungen aufgeteilt: eine Kontrollbedingung (CTL) und fünf Adaptierungsbedingungen (A1 bis A5) in balancierter Reihenfolge.

5.1.4 Versuchsablauf

Die Versuchsvorbereitung bis zur Kalibrierung der Sensorik war identisch mit der Voruntersuchung (vgl. Abschnitt 4.1.4). Lediglich die Instruktionen wurden leicht überarbeitet (siehe Anhang C.2). In einer Trainingsphase bearbeiteten die Probanden anschließend unter Anleitung des Versuchsleiters ein Übungsszenario, in dem jede Aufgabe mindestens einmal vorkam. Die Dauer der Trainingsphase wurde im Vergleich zur Voruntersuchung von 5 auf 13 Minuten verlängert und die Aufgabenbelastung darin sukzessive auf ein moderates Niveau gesteigert, um ein höheres Performanzniveau zu erreichen und die Varianz in der Leistung zwischen den Probanden zu reduzieren. Während des Trainings konnten die Versuchspersonen Fragen stellen und wurden vom Versuchsleiter angeleitet, um ein umfassendes Verständnis aller Aufgaben zu gewährleisten. Zum Ende der Trainingsphase wurde die Aufgabenbelastung reduziert, damit die Probanden alle Aufgaben abarbeiten konnten und so keine Aufgaben in die

anschließende Baseline-Aufzeichnung mitnahmen. Die physiologische Baseline für die Nutzerzustandsdiagnose wurde im direkten Anschluss an das Training über 2 Minuten aufgezeichnet. Dabei bearbeiteten die Probanden die Aufgaben bei moderater Beanspruchung selbständig, um einen unkritischen Zustand darzustellen. Das Training-/Baseline-Szenario wurde (abgesehen von den gemessenen Baseline-Werten) nicht in der Datenanalyse berücksichtigt.

Schließlich wurden die zwei Szenarien mit jeweils drei Versuchsbedingungen in der durch das Rotationsschema vorgegebenen Reihenfolge durchlaufen. Vor jeder Bedingung wurde der Proband via Informationsblatt (vgl. Anhang C.3) über die jeweils zu erwartende Adaptierung instruiert. Nach jeder Adaptierungsbedingung wurde ein Post-Test-Fragebogen in elektronischer Form automatisiert angezeigt (vgl. Anhang C.4). Dieser entsprach dem Fragebogen der Voruntersuchung, jedoch wurde die Frage „Wie bewerten Sie den Grad Ihrer Müdigkeit?“ durch „Wie bewerten Sie den Grad der Erschöpfung durch die Aufgabe?“ ersetzt, um eine Abgrenzung zu der schlafbezogenen Müdigkeit und eine bessere Annäherung an das Diagnose-Konstrukt der passiven aufgabenbezogenen Müdigkeit zu erreichen. Die gesamte Versuchsdauer betrug pro Proband rund 100 Minuten.

5.1.5 Datenaufbereitung

Adaptierungsbedingungen, in denen keine Adaptierungen aktiviert wurden, weil die entsprechenden Regeln nicht auslösten, wurden aus der Auswertung entfernt, da hier die Adaptierungen keinen Einfluss auf die abhängigen Variablen nehmen konnten. Dadurch verringerte sich die Stichprobengröße für die jeweilige Adaptierungsstrategie. Aufgrund der erhöhten Aufgabendichte in den beiden für diese Untersuchung genutzten Szenarien, lösten die verschiedenen Adaptierungen fast immer mindestens einmal bei jedem Probanden aus. Lediglich bei Automation gab es zwei Probanden, bei denen die Adaptierungsstrategie in der jeweiligen Phase nicht aktiv war. Daher wurden alle Vergleiche mit der Adaptierungsbedingung Automation mit einer Stichprobengröße von $n = 22$ gerechnet. Für alle anderen Vergleiche konnten die Daten aller $N = 24$ Personen analysiert werden.

Von der Untersuchung der subjektiven Beurteilung der Adaptierungsstrategien wurden sowohl diejenigen Probanden ausgeschlossen, bei denen die Adaptierung nicht aufgetreten ist, als auch diejenigen, die angaben, keine Adaptierung bemerkt zu haben, da diesen Probanden keine verlässliche Beurteilung der Strategien möglich war. Für die Strategie Automation reduzierte sich die Stichprobe für die subjektive Beurteilung dadurch auf $n = 19$, für Scheduling auf $n = 12$.

Weiterhin wurden nur Aufgaben und Leistungseinbrüche betrachtet, deren Start- und Endpunkte innerhalb der gleichen Bedingung auftraten. Aufgaben oder Leistungseinbrüche, die über Bedingungsgrenzen hinweg aktiv waren (*Überhangaufgaben*), wurden von der Auswertung ausgeschlossen, um – wie oben erwähnt – Verzerrungen in der Datenanalyse zu reduzieren.

Ein Proband musste bei der Untersuchung der Adaptierungswirkung auf die kumulierte und durchschnittliche Präsenzdauer von NRTT-Aufgaben zusätzlich ausgeschlossen werden, weil er in vier der sechs Bedingungen keine NRTT-Aufgabe innerhalb der Dauer der Bedingung bearbeitete. Aus diesem Grund wies dieser Proband für beide Variablen fehlende Werte auf und wurde nicht in die Analyse einbezogen. Dies führt zu einer Stichprobengröße von $n = 21$ bei dem Vergleich der Kontrollbedingung mit der Adaptierungsbedingung Automation und einer Stichprobengröße von $n = 23$ bei den übrigen Vergleichen auf den beiden Variablen kumulierte und durchschnittliche Präsenzdauer von NRTT-Aufgaben.

Aufgrund eines Programmierfehlers in der Aufzeichnung der Aufgaben und Leistungseinbrüche wurden nicht alle Aufgaben und Leistungseinbrüche korrekt erfasst. Die korrekten Daten konnten jedoch größtenteils aus Aufzeichnungen der Rohdaten rekonstruiert werden. Lediglich die Rekonstruktion von Anzahl und kumulierter Dauer der Leistungseinbrüche war nicht möglich. Die Untersuchung der Hypothesen H1a und H1c wurde daher durch eine Post-hoc-Analyse substituiert, bei der stattdessen die Anzahl *rechtzeitig bearbeiteter* Aufgaben (d.h. die Anzahl der Aufgaben, die keinen Leistungseinbruch ausgelöst haben) untersucht wurde. Weil man von einer negativen Korrelation zwischen der Anzahl rechtzeitig bearbeiteter und der Anzahl schlecht/gar nicht bearbeiteter Aufgaben (d.h. Aufgaben, bei denen Leistungseinbrüche ausgelöst wurden) ausgehen kann, sollten sich durch diese Analyse Hinweise bezüglich Hypothese H1a ergeben, auch wenn diese nicht direkt getestet werden konnte.

Wenn Probanden alle bearbeiteten Aufgaben auch rechtzeitig bearbeiteten, wurden keine Leistungseinbrüche erfasst. Da diese Beobachtungen zur Vermeidung von Verzerrungen trotzdem in die Ergebnisse einfließen sollten, wurde die durchschnittliche Dauer der Leistungseinbrüche in solchen Fällen mit 0.00 s gewertet. Bei der Untersuchung des kritischen Nutzerzustands wurde ebenso vorgegangen: Wenn bei Probanden kein kritischer Nutzerzustand erfasst wurde, wurde die durchschnittliche Dauer kritischer Zustände mit 0.00 s gewertet.

5.1.6 Statistische Analysen

Statistische Analysen wurden mit der Statistiksoftware SPSS (Version 25) durchgeführt. Zu jedem inferenzstatistischen Test wurden die Voraussetzungen für seine Anwendung überprüft. Per Konvention wurde das Signifikanz-Niveau für alle statistischen Tests auf $\alpha = .05$ gesetzt, sofern keine Bonferroni-Korrektur zur Neutralisierung der Alphafehler-Kumulierung notwendig war.

Ein Post-hoc-Vergleich der Anzahl rechtzeitig bearbeiteter Aufgaben zwischen der Kontrollbedingung und den Adaptierungsbedingungen diente als indirekter Test der Hypothese H1a. Zur Untersuchung der Hypothese H1b wurde die durchschnittliche Dauer von Leistungseinbrüchen in der Kontrollbedingung mit der in den Adaptierungsbedingungen verglichen. Die Hypothese H1c konnte aus schon genannten Gründen nicht überprüft werden (siehe Abschnitt 5.1.5). Um die Leistung bei der unterstützten Aufgabe (Hypothese H2) zu untersuchen, wurde getestet, ob sich Anzahl (Hypothese H2a), kumulierte (Hypothese H2b) und durchschnittliche Dauer der Aufgabenpräsenz (Hypothese H2c) zwischen der Kontrollbedingung und den Adaptierungsbedingungen unterschieden hat.

Zur Analyse der durch RASMUS festgestellten Nutzerzustandsausprägungen (Hypothese H3) wurden die Häufigkeit (Hypothese H3a), die durchschnittliche Dauer (Hypothese H3b) und die kumulierte Dauer (Hypothese H3c) der kritischen Ausprägungen von Beanspruchung und Aufmerksamkeit in den Adaptierungsbedingungen mit denen in der Kontrollbedingung verglichen. Kritisch ausgeprägte Müdigkeit konnte nicht analysiert werden, weil diese bei vielen Probanden gar nicht und wenn nur sehr selten auftrat (alle *Mittelwerte* ≤ 1). Zusätzlich zu den diagnostizierten kritisch ausgeprägten Zustandsausprägungen wurde untersucht, ob Probanden ihren subjektiven Nutzerzustand in den Adaptierungsbedingungen anders bewerteten als in der Kontrollbedingung. Hierzu wurden die Werte der den einzelnen Bedingungen nachgeschalteten Fragebögen miteinander verglichen.

Für alle Vergleiche zwischen der Kontrollbedingung und den Adaptierungsbedingungen wurden t-Tests für abhängige Stichproben gerechnet, sofern die Voraussetzungen für diese erfüllt

waren. Bei Nichterfüllung der Voraussetzungen wurden Wilcoxon-Vorzeichen-Rangtests für abhängige Stichproben durchgeführt. Welcher Test jeweils durchgeführt wurde, kann anhand des berichteten statistischen Kennwerts erkannt werden: Wenn ein t -Wert berichtet wird, konnte bei diesem Vergleich von einer Normalverteilung der Messwertdifferenzen ausgegangen werden und daher wurde auch ein t -Test für abhängige Stichproben durchgeführt. Ein berichteter z -Wert deutet auf eine Verwendung des Wilcoxon-Vorzeichen-Rangtests aufgrund fehlender Normalverteilung hin. Da fünf Adaptierungsstrategien mit der Kontrollbedingung verglichen wurden, galt ein Vergleich als signifikant, wenn der jeweilige p -Wert das Bonferroni-korrigierte Alpha-Niveau von $\alpha = .01$ unterschritt. Da die Bonferroni-Korrektur die Teststärke verringert und so die Wahrscheinlichkeit falsch-negativer Ergebnisse erhöht, werden auch marginale Signifikanzen als statistische Trends interpretiert und diskutiert, wenn die Effektstärke mindestens auf einen mittelgroßen Effekt hinweist. Als Maß für die Effektstärke wurde Pearsons r verwendet. Ein Effekt von $r = .10$ gilt dabei als klein, $r = .30$ ist ein mittlerer Effekt und $r = .50$ stellt einen großen Effekt dar (Cohen, 1988).

Zur Überprüfung der Normalverteilungsannahmen wurden der Shapiro-Wilk Test auf Normalverteilung, Werte der Schiefe und der Kurtosis herangezogen. Es wurde von einer Verletzung der jeweiligen Normalverteilungsannahme ausgegangen, wenn der Quotient aus dem Betrag der Schiefe und ihrem Standardfehler und/oder der Quotient aus dem Betrag der Kurtosis und ihrem Standardfehler größer als 1.96 war (Field, 2009). Zusätzlich konnte bei Signifikanz des Shapiro-Wilk-Tests mit einem Alpha-Niveau von $\alpha = .05$ nicht von einer Normalverteilung der Daten ausgegangen werden.

5.2 Ergebnisse und Diskussion

Ziel von Experiment 1 war es, die Wirkung der einzelnen Adaptierungsstrategien anhand von drei Hypothesen auf die Leistung (H1), die Aufgabenbearbeitung (H2) und kritische kognitive Problemzustände (H3) zu untersuchen. Nachdem sich aus der Voruntersuchung (Kapitel 4) zahlreiche Erkenntnisse für die Planung und Durchführung der Folgeexperimente ergaben, wurden zuvor Modellverfeinerungen und Änderungen am Experimentaldesign, der Operationalisierung der Adaptierungsstrategien und der Aufgabe vorgenommen, um mögliche Ursachen für die beschriebenen Unstimmigkeiten und Probleme zu adressieren (siehe Abschnitt 5.1).

Die detaillierten Ergebnisse von Experiment 1 werden aus Gründen der Übersichtlichkeit in Anhang D dargestellt. Anhang D.1 beschreibt die Ergebnisse der hypothesenprüfenden Untersuchung. Die Ergebnisse der durchgeführten Post-hoc-Analysen sind in Anhang D.2 aufgeführt.

Zunächst interessierte, ob die auf Basis der Voruntersuchungen erfolgten Änderungen am Versuchsdesign die gewünschten Effekte erzielten. Tatsächlich konnte durch die höhere Aufgabendichte zusätzliche hohe Beanspruchung induziert werden. Der zeitliche Anteil der diagnostizierten hohen Beanspruchung erhöhte sich wesentlich von 32% in der Voruntersuchung auf 50% in Experiment 1. Interessant sind im Vergleich dazu die subjektiven Bewertungen der Anstrengung. Trotz Anstieg der Aufgabendichte um 40% erhöhte sich die gefühlte Anstrengung kaum merklich und verblieb auf mittlerem Niveau – dies auch nicht nur für die Kontrollbedingung ($M = 8.91$), sondern über alle Bedingungen hinweg. Möglicherweise lag eine Antworttendenz zur Mitte vor, die zu einer Verzerrung führte, oder die Probanden antworteten aus Neigung zur positiven Selbstdarstellung (eine Ausprägung sozialer Erwünschtheit). Gestützt wird diese Vermutung durch Beobachtungen der Versuchsleiter, die

des Öfteren bemerkten, dass Probanden, die augenscheinlich hoch beansprucht waren, trotzdem nur einen mittelhohen Wert angaben.

Der Zeitanteil falsch gerichteter Aufmerksamkeit erhöhte sich durch die Erhöhung der Beanspruchung ebenfalls nicht in gleichem Maße, sondern der Unterschied zur Voruntersuchung war statistisch nicht signifikant. Er lag jedoch mit 53% noch immer auf hohem Niveau, so dass auch für Experiment 1 von erfolgreicher Induktion falsch gerichteter Aufmerksamkeit ausgegangen werden kann.

Auffällig ist, dass sich die Häufigkeit der Auslösung zwischen den betrachteten Adaptierungen stark unterschied. Diese Unterschiede verdeutlichen die verschiedenen Wirkweise der einzelnen Strategien.

5.2.1 Wirkung auf Leistungseinbrüche (Hypothese H1)

Wie in Abschnitt 5.1.5 erläutert, konnten die Wirkung der Adaptierungen auf die Leistung (H1a) aufgrund eines Logging-Fehlers lediglich indirekt anhand der Anzahl der rechtzeitig bearbeiteten Aufgaben untersucht werden. Die Daten für die Untersuchung von Hypothese H1b (durchschnittliche Dauer der Leistungseinbrüche) konnten jedoch erfolgreich aus den Aufzeichnungen der Rohdaten rekonstruiert werden. Hypothese H1c konnte aufgrund der fehlerhaften Datenerfassung nicht untersucht werden.

Anzahl der rechtzeitig bearbeiteten Aufgaben (indirekter Test der Hypothese H1a)

Als indirekter Test der Hypothese H1a, mit der die Anzahl der Leistungseinbrüche untersucht werden sollte, wurde eine Post-hoc-Analyse durchgeführt (vgl. Abschnitt D.2.2), bei der die Anzahl rechtzeitig bearbeiteter Aufgaben (d. h. die Anzahl der Aufgaben, die keinen Leistungseinbruch ausgelöst haben) betrachtet wurde. Dabei konnten jedoch keine statistisch signifikanten Unterschiede zwischen Adaptierungsbedingungen und Kontrollbedingung festgestellt werden. Hypothese H1a konnte daher nicht bestätigt werden. Es wurden jedoch zwei statistische Trends ausgemacht. Zum einen führte das Visual Cueing tendenziell zu mehr rechtzeitig bearbeiteten Warn-Aufgaben, was durchaus originäres Ziel der Strategie war. Zum anderen führte die Decluttering-Strategie zu weniger rechtzeitig bearbeiteten NRTT-Aufgaben. Dies kann erneut dadurch erklärt werden, dass Probanden dazu neigten, das aufwendige Anlegen von NRTTs gegenüber anderen Aufgaben zu vernachlässigen. Eben diese anderen Aufgaben wurden nun durch das Decluttering in ihrer Salienz so erhöht, dass dieses Verhalten möglicherweise bestärkt wurde.

Durchschnittliche Dauer der Leistungseinbrüche (Hypothese H1b)

Entsprechend der Hypothese H1b wurde eine geringere durchschnittliche Dauer der Leistungseinbrüche bei der Adaptierung im Vergleich zur Kontrollbedingung erwartet. Diese Hypothese konnte für keine Teilaufgabe bestätigt werden (vgl. Tabelle 17), jedoch konnten statistische Trends mit mittleren Effektgrößen beobachtet werden, die im Folgenden diskutiert werden.

Bei Bekämpfungsaufgaben wiesen die meisten Probanden (je nach Bedingung zwischen 63% und 88%) gar keine Leistungseinbrüche auf, weshalb die Mediandauer der Leistungseinbrüche bei 0.0 s lag. Daher sind die durchweg fehlenden Signifikanzen bei der Dauer von Bekämpfungsaufgaben vermutlich auf Deckeneffekte aufgrund der hohen Priorität von Bekämpfungsaufgaben und möglicherweise auch auf deren vergleichsweise geringe Anzahl zurückzuführen. Die Probanden scheinen demnach in der Lage, die wichtigsten Aufgaben ohne Unterstützung ausführen.

Tabelle 17. Bestätigungsmuster der Hypothese H1b für die einzelnen Adaptierungsstrategien je Teilaufgabe

Adaptierungsstrategie	Durchschnittliche Dauer von Leistungseinbrüchen bei			
	Bekämpfungen	Warnungen	Identifizierungen	NRTTs
Context-Sensitive Help	d	†	✘	✘
Automation	✘	d	d	✘
Scheduling	✘	d	d	✘
Visual Cueing	d	†	d	✘
Decluttering	✘	†	d	✘

Anmerkungen: ✘ - keine Bestätigung der Hypothese; † – statistischer Trend in Richtung der Hypothese; d – deskriptiver, aber nicht statistischer Hinweis auf Bestätigung der Hypothese (auf Mittelwerten basierend)

Die Leistungseinbrüche bei Warn-Aufgaben profitierten am meisten von den Adaptierungsstrategien. Mit Context-Sensitive Help, Visual Cueing und Decluttering zeigten gleich drei Adaptierungsstrategien einen statistischen Trend zu kürzeren Leistungseinbrüchen. Dabei handelt es sich allesamt um Strategien, welche die Salienz des zu warnenden Kontakts deutlich erhöhen, wenn ein Leistungseinbruch vorliegt. Dieses Vorgehen scheint sich positiv auf die zügige Bearbeitung des Kontakts ausgewirkt zu haben. Die besonders hohe Reduzierung des Medians in den Adaptierungsbedingungen spricht dafür, dass die Adaptierungen vor allem besonders lange Leistungseinbrüche verhindert haben. Die Effekte waren zwar nur marginal signifikant, wiesen aber dennoch eine mittlere Effektstärke auf. Scheduling und Automation hingegen wirken sich nicht direkt auf die Leistungseinbrüche von Warnaufgaben aus.

Auf die Dauer der Leistungseinbrüche bei Identifizierungsaufgaben hatte keine der Strategien einen wesentlichen Einfluss. Fehler in der Identifizierungsaufgabe erzeugten in allen Adaptierungsbedingungen mit Ausnahme der Automationsbedingung deskriptiv kürzere Leistungseinbrüche als in der Kontrollbedingung, vermutlich aufgrund der hohen Varianz in der Kontrollbedingung wurden diese Effekte jedoch nicht signifikant.

Allerdings führte die automatisierte Identifizierung in der Automationsbedingung zu einem statistischen Trend zu längeren Leistungseinbrüchen bei der Bearbeitung von NRTT-Aufgaben. Eine mögliche Erklärung ist, dass Probanden nach den Änderungen durch die Automation Zeit aufwandten, um ihr mentales Modell zu aktualisieren. Auch neigten Probanden grundsätzlich dazu, das aufwendige Anlegen von NRTTs gegenüber anderen Aufgaben zu vernachlässigen, auch wenn deren Priorität geringer war. Möglicherweise wurde selbst die zeitlich unbeschränkte manuelle Verifizierung automatisierter Identifizierungen (vgl. Abschnitt 3.5.2) höher priorisiert als die Bearbeitung der NRTT-Aufgaben.

5.2.2 Wirkung auf die Aufgabenbearbeitung (Hypothese H2)

Hypothese H2 und deren Unterhypothesen zu Anzahl, durchschnittlicher und kumulierter Dauer der Aufgabenpräsenz konnten für keine der Adaptierungsstrategien bestätigt werden. Bei Identifizierungs- und NRTT-Aufgaben traten keine signifikanten Unterschiede zwischen der Kontrollbedingung und den Adaptierungsbedingungen auf – weder bei der Anzahl noch bei der durchschnittlichen oder kumulierten Dauer. Selbiges gilt für Warnaufgaben (Tabelle 18).

Tabelle 18. Bestätigungsmuster der Hypothese H2 für die einzelnen Adaptierungsstrategien bei Identifizierungs- und NRTT-Aufgaben

Adaptierungsstrategie	Identifizierungsaufgaben			NRTTs		
	Anzahl	Durchschnittliche Dauer	Kumulierte Dauer	Anzahl	Durchschnittliche Dauer	Kumulierte Dauer
Context-Sensitive Help	✘	✘	✘	✘	✘	✘
Automation	d	d	d	d	✘	✘
Scheduling	d	d	d	✘	✘	d
Visual Cueing	d	d	✘	d	✘	✘
Decluttering	†	d	d	d	✘	✘

Adaptierungsstrategie	Bekämpfungsaufgaben			Warnaufgaben		
	Anzahl	Durchschnittl. Dauer	Kumulierte Dauer	Anzahl	Durchschnittl. Dauer	Kumulierte Dauer
Context-Sensitive Help	d	✘	✘	d	d	d
Automation	d	✘	✘	✘	d	d
Scheduling	d	✘	✘	d	d	d
Visual Cueing	d	d	✘	d	d	d
Decluttering	d	✘	✘	d	d	d

Anmerkungen: ✘ - keine Bestätigung der Hypothese; † – statistischer Trend in Richtung der Hypothese; d – deskriptiver, aber nicht statistischer Hinweis auf Bestätigung der Hypothese (auf Mittelwerten basierend)

Für zwei Strategien konnten allerdings statistische Trends beobachtet werden: Mit Decluttering wurden, dem Zweck der Strategie entsprechend, marginal signifikant mehr Identifizierungsaufgaben bearbeitet als in der Kontrollbedingung. Die Automationsstrategie führte jedoch wider Erwarten zu einer tendenziell längeren Aufgabenpräsenz bei NRTT-Aufgaben. Dieses Ergebnis kann in Anbetracht des Mechanismus der Strategie erneut nur dadurch erklärt werden, dass Probanden auch die manuelle Verifizierung automatisierter Identifizierungen (vgl. Abschnitt 3.5.2) höher priorisierten als die Bearbeitung der NRTT-Aufgaben.

Auch bei den Bekämpfungsaufgaben gab es durch die Adaptierungen keine Effekte hinsichtlich der bearbeiteten Anzahl. Hier liegt offenbar ein Deckeneffekt vor, der in der hohen Priorität dieser Teilaufgabe begründet liegen kann. Diese Erklärung wird dadurch gestützt, dass der Median der Anzahl bearbeiteter Bekämpfungsaufgaben in allen Bedingungen gleich ist.

Signifikante Unterschiede zur Kontrollbedingung erzeugte die Adaptierungsstrategie Decluttering, die allerdings dazu führte, dass Bekämpfungsaufgaben länger präsent waren als in der Kontrollbedingung. Rein deskriptiv war das auch bei allen anderen Strategien der Fall. Dieses zunächst überraschend erscheinende Phänomen kann durch Beobachtung der Probanden bei der Aufgabenbearbeitung nachvollzogen werden: Da Bekämpfungen die höchste Priorität hatten, wurden häufig alle anderen Tätigkeiten frühzeitig unterbrochen, sobald sich eine Bekämpfungsaufgabe anbahnte, um beim Erreichen der Weapon Range unverzüglich zu reagieren. Im Mittel wurden Bekämpfungen nur 2.69 s nach Eintritt des Kontakts in die Weapon Range ausgeführt, obwohl 10 s erlaubt waren, bevor ein Leistungseinbruch ausgelöst wurde.

Bei aktivem Decluttering ist die Salienz des anfliegenden Kontakts offenbar soweit verringert, dass das beschriebene Antizipationsverhalten teils verhindert wurde. Probanden wandten sich dem Bekämpfungsprozess in dem Fall vermutlich erst zu, wenn der Kontakt bei Erreichen der

Weapon Range wieder normal salient wurde, anstatt die Bekämpfung bereits vorher durch Unterbrechung anderer Aufgaben und Auswahl des Kontakts vorzubereiten. Diese Verhaltensänderung kann durchaus erwünscht sein, wenn dadurch verhindert wird, dass Probanden ihre Aufmerksamkeit unnötig früh auf erwartete (aber noch nicht eingetretene) Bekämpfungsaufgaben fokussieren und andere Aufgaben dann nicht mehr bearbeiten.

Außerdem führte die längere Bearbeitungsdauer nicht zu einem Anstieg von verspäteten Bearbeitungen: In der Decluttering-Bedingung wurde eine nahezu identische Anzahl von Bekämpfungsaufgaben rechtzeitig (d.h., innerhalb der Zeitvorgabe von 10 s) bearbeitet. Die durchschnittliche Präsenzdauer der Bekämpfungsaufgaben lag mit Decluttering ($M = 3.49$ s, $SD = 1.25$ s) immer noch deutlich unter der Dauer zur Auslösung eines Leistungseinbruchs. Decluttering verzögerte demnach zwar die Bearbeitung von Bekämpfungsaufgaben (im zulässigen Rahmen), verhinderte dadurch aber auch eine unnötig frühe Fokussierung, wodurch eine angemessenere Verteilung kognitiver Ressourcen begünstigt werden könnte.

5.2.3 Wirkung auf den diagnostizierten Nutzerzustand (Hypothese H3)

Hohe Beanspruchung

Die Anzahl der Diagnosen kritischer Beanspruchung konnte durch keine der fünf Adaptierungsstrategien im Vergleich zur Kontrollbedingung signifikant verringert werden. Demnach ist die Hypothese H3a für kritische Beanspruchung nicht bestätigt. Eine mögliche Ursache ist der Auslösemechanismus für Adaptierungen. Eine Adaptierungsstrategie wird nur dann aktiviert, wenn ein Leistungseinbruch mit mindestens einer kritischen Zustandsdiagnose zusammenfällt. Es ist also ein kritischer Zustand erforderlich, damit eine Anpassungsstrategie überhaupt ausgelöst werden kann. Daher ist es naheliegender, dass sich die Wirkung der Adaptierungen auf die Beanspruchung in der Dauer der kritischen Zustandsdiagnosen zeigt. Sinkt die durchschnittliche Dauer durch Adaptierung, können die Problemzustände auch häufiger wieder auftreten.

Tatsächlich waren Probanden bei Visual Cueing gemäß Diagnose weniger lang beansprucht als in der Kontrollbedingung, obwohl die Strategie primär zur Lenkung der Aufmerksamkeit entwickelt wurde. Der Effekt war signifikant in Bezug auf die durchschnittliche Dauer (H3b) und marginal signifikant mit mittelgroßer Effektstärke in Bezug auf die kumulierte Dauer (H3c) kritischer Beanspruchungsepisoden. Diese Beobachtung kann damit erklärt werden, dass hohe Beanspruchung und falsch gerichtete Aufmerksamkeit sich nicht unabhängig voneinander verhalten, sondern stark miteinander in Wechselwirkung stehen, wie bereits in den Ergebnissen der Voruntersuchung deutlich wurde. Dort wurde falsch gerichtete Aufmerksamkeit erfolgreicher durch die Erhöhung der Arbeitsbelastung als durch das Hinzufügen ablenkender Elemente zum Szenario induziert, was darauf hindeutet, dass die beiden Konstrukte eng miteinander verbunden sind. Das Visual Cueing befreit den Nutzer zudem von der Suche und Identifizierung der Aufgabe mit der höchsten Priorität und verringert dadurch die Arbeitsbelastung. Zeigt der Pfeil beispielsweise auf eine ID-Aufgabe, weiß der Nutzer, dass dies derzeit die Aufgabe mit der höchsten Priorität ist und kann folgern, dass zu diesem Zeitpunkt keine Warnungen oder Bekämpfungen erforderlich sind.

Auch bei Scheduling zeigte sich ein statistischer Trend mit mittelgroßem Effekt dahingehend, dass Beanspruchungszustände durchschnittlich schneller beendet werden konnten als in der Kontrollbedingung. Bei den anderen Adaptierungsbedingungen zeigen sich zwar keine statistisch signifikanten Unterschiede im Vergleich mit der Kontrollbedingung, jedoch ist sowohl die durchschnittliche als auch die kumulierte Dauer kritischer Beanspruchung in der

Kontrollbedingung durchweg höher als in den Adaptierungsbedingungen. Lediglich bei Decluttering ist der Mittelwert der durchschnittlichen Dauer höher als in der Kontrollbedingung, der Median allerdings nicht. Die starke Diskrepanz zwischen dem Mittelwert und dem Median deutet dabei auf eine Verzerrung des Mittelwertes durch Ausreißerwerte hin.

Zusammenfassend kann die Hypothese H3b für Visual Cueing bei kritischer Beanspruchung als bestätigt angesehen werden. Es zeigte sich für Visual Cueing auch ein statistischer Trend, der für Hypothese H3c spricht. Für Scheduling haben sich ebenfalls Hinweise auf eine Bestätigung der Hypothese H3b ergeben. Für die anderen Adaptierungsstrategien können die Hypothesen H3b und H3c für die kritisch hohe Beanspruchung nur deskriptiv, nicht aber statistisch als bestätigt angesehen werden.

Falsch gerichtete Aufmerksamkeit

Auch die Anzahl diagnostizierter Episoden falsch gerichteter Aufmerksamkeit (Hypothese H3a) wurde durch keine der fünf Adaptierungsstrategien signifikant reduziert. Hier zeigte sich sogar ein Anstieg kritischer Zustandsepisoden. So war die Aufmerksamkeit bei Decluttering signifikant häufiger falsch verteilt als in der Kontrollbedingung. Der gleiche statistische Trend zeigte sich bei Context-Sensitive Help und bei Visual Cueing. Demnach wurde die Hypothese H3a für die falsch gerichtete Aufmerksamkeit verworfen. Auch hier ist es aufgrund der Auslösemechanismen jedoch naheliegend, dass sich die Wirkung der Adaptierungen eher in der Dauer der kritischen Zustandsdiagnosen äußert.

Tatsächlich konnte die durchschnittliche Dauer der falsch gerichteten Aufmerksamkeit im Vergleich zur Kontrollbedingung statistisch signifikant für Decluttering und marginal signifikant für Context-Sensitive Help und Visual Cueing reduziert werden. Auch ist die durchschnittliche Dauer falsch gerichteter Aufmerksamkeit in den anderen Adaptierungsbedingungen geringer als in der Kontrollbedingung. Demnach kann die Hypothese H3b für Decluttering in der Zustandsdimension falsch gerichtete Aufmerksamkeit als bestätigt angesehen werden. Hinweise auf Bestätigung haben sich ebenfalls für Context-Sensitive Help und Visual Cueing ergeben. Für die anderen Adaptierungsstrategien wurde die Hypothese H3b für die falsch gerichtete Aufmerksamkeit deskriptiv, nicht aber statistisch untermauert.

Entgegen den Erwartungen hat die Automation von Identifizierungsaufgaben die kritische hohe Beanspruchung nur deskriptiv reduziert. Der spezifische Grund bleibt unklar, aber das Ergebnis stimmt mit anderen Befunden in der Automationsforschung überein (z. B. Kaber & Endsley, 2004). Trotzdem fiel das Ergebnis für die Automationsstrategie in Experiment 1 besser aus, nachdem die Darstellung der Strategie angepasst wurde, denn in der Voruntersuchung zeigte sich mit Automation noch ein Trend zu längeren Episoden kritisch hoher Beanspruchung. Solche kognitiven Kosten der Strategie konnten in Experiment 1 nicht mehr festgestellt werden. Dies liegt vermutlich an der weniger salienten Darstellung der Badges bei automatisch identifizierten Tracks. Dass in diesem Experiment dennoch keine positiven Effekte von Automation auf kritische Zustandsausprägungen festgestellt werden konnten, könnte daran liegen, dass die automatisierten Änderungen der Aufgabensituation vom Nutzer zusätzlichen Arbeitsaufwand erfordern, um Änderungen zu erkennen und das mentale Modell zu aktualisieren. Auch Veränderungsblindheit (Rensink, 2002; siehe Abschnitt 4.2.3) kann eine Ursache darstellen.

In Bezug auf die kumulierte Dauer falsch gerichteter Aufmerksamkeit ergaben sich keine signifikanten Unterschiede zwischen den Adaptierungsbedingungen und der Kontrollbedingung. Zwar war sie in den Adaptierungsbedingungen durchweg deskriptiv kürzer als in der Kontrollbedingung (mit Ausnahme von Automation: hier deutet die starke Diskrepanz

zwischen Mittelwert und Median auf eine Verzerrung des Mittelwertes durch Ausreißerwerte hin), jedoch wurden die Unterschiede nicht statistisch signifikant. Demnach ist die Hypothese H3c für falsch gerichtete Aufmerksamkeit auch nur deskriptiv, aber nicht statistisch bestätigt.

Zusammenfassung

Tabelle 19 zeigt das Bestätigungsmuster der Hypothese H3 für die beiden untersuchten Nutzerzustandsdimensionen je Adaptierungsstrategie. Vergleicht man die Ergebnisse mit der Voruntersuchung, fällt auf, dass nun positive Effekte erzielt werden konnten, die zuvor nicht auftraten.

Tabelle 19. Bestätigungsmuster der Hypothese H3 für die einzelnen Adaptierungsstrategien

Adaptierungsstrategie	Beanspruchung			Falsch gerichtete Aufmerksamkeit		
	Anzahl	Durchschnittl. Dauer	Kumulierte Dauer	Anzahl	Durchschnittl. Dauer	Kumulierte Dauer
Context-Sensitive Help	d	d	d	✘	†	d
Automation	d	d	d	d	d	✘
Scheduling	✘	†	d	✘	d	d
Visual Cueing	✘	✓	†	✘	†	d
Decluttering	✘	✘	d	✘	✓	d

Anmerkungen: ✘ - keine Bestätigung der Hypothese; ✓ - Bestätigung der Hypothese; † – statistischer Trend in Richtung der Hypothese; d – deskriptiver, aber nicht statistischer Hinweis auf Bestätigung der Hypothese (auf Mittelwerten basierend)

Die nun signifikanten Ergebnisse in Bezug auf Decluttering und Visual Cueing sowie die statistischen Trends bei Scheduling und Context-Sensitive Help unterstreichen die Wirkung der Veränderungen an Darstellung und Auslösung der Strategien in Experiment 1, die infolge der subjektiven Beurteilungen aus der Voruntersuchung vorgenommen wurden.

Insbesondere Decluttering und Visual Cueing erwiesen sich als wirksam bei der Auflösung kritischer Nutzerzustandsausprägungen, da sie im Vergleich zur Kontrollbedingung signifikant die durchschnittliche Dauer kritischer Zustandsepisoden reduzierten. Zwei weitere Strategien, Scheduling und Context-Sensitive Help, zeigten ähnliche statistische Trends in dieselbe Richtung mit moderaten Effektgrößen. Sie wiesen im Vergleich zur Kontrollbedingung eine marginal signifikant niedrigere durchschnittliche Dauer kritischer Zustandsdiagnosen auf. Die Ergebnisse sprechen dafür, dass die genannten Strategien aufgrund ihrer Veränderung in Bezug auf den Nutzerzustand wirksam sind. Die mittlere Größe dieser nicht signifikanten Effekte deutet darauf hin, dass die Teststärke der Studie höchstwahrscheinlich zu gering war. Eine Replikation des Experiments mit einer größeren Stichprobe wäre erforderlich, um die Wirksamkeit der Anpassungsstrategien weiter zu testen.

An der Scheduling-Strategie wurden keine Veränderungen vorgenommen. Dass Scheduling nun einen mit der Hypothese H3b konformen statistischen Trend erzeugt hat, in der Voruntersuchung aber noch nicht, liegt möglicherweise daran, dass Scheduling seine Wirkung nur bei hoher Beanspruchung entfalten kann. Aufgrund der erhöhten Aufgabendichte (vgl. Abschnitt 5.1.4) bot Experiment 1 häufiger die Möglichkeit, Aufgaben durch Scheduling zurückzuhalten. Evidenz für das Zutreffen dieser Annahme kann anhand der Häufigkeit und durchschnittlichen Dauer des Auftretens von Scheduling gegeben werden (vgl. Tabelle 31 und Tabelle 42): Scheduling trat in Experiment 1 fast doppelt so häufig und mehr als doppelt so lange auf wie in der Voruntersuchung.

Zusammenfassend kann also festgestellt werden, dass die infolge der Voruntersuchung vorgenommenen Veränderungen am Versuchsaufbau und am Apparat erfolgreich und wirksam waren, um die Dauer kritischer Nutzerzustandsepisoden adäquater zu adressieren. Dass nur die durchschnittliche, aber nicht die kumulierte Dauer kritischer Zustandsepisoden verkürzt wurde, spricht für eine schnelle, situationsspezifische Wirkung der jeweiligen Strategien. Dieses Erkenntnis bestätigt die dem Dynamischen Adaptierungsmanagement zugrundeliegende Annahme, dass Adaptierungen nur eine temporäre Adressierung temporärer Zustände sein können.

5.2.4 Wirkung auf den subjektiven Nutzerzustand

Signifikante Effekte der Adaptierungen auf die subjektive Bewertung des Nutzerzustands konnten nicht ermittelt werden. Für Scheduling wurde allerdings ein statistischer Trend zu subjektiv geringerer Anstrengung im Vergleich zur Kontrollbedingung ermittelt. Dieser ist dadurch erklärbar, dass die Strategie durch eine gleichmäßigere Verteilung der Aufgaben Belastungsspitzen vermeidet. Visual Cueing verringerte marginal signifikant sowohl die empfundene Anstrengung als auch die aufgabenbezogene Erschöpfung, deren Untersuchung aber nicht mehr Gegenstand dieses Experiments war.

Wie bereits in der Voruntersuchung gab es auch in diesem Experiment eine starke Divergenz zwischen subjektiver Beurteilung der Adaptierungsstrategien und deren objektiv gemessener Wirkung. So wurden insbesondere Context-Sensitive Help, Visual Cueing und Decluttering, also diejenigen Strategien, die Hinweise auf zu bearbeitende Aufgaben einblendeten, auch von jeweils mindestens 70% der Probanden als hilfreich und leistungssteigernd empfunden. Bei jeder dieser Strategien empfanden zudem jeweils mindestens zwei Drittel der Probanden eine Reduktion der Beanspruchung und eine Verbesserung der Aufmerksamkeit. Die Strategien Automation und Scheduling, deren Ziel eher die Reduktion der Aufgabenlast war, wurden kritischer beurteilt, jedoch empfand die Mehrheit der Probanden selbst diese Adaptierungen auf allen Skalen als neutral. Das kann im weniger intrusiven Charakter dieser Strategien begründet liegen, denn sie reduzieren die Aufgabenlast weitgehend unmerklich und wurden daher auch nur von 12 (Scheduling) bzw. 19 Probanden (Automation) bemerkt. Von den Probanden, die Scheduling nicht neutral bewerteten, beurteilten stets mehr Personen die Strategie positiv als negativ. Ebenfalls empfanden mehr Probanden die Automationsstrategie als hilfreich und leistungssteigernd denn als störend und leistungsmindernd. Jedoch wurde der Einfluss der Automation auf Beanspruchung und Aufmerksamkeit von mehr Probanden negativ als positiv beurteilt. Diese Beobachtung überrascht, wenn man bedenkt, dass die automatische Identifizierung die Belastung der kognitiven Ressourcen insgesamt reduzieren sollte.

Möglicherweise führten die plötzlichen Änderungen an den Kontakten zu Ablenkung oder die Veränderungen im Lagebild mussten mit kognitivem Aufwand in das Situationsbewusstsein integriert werden. Eine alternative Erklärung ist, dass zur manuellen Bestätigung der automatisierten Identifizierung mehr Anstrengung aufgebracht werden musste als für eine reguläre Identifizierung. Dieser Eindruck wird dadurch gestützt, dass der Einfluss der Automation auf die Beanspruchung in der Voruntersuchung, als die Hinweis-Badges noch sehr salient ausgeprägt waren, deutlich positiver ausgeprägt war als in diesem Experiment, in dem der Hinweis nur noch aus einem wenig salienten Fragezeichen bestand, dessen Erkennen schwerer fiel.

5.2.5 Überblick

Die Strategien Visual Cueing und Decluttering wirkten sich in diesem Experiment positiv auf den Nutzerzustand aus. Durch Visual Cueing wurde die diagnostizierte Beanspruchung signifikant

reduziert und durch Decluttering konnte die Ausrichtung der Aufmerksamkeit signifikant verbessert werden. Auch Scheduling und Context-Sensitive Help wiesen statistische Trends in die erwartete Richtung auf. Für Automation konnten negative Effekte der Strategie, die in der Voruntersuchung noch beobachtet wurden, eliminiert werden. Daher kann davon ausgegangen werden, dass die vorgenommenen Änderungen an der Operationalisierung wirksam waren.

Auf Leistung und Aufgabenbearbeitung zeigte keine der Adaptierungen in Experiment 1 eine signifikante Wirkung, was in Anbetracht der beobachteten Wirkung auf den diagnostizierten Nutzerzustand und der überwiegend positiven subjektiven Beurteilungen überrascht. Die Überprüfung der Hypothesen zeigte signifikante Effekte, sowohl in die erwartete als auch in die unerwartete Richtung. Die Ergebnisse entgegen der erwarteten Richtung illustrieren, dass Adaptierungen auch kognitive Kosten verursachen (vgl. Abschnitte 1.1.2 und 2.6.2).

Tabelle 20 bietet eine Übersicht über die signifikanten und marginal signifikanten Effekte.

Tabelle 20. Übersicht statistischer Signifikanzen und Trends je Adaptierungsstrategie

Strategie	Effekt	
Visual Cueing	++	signifikant kürzere durchschnittliche Dauer von Episoden kritisch hoher Beanspruchung
	+	Trend zu kürzerer kumulierter Dauer von Episoden kritisch hoher Beanspruchung
	+	Trend zu kürzerer durchschnittliche Dauer von Episoden falsch gerichteter Aufmerksamkeit
	+	Trend zu kürzeren Leistungseinbrüchen beim Warnen
	+	Trend zu mehr rechtzeitig bearbeiteten Warn-Aufgaben
	+	Trend zu geringerer subjektiver Anstrengung
	+	Trend zu geringerer subjektiver aufgabenbezogener Erschöpfung
	-	Trend zu höherer Anzahl von Episoden falsch gerichteter Aufmerksamkeit
Decluttering	++	signifikant kürzere durchschnittlicher Dauer von Episoden falsch gerichteter Aufmerksamkeit
	+	Trend zu kürzeren Leistungseinbrüchen beim Warnen
	+	Trend zu höherer Anzahl bearbeiteter Identifizierungsaufgaben
	-	Trend zu weniger rechtzeitig bearbeiteten NRTT-Aufgaben
	--	signifikant längere Präsenz von Bekämpfungsaufgaben (jedoch nicht unzulässig lang, daher nicht zwingend nachteilig)
	--	signifikant höhere Anzahl von Episoden falsch gerichteter Aufmerksamkeit
Context-Sensitive Help	+	Trend zu kürzeren Leistungseinbrüchen beim Warnen
	+	Trend zu kürzerer durchschnittlicher Dauer von Episoden falsch gerichteter Aufmerksamkeit
	-	Trend zu höherer Anzahl von Episoden falsch gerichteter Aufmerksamkeit
Automation	-	Trend zu längeren Leistungseinbrüchen bei NRTT-Aufgaben
	-	Trend zu längerer durchschnittlicher Präsenz von NRTT-Aufgaben
Scheduling	+	Trend zu kürzerer durchschnittlicher Dauer von Episoden kritisch hoher Beanspruchung
	+	Trend zu geringerer subjektiver Anstrengung

Anmerkungen: ++ signifikanter Effekt in Richtung der Hypothese; + statistischer Trend in Richtung der Hypothese; - statistischer Trend entgegen der Hypothese; -- signifikanter Effekt entgegen der Hypothese

5.2.6 Mögliche Ursachen

Die meisten der ermittelten statistischen Trends wiesen eine mittlere Effektstärke auf. Dies deutet darauf hin, dass die Teststärke aufgrund der Stichprobengröße höchstwahrscheinlich zu gering war. In dem Fall wäre eine Replikation mit einer größeren Stichprobe erforderlich, um die Wirksamkeit der einzelnen Adaptierungsstrategien robuster zu belegen. Es kommen jedoch auch weitere methodische Ursachen in Frage, um die Diskrepanz zwischen nahezu durchweg positiver subjektiver Bewertung und der nichtsignifikanten Wirkung bezüglich Leistung und Aufgabenbearbeitung zu erklären. Diese werden im Folgenden diskutiert.

Ankündigung der Kontrollbedingung

Die Kontrollbedingung war für die Probanden erkennbar, da in allen Bedingungen außer dieser vorab ein Erklärungsblatt zur folgenden Adaptierungsstrategie dargereicht wurde. Dem John-Henry-Effekt (z. B. Gammon & Bornstein, 2018) zufolge kann es passieren, dass Versuchspersonen sich vermehrt anstrengen, wenn ihnen bewusst ist, dass sie sich in einer Kontrollbedingung befinden, um den vermeintlichen Nachteil gegenüber der Experimentalbedingung auszugleichen. Das Vorliegen dieser Verzerrung wird vermutet, da Probanden gegenüber den Versuchsleitern Aussagen machten wie:

- „Oje, keine Unterstützung. Das wird aber hart.“
- „Ach, Kontrollbedingung, dann muss ich mich ja besonders anstrengen.“

Für zukünftige Experimente ist daher, soweit realisierbar, eine Verblindung der Kontrollbedingung ratsam.

Ausschluss von Überhangaufgaben

Als problematisch für die Auswertung der Wirkung auf Leistungseinbrüche und Aufgabenbearbeitung erwies sich, dass die Szenarien mehrere direkt aufeinanderfolgende Bedingungen enthielten. Die Aufteilung der Szenarien führte dazu, dass Aufgaben nicht immer innerhalb der Bedingungen beendet wurden, in der sie auftraten. Die Auswirkungen solcher *Überhangaufgaben* konnte nur teilweise durch Balancierung der Versuchsbedingungen ausgeglichen werden. Ihr Auftreten hing in den einzelnen Bedingungen stärker als erwartet von den individuellen Bearbeitungsstrategien und der Leistung der Versuchspersonen ab, so dass Anzahl und Dauer der Überhangaufgaben nicht konstant gehalten werden konnten.

Um Verzerrungen der abhängigen Variablen zu minimieren, wurden solche Aufgaben gänzlich von der Auswertung ausgeschlossen. Das führte jedoch dazu, dass insbesondere solche Aufgaben unberücksichtigt blieben, die eine besonders schlechte Leistung aufwiesen, was wahrscheinlich ebenfalls zu Verzerrungen führte. Beispiel:

- Proband A bearbeitet eine bereits lange bestehende Identifikationsaufgabe in der letzten Sekunde vor Ende des Szenarios. Diese lange Zeit geht in die Berechnung der durchschnittlichen und kumulierten Bearbeitungsdauer ein.
 - Proband B bearbeitet diese Aufgabe gar nicht. Sie gilt daher als Überhangaufgabe und wird aus der Analyse der Dauer ausgeschlossen und nicht für die Berechnung der kumulierten und durchschnittlichen Bearbeitungsdauer berücksichtigt.
- ➔ Der leistungsärmere Proband B weist bei sonst gleichen Bedingungen im Vergleich eine geringere kumulierte und durchschnittliche Bearbeitungsdauer bei Identifizierungsaufgaben auf.

Angenommen, die Adaptierungen hätten die Bearbeitungsdauer effektiv verkürzt, könnte der Ausschluss besonders langer (Überhang-) Aufgaben in der Kontrollbedingung zu einer Verringerung oder Auslöschung des Effekts geführt haben. Im Rückblick wäre es daher vorteilhaft gewesen, separate Szenarien für jede Bedingung zu nutzen, um sicherzustellen, dass Aufgaben nur Bedingungen tangieren, in denen sie auch ausgelöst wurden. Zum einen war aber die Erstellung sechs separater Szenarien zeitlich nicht möglich, zum anderen hätte die Separation von Szenarien die schon jetzt relativ lange Untersuchungsdauer noch wesentlich erweitert. Auch bei separaten Szenarien bliebe zudem die Herausforderung bestehen, einen möglichst verzerrungsfreien Umgang mit Aufgaben zu finden, die nicht rechtzeitig zum Ende der Bedingung erledigt wurden. Im nächsten Experiment (Experiment 2), das die Wirkung einer durchmischten Auslösung verschiedener Adaptierungsstrategien durch ein Dynamisches Adaptierungsmanagement untersucht, kann das Problem durch das Versuchsdesign vermieden werden.

Berücksichtigung der Aufgabenpriorität bei der Auswertung

Adaptierungen dienen stets der vorübergehenden Adressierung vorübergehender Probleme. Sie sollen den Operateur kontext- und bedarfsgerecht unterstützen, um kritische Nutzerzustandsausprägungen und Leistungseinbrüche zu adressieren, insbesondere auch in Hinblick auf die Priorisierung von Aufgaben in einer Multitaskingsituation. Diese konzeptionelle Auslegung impliziert aber auch, dass Adaptierungen nicht alle Aufgaben gleichmäßig unterstützen, da je nach Kontext nicht für alle Aufgaben Unterstützungsbedarf besteht. In der Folge ist es nicht ungewöhnlich, dass die Bearbeitungszeit bestimmter Aufgaben durch die Adaptierung steigt. Schließlich ist das Ziel des Adaptierungsmanagements, die Gesamtleistung des Mensch-Maschine-Systems zu erhöhen. Beispiele:

- Visual Cueing weist auf eine übersehene Bekämpfungsaufgabe hin. Der Operateur wendet sich (aufgrund der Priorität gerechtfertigt) der Bekämpfungsaufgabe zu und unterbricht dafür die Bearbeitung von Identifizierungsaufgaben, wodurch diese eine längere Bearbeitungszeit aufweisen.
- Decluttering erhöht die Salienz von Kontakten mit Aufgaben, nicht aber von NRTT-Aufgaben. Die Wahrnehmung von Aufgaben mit Bezug zu Kontakten wird daher (zum Nachteil von NRTT-Aufgaben) begünstigt und es wird möglicherweise eine geringere Anzahl von NRTT-Aufgaben bearbeitet.

Eine mögliche Erklärung für viele nicht-signifikante Ergebnisse ist, dass bestimmte (insbesondere niedrig priorisierte) Teilaufgaben durch die Adaptierungen gerechtfertigt verzögert wurden, die Leistungsmaße aller Aufgaben aber trotzdem gleichermaßen in die Auswertung gingen. So wurden berechnete Verzögerungen durch die Adaptierungen zu deren Nachteil berücksichtigt. Solche durch die Adaptierungen verursachten Kosten sind jedoch durchaus erwünscht, wenn dadurch eine bessere Bearbeitung höher priorisierter Aufgaben erreicht wird. Gestützt wird diese Vermutung dadurch, dass drei Adaptierungsstrategien einen statistischen Trend zu kürzeren Leistungseinbrüchen bei hoch priorisierten Warnaufgaben (vgl. Tabelle 17) aufwiesen.

Auch unabhängig von den Adaptierungen kann die Nichtberücksichtigung der Aufgabenpriorität zu Störeffekten führen. Beispiel:

- Proband A bearbeitet alle Aufgaben der Priorität nach, so wie es die Instruktionen vorgeben.

- Proband B konzentriert sich ausschließlich auf die Bearbeitung von Aufgaben an Kontakten und ignoriert NRTT-Aufgaben, obwohl diese eine höhere Priorität haben als manche Identifizierungsaufgaben.
 - ➔ Proband B erlangt durch Ignorieren der Aufgabenpriorität einen Vorteil bei den Leistungsmaßen zur Bearbeitung von Identifikations-, Warn- und Bekämpfungsaufgaben, da er sich nicht durch die zeitintensive Bearbeitung wichtigerer NRTT-Aufgaben ablenken ließ. Diese Aufgaben löst er mit hoher Wahrscheinlichkeit schneller als Proband A, der zwischenzeitlich NRTT-Aufgaben bearbeitet.
 - ➔ Da Proband B keine NRTT-Aufgabe innerhalb der Bedingung bearbeitet hat, werden diese aufgrund fehlender Werte als Überhangaufgaben aus der Analyse der NRTT-Aufgaben ausgeschlossen, so dass seine diesbezüglich schlechte Leistung keine Berücksichtigung findet.

Folglich sollten in zukünftigen Untersuchungen nur solche Aufgaben in die Bewertung der Adaptierung einfließen, die zum Zeitpunkt Ihrer Erledigung die höchste Priorität hatten. Weiterhin sollten Maßnahmen getroffen werden, um die Aufgabenbearbeitung in der Rangfolge der Priorität zu fördern. Nur so kann das Ergebnis die Aufgabe, die der Proband tatsächlich zu erledigen hatte, und die Unterstützung dieser Aufgabe durch die Adaptierungen widerspiegeln.

Beschränkte Wirksamkeit der einzelnen Adaptierungsstrategien

Sowohl in der Voruntersuchung als auch in diesem Experiment kam pro Bedingung nur eine Adaptierungsstrategie zum Einsatz. Das diesem Vorhaben zugrundeliegende Konzept geht jedoch in seinen Grundsätzen davon aus, dass passende Adaptierungen dynamisch unter Berücksichtigung des Kontextes ausgewählt werden. Zwar wurde die jeweilige Strategie nur ausgelöst, wenn sie situativ zweckdienlich war, jedoch ist es möglich, dass bei isolierter Auslösung einzelner Adaptierungen eine zu punktuelle Wirkung entfaltet wurde, die mit den relativ breit angelegten Maßen für Leistung und Wirkung nicht erfasst werden konnte.

Eine einzelne Adaptierungsstrategie unterstützt außerdem bedarfsgerecht nur bestimmte Aspekte einer Situation, kann jedoch kognitive Kosten verursachen und andere Aspekte derselben Situation negativ beeinflussen. Zum Beispiel reduzierte Decluttering die Salienz feindlicher Kontakte, bis diese in die ISR eintraten, wodurch es schwieriger wurde, solche Aufgaben zu antizipieren.

Im Dynamischen Adaptierungsmanagement können verschiedene Strategien komplementär wirken und somit zu einer höheren kombinierten Wirksamkeit bei der Lösung kognitiver Zustandsprobleme führen. Daher können aus der Einzelbetrachtung der Adaptierungsstrategien noch keine Rückschlüsse auf deren Wirksamkeit im Rahmen des Dynamischen Adaptierungsmanagements gezogen werden.

5.3 Schlussfolgerungen

Die aus dem Experiment gewonnenen Erkenntnisse sowie die daraus abgeleiteten Maßnahmen für die Untersuchung des Dynamischen Adaptierungsmanagements sind in Tabelle 21 zusammenfassend dargestellt.

Tabelle 21. Erkenntnisse und abgeleitete Maßnahmen aus Experiment 1

Erkenntnis	Maßnahme für das Folgeexperiment
Der John-Henry-Effekt kann zu erhöhter Anstrengung in der Kontrollbedingung geführt haben.	Soweit realisierbar sollte eine Verblindung der Kontrollbedingung erfolgen.
Der Ausschluss von Überhangaufgaben hat vorrangig schlechte Leistung eliminiert und so vermutlich zu Verzerrungen oder sogar zur Auslöschung von Effekten geführt.	Überhangaufgaben sollten durch das Versuchsdesign vermieden werden.
Probanden konnten durch Nichtbeachtung der der Priorität (insbesondere bei NRTT-Aufgaben) Vorteile in Bezug auf die Leistungsmaße erlangen	Es sollte sichergestellt werden, dass die Aufgabenpriorität von Probanden besser verstanden und berücksichtigt wird.
Die Nichtberücksichtigung der Aufgabenpriorität bei der Auswertung hat wahrscheinlich zu Störeffekten bei den Leistungsmaßen geführt.	Es sollten nur solche Aufgaben in die Auswertung einfließen, die zum Zeitpunkt Ihrer Erledigung die höchste Priorität hatten.
Die gerechtfertigte Weglenkung der Aufmerksamkeit von bestimmten (insb. niedrig priorisierten) Teilaufgaben floss zu deren Nachteil in die Auswertung ein. Dies könnte eine mögliche positive Wirkung von Adaptierungsstrategien verschleiert haben.	
Adaptierungen wirken bei isolierter Auslösung möglicherweise zu punktuell für die genutzten Leistungsmaße	Adaptierungen nicht individuell sondern im Zusammenspiel betrachten

6

Experiment 2 – Validierung der Wirksamkeit des dynamischen Adaptierungsmanagements

In den vorangegangenen Untersuchungen wurden kritische Ausprägungen des Nutzerzustands nur durch jeweils eine Art der Adaptierung der MMI adressiert. Insgesamt wurden sechs Adaptierungsstrategien individuell untersucht. Obwohl die meisten davon in der Einzelbetrachtung die Leistung objektiv nicht signifikant verbessern konnten, wurden sie von den Probanden mit deutlicher Mehrheit positiv bewertet und wirkten sich doch teils positiv auf kritische Nutzerzustände aus. Daher wird vermutet, dass zum einen die spezifische Untersuchung von Strategien nur beschränkt zielführend ist und zum anderen methodische Aspekte für die Ergebnisse der bisherigen Untersuchungen eine Rolle gespielt haben könnten.

Da die Stärke eines Dynamischen Adaptierungsmanagements im Zusammenwirken verschiedener Strategien liegt, wurde im nächsten Schritt ein Validierungsexperiment durchgeführt, dessen Ziel es war, die Wirksamkeit der Adaptierungen im dynamischen Zusammenspiel zu untersuchen, um kritische Ausprägungen von Beanspruchung und Aufmerksamkeitsrichtung zu adressieren. Die Steuerung der Adaptierungen erfolgte dabei bedarfsgerecht und kontextsensitiv durch das Dynamische Adaptierungsmanagement. Aufgrund der positiven Bewertungen durch die Probanden erschien es gerechtfertigt, bei der Untersuchung des Dynamischen Adaptierungsmanagements alle Adaptierungsstrategien zu berücksichtigen (mit Ausnahme des Auditory Cueing, dessen Untersuchung nicht verlässlich möglich war), auch wenn diese in der Einzelbetrachtung nicht zu Leistungssteigerungen geführt hatten. Eine Eliminierung bestimmter Strategien hätte zudem zu konzeptionellen Lücken bei der Abdeckung von Problemzuständen durch Adaptierungen geführt.

Experiment 2 untersucht die gleichen Fragestellungen wie die vorangegangenen Untersuchungen, jedoch nicht mehr hinsichtlich der Wirksamkeit einzelner Adaptierungsstrategien, sondern hinsichtlich der Wirksamkeit ihres Zusammenspiels im Dynamischen Adaptierungsmanagement. Dabei entsprachen die abhängigen Variablen, die erwarteten Effekte sowie die Hypothesen und abhängigen Variablen denen von Experiment 1 (vgl. Kapitel 5). Die Formulierungen wurden jedoch angepasst, um das Dynamische Adaptierungsmanagement zu berücksichtigen:

H1: Das Dynamische Adaptierungsmanagement verringert das Auftreten von Leistungseinbrüchen:

- H1a: In der Bedingung mit Dynamischem Adaptierungsmanagement ist die Anzahl der Leistungseinbrüche (AV) geringer als in der Kontrollbedingung ohne Adaptierung.
- H1b: In der Bedingung mit Dynamischem Adaptierungsmanagement ist die durchschnittliche Dauer der Leistungseinbrüche (AV) geringer als in der Kontrollbedingung ohne Adaptierung.
- H1c: In der Bedingung mit Dynamischem Adaptierungsmanagement ist die kumulierte Dauer der Leistungseinbrüche (AV) geringer als in der Kontrollbedingung ohne Adaptierung.

H2: Das Dynamische Adaptierungsmanagement sorgt für eine effizientere Bearbeitung von Aufgaben:

- H2a: In der Bedingung mit Dynamischem Adaptierungsmanagement ist die Anzahl der bearbeiteten Aufgaben (je Aufgabentyp) (AV) höher als in der Kontrollbedingung ohne Adaptierung.
- H2b: In der Bedingung mit Dynamischem Adaptierungsmanagement ist die durchschnittliche Dauer der Aufgabenpräsenz (je Aufgabentyp) (AV) geringer als in der Kontrollbedingung ohne Adaptierung.
- H2c: In der Bedingung mit Dynamischem Adaptierungsmanagement ist die kumulierte Dauer der Aufgabenpräsenz (je Aufgabentyp) (AV) geringer als in der Kontrollbedingung ohne Adaptierung.

H3: Das Dynamische Adaptierungsmanagement vermindert das Auftreten diagnostizierter kritischer Nutzerzustände:

- H3a: In der Bedingung mit Dynamischem Adaptierungsmanagement ist die Anzahl der kritischen Nutzerzustandsdiagnosen (AV) geringer als in der Kontrollbedingung ohne Adaptierung.
- H3b: In der Bedingung mit Dynamischem Adaptierungsmanagement ist die durchschnittliche Dauer der kritischen Nutzerzustandsdiagnosen (AV) geringer als in der Kontrollbedingung ohne Adaptierung.
- H3c: In der Bedingung mit Dynamischem Adaptierungsmanagement ist die kumulierte Dauer der adressierten kritischen Nutzerzustandsdiagnosen (AV) geringer als in der Kontrollbedingung ohne Adaptierung.

6.1 Methode

6.1.1 Stichprobe

Die $N = 16$ Probanden des Validierungsexperiments waren Mitarbeiter des Fraunhofer FKIE. Die Teilnahme war nur möglich, wenn keine Vorerfahrung mit der Aufgabe oder der Benutzungsoberfläche bestand. 14 Probanden waren männlich, eine Person war weiblich und eine weitere transweiblich. Die Altersspanne der Teilnehmenden lag zwischen 22 und 49 Jahren ($M = 32.25$; $SD = 8.68$). 75% der Probanden gaben an, sich sehr gut oder gut mit Computerspielen auszukennen, 25% hatten wenige oder gar keine Kenntnisse mit Computerspielen.

6.1.2 Apparat

Der Versuchsaufbau und die technische Ausstattung entsprachen dem Apparat von Experiment 1 (vgl. Abschnitt 5.1.2). Bis auf Auditory Cueing kamen alle in Abschnitt 3.5.2 beschriebenen Adaptierungsstrategien erneut zur Anwendung. An deren Operationalisierung wurden neben den Anpassungen für Experiment 1 keine weiteren Änderungen vorgenommen.

Experimentalaufgabe

Experimentalaufgabe und Szenarien entsprachen ebenfalls denen in Experiment 1. Aufgrund eines Fehlers wurde jedoch eine falsche Konfigurationsdatei für die Simulationsszenarien aufgerufen. Dies hatte zur Folge, dass Aufgabenanzahl und -dichte der Szenarien sich minimal unterschieden: Szenario 2 wies im Vergleich zu Szenario 1 eine zusätzliche NRTT-Aufgabe und

eine zusätzliche Bekämpfungsaufgabe auf (Tabelle 22). Um mögliche Auswirkungen dieses Unterschieds zu untersuchen, wurde während der Auswertung neben den Vergleichen der Experimentalbedingungen auch ein Vergleich von Szenario 1 und Szenario 2 durchgeführt (Abschnitt 6.2.5).

Tabelle 22. Anzahl der Aufgabenarten im Validierungsexperiment

Szenario	Aufgabendichte	Identifizieren (inkl. Faker)	NRTT	Warnen	Bekämpfen	Faker
1	6.08 Aufgaben/min.	76	9	34	27	5
2	6.16 Aufgaben/min.	76	10	34	28	5

Anpassung der Regelsätze für die Adaptierung

Wie in den vorangegangenen Experimenten festgestellt wurde, stehen die beiden untersuchten Nutzerzustandsdimensionen miteinander in Wechselwirkung. Auch die Wirkung der Strategien ließ sich daher nicht trennscharf auf eine Zustandsdimension begrenzen. Damit sich die Strategien bei gemischter Auslösung nicht zu stark überschneiden und dadurch gegebenenfalls gegenseitig negativ beeinflussen, wurden sie im Validierungsexperiment gemäß ihren konzeptionellen Schwerpunkten durch aufgabenrelevante Zusatzbedingungen voneinander abgegrenzt. Abbildung 43 zeigt die angestrebte Abgrenzung der genutzten Adaptierungsziele und -strategien.

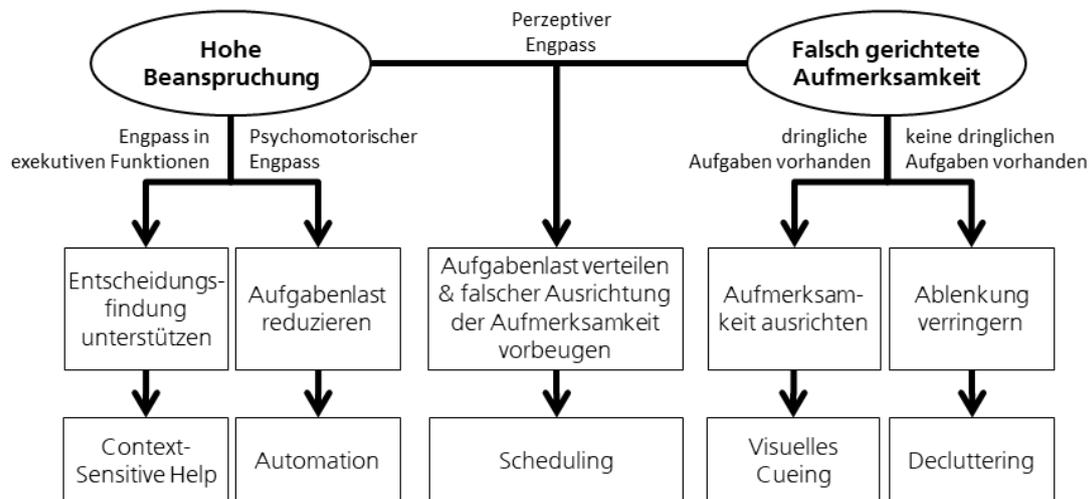


Abbildung 43. Modell des im Validierungsexperiment genutzten Adaptierungsschemas

Die Abgrenzung im Dynamischen Adaptierungsmanagement erfolgte mittels Nutzerzustandsdiagnosen und Kontextparametern. Eine Adaptierungsstrategie löst aus, wenn während eines Leistungseinbruchs mindestens eine kritische Zustandsausprägung (hohe Beanspruchung oder falsche gerichtete Aufmerksamkeit) diagnostiziert wird und mindestens ein weiteres Kontextmerkmal vorliegt, das der bedarfsgerechten Auswahl der passenden Strategie dient. Die Regeln für die Auslösung der Adaptierungen sind in Tabelle 23 dargestellt. Abbildung 44 illustriert die Abgrenzung der Adaptierungsstrategien zum leichteren Überblick noch einmal schematisch.

Tabelle 23. Regeln zur Auslösung der Adaptierungsstrategien im Validierungsexperiment

Adaptierungsstrategie	Kritisch ausgeprägte Zustandsdimension	Vorliegende Kontextparameter
Context-Sensitive Help	kritisch hohe Beanspruchung	niedrige Mausclickfrequenz
Automation	kritisch hohe Beanspruchung	hohe Mausclickfrequenz + Priorität der bearbeiteten Aufgabe >100 („Identifizieren außerhalb der Identification Safety Range“)
Scheduling	kritisch hohe Beanspruchung + falsch gerichtete Aufmerksamkeit	hohe Mausclickfrequenz + Priorität der wichtigsten Aufgabe >=300 (Aufgabe in der Identification Safety Range)
Visual Cueing	falsch gerichtete Aufmerksamkeit	Priorität der wichtigsten Aufgabe >=300 (Aufgabe in der Identification Safety Range)
Decluttering	falsch gerichtete Aufmerksamkeit	Priorität der wichtigsten Aufgabe =100 („Identifizieren außerhalb der Identification Safety Range“)

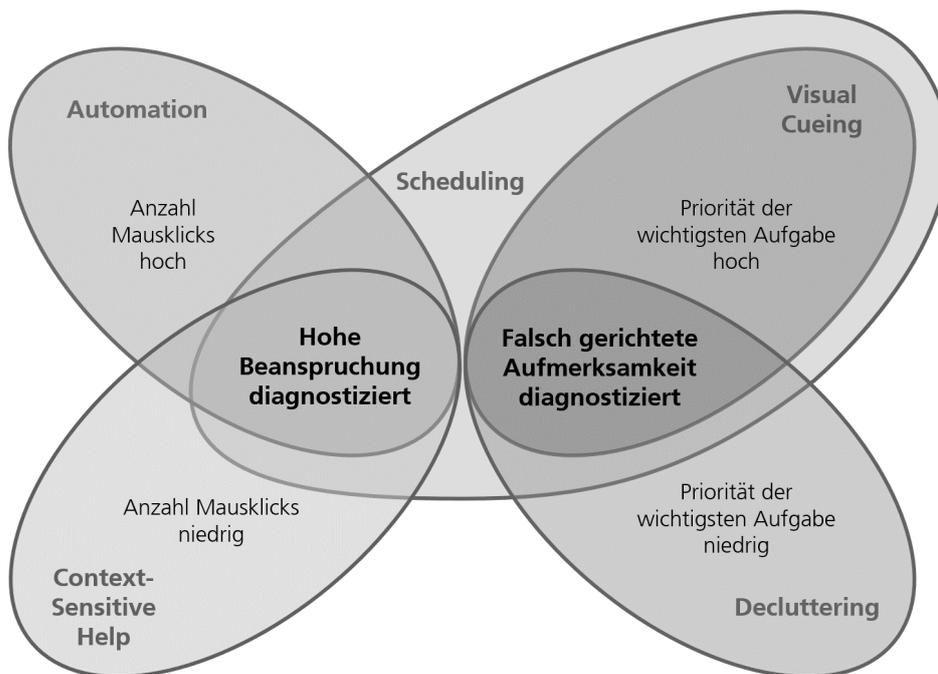


Abbildung 44. Illustration der Regeln zur Auslösung der Adaptierungsstrategien im Validierungsexperiment

6.1.3 Versuchsdesign

Zur Ermittlung der Wirksamkeit des Dynamischen Adaptierungsmanagements wurden die Leistung und das Auftreten von kritischen Nutzerzustandsausprägungen zwischen einer Bedingung mit Dynamischem Adaptierungsmanagement und einer Kontrollbedingung verglichen. In einem Szenario wurden das Auftreten aller fünf Adaptierungen kontextabhängig durch das Dynamische Adaptierungsmanagement gesteuert. Das zweite Szenario diente als Kontrollbedingung – hier wurden keine Adaptierungen ausgelöst. Die Möglichkeit des

Auslösens von Adaptierungen durch das Dynamische Adaptierungsmanagement diente demnach als unabhängige Variable und wurde als Innersubjektfaktor manipuliert.

Da die Szenarien nicht wie zuvor in verschiedene Bedingungen zerteilt wurden, entfiel das Problem der phasenübergreifenden Aufgaben, das vermutlich in den vorangegangenen Untersuchungen zu Verzerrungen der Ergebnisse führte. Wie schon im vorangegangenen Experiment wurde die Zustandsdimension *passive aufgabenbezogene Müdigkeit* aufgrund ihrer schwierigen Erkennbarkeit auf Reaktionsebene nicht untersucht. Da nur Versuchspersonen rekrutiert wurden, die nicht an den vorangegangenen Untersuchungen teilgenommen hatten, konnten für dieses Experiment die zwei 24-minütigen Szenarien aus der vorangegangenen Untersuchung (vgl. Kapitel 5) verwendet werden.

Die Szenarien wurden so ausgelegt, dass sie einen vergleichbaren Schwierigkeitsgrad und vergleichbare Herausforderungen in Bezug auf die Aufmerksamkeit bieten, jedoch nicht identisch sind, um Lerneffekte zu vermeiden. Zur Verhinderung von Reihenfolgeeffekten wurden Szenarien und Adaptierungsbedingung wie in Tabelle 24 dargestellt balanciert. Die Untersuchung beider Bedingungen wurde in einer Sitzung mit einem vorangestellten Trainingsszenario durchgeführt.

Tabelle 24. Rotationsschema in Experiment 2

Proband	Durchlauf 1		Durchlauf 2	
VP01	Szenario A	Adaptierung	Szenario B	Keine Adaptierung
VP02	Szenario B	Adaptierung	Szenario A	Keine Adaptierung
VP03	Szenario A	Keine Adaptierung	Szenario B	Adaptierung
VP04	Szenario B	Keine Adaptierung	Szenario A	Adaptierung
...	

6.1.4 Versuchsablauf

Zunächst wurde den Probanden eine Einverständniserklärung vorgelegt, in der sie informiert wurden, dass die Teilnahme am Experiment freiwillig ist und die Auswertung der Daten anonym erfolgt. Diese war identisch mit den vorangegangenen Untersuchungen (siehe Anhang A.3). Nachdem dieses Dokument gelesen und unterschrieben wurde, konnte der Zephyr BioHarness angelegt werden. Der Versuchsteilnehmer trug ihn unter der Kleidung, die Kontaktflächen wurden mit Alkoholpads gereinigt und angefeuchtet, um die Leitfähigkeit zu verbessern. Danach wurde ein Fragebogen in elektronischer Form vorgelegt, in dem demografische Daten, Erfahrung mit Computerspielen und das aktuelle Befinden (Müdigkeit, Motivation, emotionaler Zustand) abgefragt wurden. Dieser entsprach ebenfalls der in den bisherigen Untersuchungen verwendeten Version (vgl. Anhang A.4). Eine schriftliche Instruktion der Aufgabe (Anhang E.1) sollte sorgfältig gelesen werden, der Versuchsleiter stand für Rückfragen zur Verfügung. Zudem wurde im Validierungsexperiment ein Verständnisfragebogen ergänzt, der sicherstellen sollte, dass die wesentlichen Aspekte der Aufgabendurchführung und erwartete Priorisierung der Aufgaben verstanden waren (Anhang E.2). Schließlich wurden Eye Tracker und Emotionserkennung kalibriert.

Dauer und Ablauf von Training und Baselineerhebung entsprachen dem Vorgehen in Experiment 1 (vgl. Abschnitt 5.1.4). Das Training-/Baseline-Szenario wurde (abgesehen von den gemessenen Baseline-Werten) nicht in der Datenanalyse berücksichtigt. Um einen möglichen

John-Henry-Effekt abzuschwächen (vgl. Abschnitt 5.2.6), wurden die Probanden nach dem Training anhand eines Informationsblatts (siehe Anhang E.3) über die Funktionsweisen der möglichen Adaptierungsstrategien informiert. Dabei wurde darauf hingewiesen, dass visuell ersichtliche sowie auch nicht-ersichtliche Adaptierungsstrategien (Beispiel: Scheduling) auftreten können, aber nicht müssen. Im Validierungsexperiment war somit die Kontrollbedingung nicht vorab für die Probanden ersichtlich.

Schließlich wurden die zwei Szenarien in Kontroll- bzw. Adaptierungsbedingung in der durch das Rotationsschema vorgegebenen Reihenfolge (vgl. Tabelle 24) durchgeführt. Nach jedem Szenario wurde ein Post-Test-Fragebogen (siehe Anhang E.4) in elektronischer Form automatisiert angezeigt, um den subjektiven Nutzerzustand und die subjektiven Auswirkungen der Adaptierungen zu erfassen.

6.1.5 Datenaufbereitung

Die Daten wurden zunächst übereinstimmend mit der vorangegangenen Untersuchung aufbereitet (vgl. Abschnitt 5.1.5). Da das Szenario nicht mehr in verschiedene Bedingungen unterteilt war und dynamisch ausgelöste Adaptierungen bei allen Probanden auftraten, mussten keine Probanden exkludiert werden. Somit lag für alle Vergleiche zwischen der Kontroll- und der Adaptierungsbedingung eine Stichprobengröße von $N = 16$ vor.

Um die in Abschnitt 5.2.6 beschriebenen Probleme zu adressieren, aufgrund derer Probanden durch Bearbeitung der falschen Aufgaben oder sogar Nichtbearbeitung von Aufgaben bessere Leistungsmaße erzielen konnten, wurden zwei wesentliche Änderungen an der Datenaufbereitung vorgenommen:

- Zur Berücksichtigung der Aufgabenpriorität (vgl. Diskussion dazu in Abschnitt 5.2.6) wurden in der Analyse der Aufgabebearbeitung nur noch solche Aufgaben berücksichtigt, bei denen zum Zeitpunkt ihrer Erledigung keine andere Aufgabe mit höherer Priorität und Leistungseinbruch bestand (im Folgenden auch als *korrekt priorisierte Aufgaben* bezeichnet). Wurde beispielsweise ein Kontakt identifiziert, obwohl zu dem Zeitpunkt eine Warnaufgabe mit Leistungseinbruch vorlag, führte das zum Ausschluss der Identifizierungsaufgabe aus der Analyse, da der Proband zu dieser Zeit die Warnaufgabe hätte bearbeiten sollen. Damit wurde dem Umstand Rechnung getragen, dass sich Adaptierungen negativ auf niedrig priorisierte Aufgaben auswirken dürfen, wenn dafür die Leistung bei hoch priorisierten Aufgaben verbessert werden kann. Eine Vermischung von hoch und niedrig priorisierten Aufgaben in der Analyse würde somit die Effekte der Adaptierungen verwaschen. Demnach war für die Beurteilung der Leistung maßgeblich, ob und wie die jeweils wichtigste vorliegende Aufgabe bearbeitet wurde – auch unabhängig von der Aufgabenart. Die korrekt priorisierten Aufgaben wurden daher bezüglich der Leistungseinbrüche (H1) und der Aufgabebearbeitung (H2) zunächst teilaufgabenübergreifend ausgewertet. Dadurch wird berücksichtigt, dass das Ziel der dynamischen Adaptierung nicht ist, bestimmte Teilaufgaben zu unterstützen, sondern die Gesamtleistung des Mensch-Maschine-Systems zu erhöhen. Um ein differenzierteres Bild von der Wirkung der Adaptierungen erzeugen zu können, erfolgte jedoch zusätzlich eine Analyse der Wirkung auf die einzelnen Teilaufgaben.
- Bei der Analyse der durchschnittlichen und kumulierten Dauer der Aufgabenpräsenz wurden nun auch solche Aufgaben betrachtet, die bis zum Ende des Szenarios nicht

bearbeitet wurden. In diesen Fällen entsprach die analysierte Zeit der *zur Verfügung stehenden Bearbeitungsdauer*. Damit wurde dem Umstand Rechnung getragen, dass die Leistung eines Probanden, der Aufgaben nicht bearbeitet hat, andernfalls überschätzt worden wäre (vgl. Diskussion zum Ausschluss von Überhangaufgaben in Abschnitt 5.2.6).

Abschließend wurden zur Untersuchung möglicher Effekte des Szenarios die Daten (Leistungseinbrüche, korrekt priorisierte Aufgaben und kritisch ausgeprägte Nutzerzustandsdimensionen) so aufbereitet, dass sie für den Vergleich zwischen Szenario 1 und Szenario 2 zur Verfügung standen. Auch hier lag eine Stichprobengröße von $N = 16$ vor.

6.1.6 Statistische Analysen

Statistische Analysen wurden mittels der Statistiksoftware SPSS (Version 25) durchgeführt. Zu jedem inferenzstatistischen Test wurden die Voraussetzungen für seine Anwendung überprüft. Per Konvention wurde das Signifikanz-Niveau für alle statistischen Tests auf $\alpha = .05$ gesetzt, sofern keine Bonferroni-Korrektur zur Neutralisierung der Alphafehler-Kumulierung notwendig war. Da die Bonferroni-Korrektur die Teststärke verringert und so die Wahrscheinlichkeit falsch-negativer Ergebnisse erhöht, werden auch marginale Signifikanzen als statistische Trends interpretiert und diskutiert, wenn die Effektstärke mindestens auf einen mittelgroßen Effekt hinweist. Als Maß für die Effektstärke wurde Pearsons r verwendet. Ein Effekt von $r = .10$ gilt dabei als klein, $r = .30$ ist ein mittlerer Effekt und $r = .50$ stellt einen großen Effekt dar (Cohen, 1988)

Zur Untersuchung der Leistungseinbrüche (Hypothese H1) wurden deren Anzahl (Hypothese H1a), die kumulierte Dauer (Hypothese H1c) und die durchschnittliche Dauer (Hypothese H1b) über alle Aufgabenarten hinweg in der Kontrollbedingung mit denen in der Adaptierungsbedingung verglichen. Es wurden zusätzliche Tests angeschlossen, in denen die Vergleiche auf den drei genannten Variablen *pro Aufgabenart* durchgeführt wurden.

Um die Leistung bei der unterstützten Aufgabe (Hypothese H2) zu untersuchen, wurde getestet, ob sich die Anzahl (Hypothese H2a), die durchschnittliche Präsenzdauer (Hypothese H2b) und die kumulierte Präsenzdauer (Hypothese H2c) korrekt priorisierter Aufgaben über alle Aufgabenarten hinweg zwischen der Kontrollbedingung und der Adaptierungsbedingung unterschieden hat. Auch hier wurden anschließend Analysen für die einzelnen Aufgabenarten durchgeführt.

Zur Analyse der diagnostizierten kritisch ausgeprägten Nutzerzustandsdimensionen (hohe Beanspruchung und falsche Verteilung der Aufmerksamkeit; Hypothese H3) wurden die Anzahl (Hypothese H3a), die durchschnittliche Dauer (Hypothese H3b) und die kumulierte Dauer (Hypothese H3c) der kritischen Zustandsdiagnosen in der Adaptierungsbedingung mit denen in der Kontrollbedingung verglichen.

Für alle Vergleiche zwischen der Kontrollbedingung und den Adaptierungsbedingungen wurden t -Tests für abhängige Stichproben gerechnet, sofern die Voraussetzungen für diese erfüllt waren. Bei Nichterfüllung der Voraussetzungen wurden Wilcoxon-Vorzeichen-Rangtests für abhängige Stichproben durchgeführt. Welcher Test jeweils durchgeführt wurde, kann anhand des berichteten statistischen Kennwerts erkannt werden: Wenn ein t -Wert berichtet wird, konnte bei diesem Vergleich von einer Normalverteilung der Messwertdifferenzen ausgegangen werden und daher wurde auch ein t -Test für abhängige Stichproben durchgeführt. Ein berichteter z -Wert deutet auf eine Verwendung des Wilcoxon-Vorzeichen-Rangtests aufgrund

fehlender Normalverteilung hin. Ein Vergleich galt als signifikant, wenn der jeweilige p -Wert das Alpha-Niveau von $\alpha = .05$ unterschritt. Eine Bonferroni-Korrektur war nicht erforderlich.

Zur Überprüfung der Normalverteilungsannahmen wurden der Shapiro-Wilk-Test auf Normalverteilung, Werte der Schiefe und Werte der Kurtosis herangezogen. Es wurde von einer Verletzung der jeweiligen Normalverteilungsannahme ausgegangen, wenn der Quotient aus dem Betrag der Schiefe und ihrem Standardfehler und/oder der Quotient aus dem Betrag der Kurtosis und ihrem Standardfehler größer als 1.96 war (Field, 2009). Zusätzlich konnte bei Signifikanz des Shapiro-Wilk-Tests mit einem Alpha-Niveau von $\alpha = .05$ nicht von einer Normalverteilung der Daten ausgegangen werden.

Um Aufschluss über mögliche Effekte des Szenarios zu erhalten, wurde zusätzlich Szenario 1 mit Szenario 2 auf allen Variablen verglichen, die auch im Zusammenhang mit dem Vergleich von Kontroll- und Adaptierungsbedingung untersucht wurden.

6.2 Ergebnisse

Um zu überprüfen, ob das Dynamische Adaptierungsmanagement eine globale Wirkung auf Szenarioebene hatte, werden die Effekte zunächst über alle Teilaufgaben hinweg betrachtet. In Abschnitt 6.2.5 wird dann die Wirkung auf die Teilaufgaben untersucht, um kontextspezifische Effekte aufzudecken. Deskriptive Ergebnisse und Vergleichsergebnisse zu Experiment 2 können den Übersichtstabellen in Anhang F entnommen werden. Balkendiagramme zeigen Mediane und Mittelwerte der beiden Bedingungen. Bei Mittelwerten ist der Standardfehler als Dispersionsmaß in Form eines Fehlerbalkens dargestellt.

6.2.1 Wirkung auf Leistungseinbrüche (Hypothese H1)

Anzahl aller Leistungseinbrüche (Hypothese H1a)

Im Durchschnitt gab es in der Adaptierungsbedingung 24% weniger Leistungseinbrüche als in der Kontrollbedingung. Dieser Mittelwertunterschied (Abbildung 45) wurde auch statistisch signifikant ($t(15) = 2.20, p = .044, r = .49$).

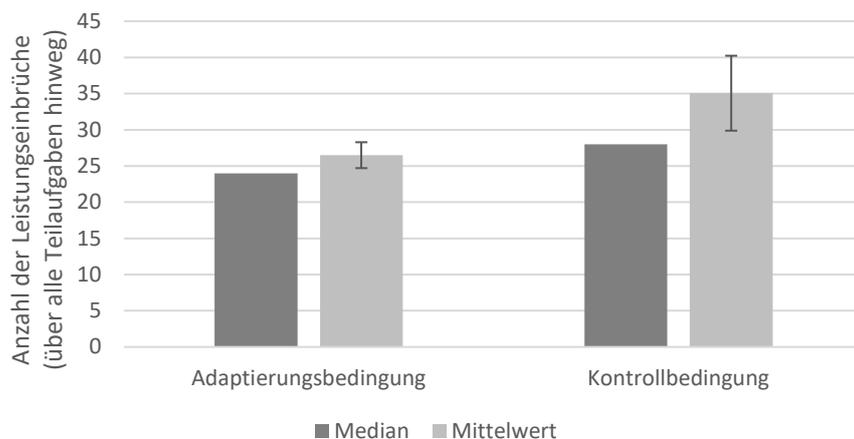


Abbildung 45. Mediane und Mittelwerte der Anzahl aller Leistungseinbrüche in beiden Bedingungen

Durchschnittliche Dauer aller Leistungseinbrüche (Hypothese H1b)

Im Mittel dauerten Leistungseinbrüche mit Adaptierungen 24% kürzer an als ohne. In den Medianen der beiden Bedingungen zeigt sich jedoch eine umgekehrte Tendenz hin zu längerer durchschnittlicher Dauer der Leistungseinbrüche in der Adaptierungsbedingung. Statistisch signifikant wurde dieser Unterschied nicht ($z = 0.62$, $p = .535$, $N = 16$, $r = .11$).

Kumulierte Dauer aller Leistungseinbrüche (Hypothese H1c)

Ähnlich wie bei der durchschnittlichen Dauer aller Leistungseinbrüche zeigt ein Vergleich der Mittelwerte in den beiden Bedingungen eine andere Tendenz als ein Vergleich der Mediane beider Bedingungen. Statistisch signifikant wurde der Unterschied in der zentralen Tendenz auch hier jedoch nicht ($z = -1.19$, $p = .234$, $N = 16$, $r = .21$).

6.2.2 Wirkung auf die Aufgabenbearbeitung (Hypothese H2)*Anzahl aller bearbeiteten und korrekt priorisierten Aufgaben (Hypothese H2a)*

Mit Adaptierungen haben Probanden im Durchschnitt 20 Aufgaben mehr korrekt priorisiert bearbeitet als in der Kontrollbedingung (Abbildung 46). Das entspricht einer Leistungssteigerung von 17%. Dieser Unterschied wurde auch statistisch signifikant ($t(15) = -3.17$, $p = .006$, $r = .63$).

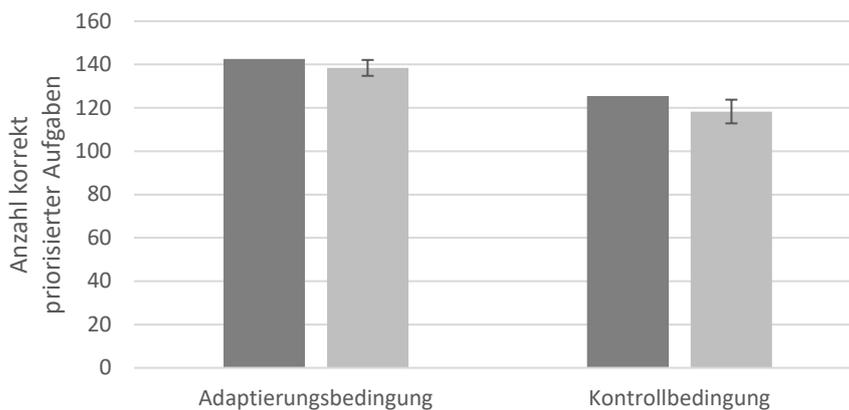


Abbildung 46. Mediane und Mittelwerte der Anzahl korrekt priorisierter Aufgaben in beiden Bedingungen

Durchschnittliche Präsenzdauer aller bearbeiteten und korrekt priorisierten Aufgaben (Hypothese H2b)

Mit Adaptierungen konnten die Probanden die Geschwindigkeit der Bearbeitung korrekt priorisierter Aufgaben um durchschnittlich 20% verbessern. Die Aufgaben waren durchschnittlich 7.5 s kürzer präsent als in der Kontrollbedingung. Statistisch signifikant wurde der Vergleich der zentralen Tendenzen allerdings nicht ($z = 0.36$, $p = .717$, $N = 16$, $r = -.06$).

Kumulierte Präsenzdauer korrekt priorisierter Aufgaben (Hypothese H2c)

Kumuliert waren die korrekt priorisierten Aufgaben mit Adaptierungen im Vergleich zur Kontrollbedingung um 18% kürzer präsent. Statistisch signifikant wurde dieser Unterschied jedoch nicht ($z = -1.24$, $p = .215$, $N = 16$, $r = -.22$).

6.2.3 Wirkung auf den diagnostizierten Nutzerzustand (Hypothese H3)

Häufigkeit von Episoden kritischer Nutzerzustandsausprägungen (Hypothese H3a)

Kritisch hohe Beanspruchung. Mit Adaptierungen wurde kritisch hohe Beanspruchung deskriptiv zwar häufiger diagnostiziert als in der Kontrollbedingung. Statistisch signifikant war dieser Unterschied allerdings nicht ($t(15) = -1.66, p = .117, r = .39$).

Falsch gerichtete Aufmerksamkeit. Deskriptiv war die Aufmerksamkeit in der Kontrollbedingung häufiger falsch gerichtet als in der Adaptierungsbedingung. Statistisch signifikant wurde auch dieser Unterschied jedoch nicht ($t(15) = 0.318, p = .755, r = .08$).

Durchschnittliche Dauer von Episoden kritischer Nutzerzustandsausprägungen (Hypothese H3b)

Kritisch hohe Beanspruchung. In der Adaptierungsbedingung fielen die Episoden kritisch hoher Beanspruchung durchschnittlich um über zwei Drittel kürzer aus als in der Kontrollbedingung. Sowohl der Median als auch der Mittelwert waren in der Kontrollbedingung größer als in der Adaptierungsbedingung (Abbildung 47). Dieser Unterschied wurde auch statistisch signifikant ($z = -2.59, p = .010, N = 16, r = -.46$).

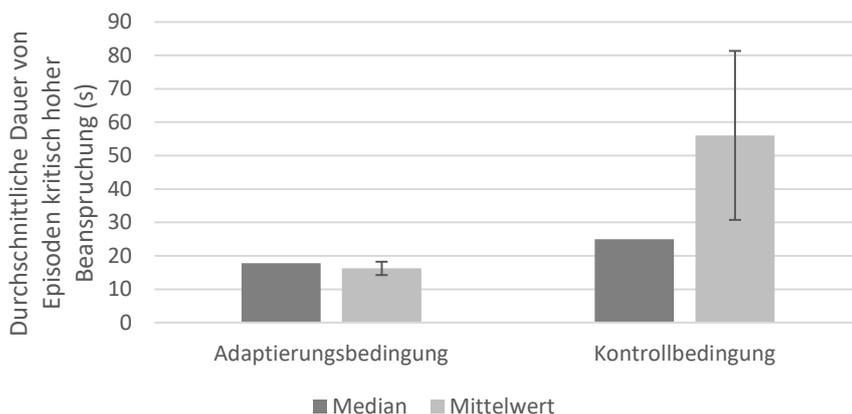


Abbildung 47. Mediane und Mittelwerte der durchschnittlichen Dauer von Episoden kritisch hoher Beanspruchung

Falsch gerichtete Aufmerksamkeit. Deskriptiv endeten Episoden falsch gerichteter Aufmerksamkeit in der Adaptierungsbedingung durchschnittlich schneller als in der Kontrollbedingung. Sowohl der Median als auch der Mittelwert der durchschnittlichen Dauer von Episoden falsch gerichteter Aufmerksamkeit waren in der Kontrollbedingung höher als in der Adaptierungsbedingung. Dieser Unterschied wurde allerdings statistisch nicht signifikant ($t(15) = 1.64, p = .123, r = .39$).

Kumulierte Dauer von Episoden kritischer Nutzerzustandsausprägungen (Hypothese H3c)

Kritisch hohe Beanspruchung. Probanden waren in der Adaptierungsbedingung signifikant kürzer kritisch beansprucht als in der Kontrollbedingung ($t(15) = 3.03, p = .008, r = .62$; Abbildung 48). Im Mittel wiesen die Probanden mit Adaptierungen fast 3.5 Minuten weniger kritisch hohe Beanspruchung auf.

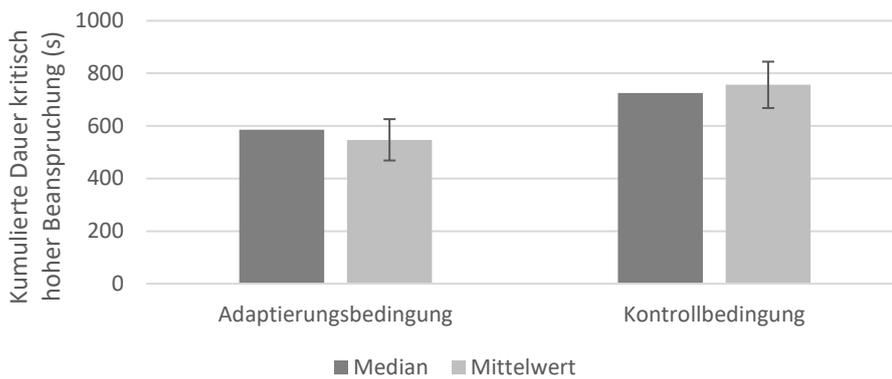


Abbildung 48. Mediane und Mittelwerte der kumulierten Dauer kritisch hoher Beanspruchung

Falsch gerichtete Aufmerksamkeit. Deskriptiv war die Aufmerksamkeit mit Adaptierungen für kürzere Zeit falsch gerichtet als in der Kontrollbedingung. Auch statistisch zeigt sich bei der kumulierten Dauer ein Trend in diese Richtung ($t(15) = 2.00, p = .064, r = .46$; Abbildung 49). Im Mittel war die Aufmerksamkeit mit Adaptierungen fast 3 Minuten weniger falsch gerichtet.

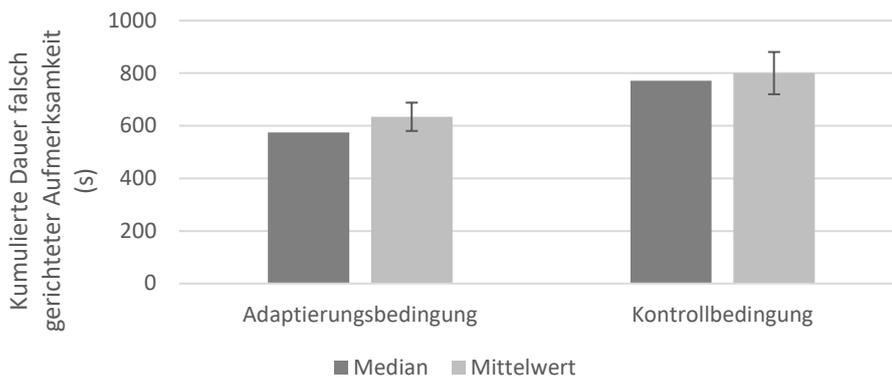


Abbildung 49. Mediane und Mittelwerte der kumulierten Dauer falsch gerichteter Aufmerksamkeit

6.2.4 Wirkung auf den subjektiven Nutzerzustand

Die subjektiv empfundene Anstrengung war bei Betrachtung der Mittelwerte mit aktiven Adaptierungsstrategien ($M = 9.75, SD = 2.08$, Skala von 1 bis 15) deskriptiv etwas höher als in der Kontrollbedingung ($M = 8.94, SD = 3.02$). Der Vergleich ist zwar nicht signifikant ($t(15) = -1.46, p = .165$), weist aber eine mittlere Effektgröße auf ($r = .36$).

Die subjektive Erschöpfung unterschied sich mit Adaptierungen ($M = 8.81, SD = 2.48$) lediglich geringfügig von der Kontrollbedingung ($M = 8.75, SD = 2.41$). Statistisch signifikant unterschied sie sich aber nicht ($t(15) = -0.141, p = .889, r = .04$).

6.2.5 Wirkung auf die Bearbeitung der Teilaufgaben

Um Näheres über die Wirkweise der Adaptierungsstrategien zu erfahren, wurde untersucht, wie sich die Adaptierungsstrategien auf die Teilaufgaben auswirkten. Dazu wurden sowohl Anzahl, kumulierte und durchschnittliche Präsenzdauer korrekt priorisierter Aufgaben als auch die Anzahl, die kumulierte und durchschnittliche Dauer der Leistungseinbrüche getrennt nach den einzelnen Aufgabenarten untersucht, indem die Adaptierungsbedingung mit der

Kontrollbedingung verglichen wurde. Deskriptive Statistiken und eine Ergebnisübersicht zu diesen Vergleichen sind in Anhang F.2 aufgeführt.

Zur Gewinnung weiterer Erkenntnisse über die Wirkung des Dynamischen Adaptierungsmanagements wurde in diesem Experiment außerdem geprüft, ob sich die Adaptierungen auf Fehler bei der Aufgabenbearbeitung auswirkten. Dazu wurden Fehler bei der Identifizierungsaufgabe sowie die Erkennung und Bearbeitung von Fakern auf Unterschiede zwischen Kontroll- und Adaptierungsbedingung untersucht. Auch hierzu sind deskriptive Statistiken und eine Ergebnisübersicht in Anhang F.2 aufgeführt.

Bekämpfen

Aufgabenbearbeitung. Jeder Proband hat alle vorhandenen Bekämpfungsaufgaben sehr zügig bearbeitet. Hinsichtlich der Anzahl, der durchschnittlichen und der kumulierten Präsenzdauer korrekt priorisierter Bekämpfungen gab es keinen statistisch signifikanten Unterschied zwischen beiden Bedingungen (alle p s > .338, alle $|r$ s < .17).

Leistungseinbrüche. Die Anzahl der Leistungseinbrüche war insgesamt sehr gering und mit Adaptierungen um 56% geringer als in der Kontrollbedingung. Dabei ergab sich ein statistischer Trend ($z = -1.73$, $p = .084$, $N = 16$, $r = .31$). Eine Mehrzahl von Probanden (56% in der Kontrollbedingung und 69% in der Adaptierungsbedingung) wies gar keine Leistungsbrüche bei Bekämpfungsaufgaben auf. Daher liegt der Median in beiden Bedingungen sowohl bei der Anzahl als auch bei der durchschnittlichen und kumulierten Dauer der Leistungseinbrüche bei 0.

Die durchschnittliche Dauer der Leistungseinbrüche bei Bekämpfungsaufgaben war mit Adaptierungen rund 61% kürzer. Dieser Unterschied wurde im Vergleich der zentralen Tendenz auch statistisch signifikant ($z = -2.03$, $p = .042$, $N = 16$, $r = -.36$; Abbildung 50). Zudem war die kumulierte Dauer der Leistungseinbrüche in der Adaptierungsbedingung marginal signifikant kürzer als in der Kontrollbedingung ($z = -1.86$, $p = .063$, $N = 16$, $r = .33$).

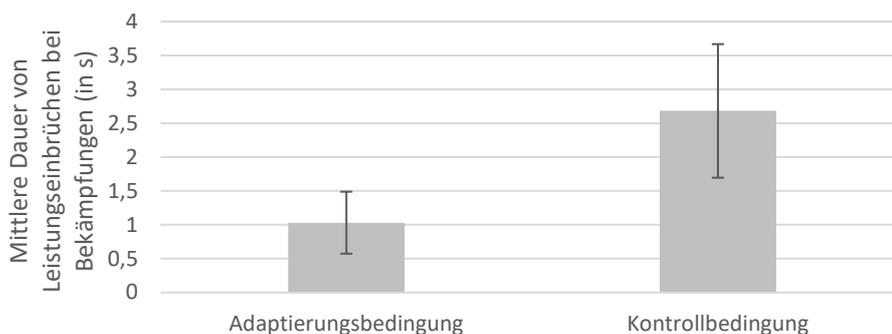


Abbildung 50. Mittlere Dauer von Leistungseinbrüchen bei Bekämpfungen

Warnen

Aufgabenbearbeitung. In beiden Bedingungen wurde keine Warnaufgabe aufgrund inkorrekt priorisierter Aufgaben ausgeschlossen. Demnach bestand nie zur gleichen Zeit ein Leistungseinbruch in einer Bekämpfungsaufgabe. Warnaufgaben blieben aber zum Teil bis zum Szenarioende unbearbeitet. So haben in der Adaptierungsbedingung zwei Probanden jeweils eine Warnaufgabe nicht bearbeitet, während in der Kontrollbedingung ein Proband zwei Warnaufgaben nicht erledigt hat. In beiden Bedingungen waren bei den meisten Probanden (75% in der Kontrollbedingung und 87.5% in der Adaptierungsbedingung) Warnaufgaben

durchschnittlich für weniger als 10 s präsent. Die Spannweite der Präsenzdauer reichte in der Adaptierungsbedingung von 2.97 s bis 10.91 s. In der Kontrollbedingung hingegen reichte sie von 3.06 s bis 28.03 s.

Warnaufgaben waren in der Adaptierungsbedingung im Durchschnitt um 31% kürzer präsent als in der Kontrollbedingung. Der Vergleich der Mediane der beiden Bedingungen reduzierte diesen Unterschied jedoch auf 23% und der Unterschied in der zentralen Tendenz wurde auch nicht statistisch signifikant ($z = -1.6, p = .109, N = 16, r = .28$). Ebenso unterschieden sich weder die Anzahl ($z = -0.82, p = .414, N = 16, r = .14$) noch die kumulierte Präsenzdauer ($z = -1.6, p = .109, N = 16, r = .28$) der korrekt priorisierten Warnaufgaben zwischen den beiden Bedingungen.

Leistungseinbrüche. Ähnlich wie bei den Bekämpfungsaufgaben traten Leistungseinbrüche auch bei Warnaufgaben selten auf. So zeigten in der Kontrollbedingung 38% der Probanden keinen oder einen Leistungseinbruch, wohingegen dies in der Adaptierungsbedingung auf 44% der Probanden zutraf. Nur ein Proband in der Kontrollbedingung zeigte bei mehr als 10 Warnaufgaben einen Leistungseinbruch. In der Kontrollbedingung dauerten Leistungseinbrüche bei 68% der Probanden durchschnittlich mindestens 10 s an. Mit Adaptierungen traf dies nur noch auf 12% der Probanden zu.

Im Mittel traten bei Warnaufgaben in der Adaptierungsbedingung 28% weniger Leistungseinbrüche auf als in der Kontrollbedingung, aber dieser Unterschied wurde statistisch nicht signifikant ($t(15) = 1.03, p = .321, r = .26$). Leistungseinbrüche bei Warnaufgaben wurden mit Adaptierungen ($M = 5.80\text{ s}, SD = 3.55\text{ s}$) jedoch fast dreimal so schnell beendet wie ohne ($M = 16.02\text{ s}, SD = 12.50\text{ s}$). Die Dauer der Leistungseinbrüche bei Warnaufgaben war sowohl durchschnittlich ($t(15) = 3.40, p = .004, r = .66$) als auch kumuliert ($z = -2.27, p = .023, N = 16, r = -.40$) signifikant geringer als in der Kontrollbedingung (Abbildung 51).

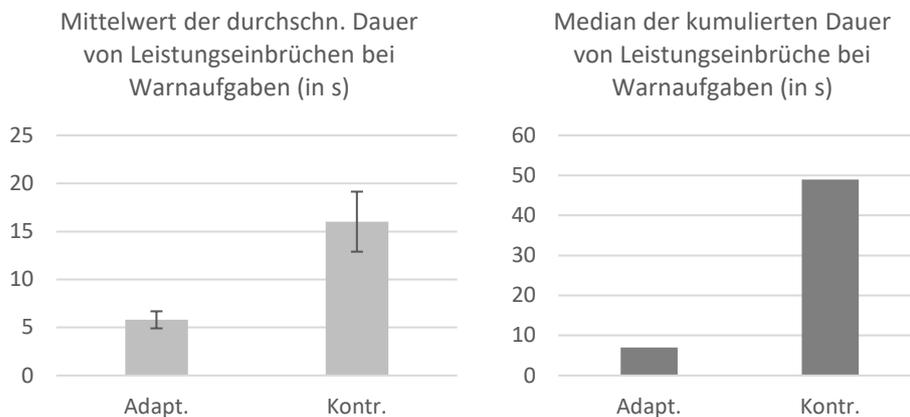


Abbildung 51. Mittelwerte der durchschnittlichen Dauer (links) und Mediane der kumulierten Dauer (rechts) von Leistungseinbrüchen bei Warnaufgaben

Identifizieren

Aufgabenbearbeitung. Im Mittel wurden in der Adaptierungsbedingung 36% mehr Identifizierungsaufgaben korrekt priorisiert bearbeitet als in der Kontrollbedingung (Abbildung 52). Dieser Unterschied wurde auch statistisch signifikant ($t(15) = -2.96, p = .010, r = .61$).

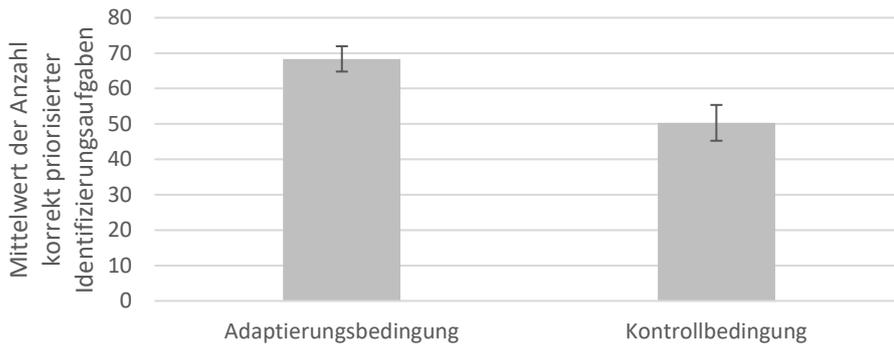


Abbildung 52. Mittelwerte der Anzahl korrekt priorisierter Identifizierungsaufgaben

Auffällig ist, dass mit Adaptierungen 9 von 16 Probanden sämtliche Identifizierungsaufgaben korrekt priorisiert bearbeiteten. In der Kontrollbedingung war dies bei keinem Probanden der Fall. Hier gab es deskriptiv einen deutlichen Effekt der Bedingung: In der Adaptierungsbedingung wurden durchschnittlich 6.63 Identifizierungsaufgaben falsch priorisiert ($SD = 14.61$), in der Kontrollbedingung waren es 24.25 ($SD = 20.13$). Demnach reduzierte sich mit Adaptierungen die Anzahl der nicht korrekt priorisierten Identifizierungen um 73%.

Identifizierungsaufgaben waren in der Adaptierungsbedingung für durchschnittlich 16.93 s ($SD = 4.49$ s) präsent, in der Kontrollbedingung hingegen mehr als doppelt so lange ($M = 39.14$ s, $SD = 48.4$ s). Bei Betrachtung der Mediane reduziert sich dieser Unterschied zwar stark, ist aber dennoch in der gleichen Richtung vorhanden und der Unterschied in der zentralen Tendenz ist auch statistisch signifikant ($z = -2.07$, $p = .039$, $N = 16$, $r = .37$). Der große Unterschied zwischen der Betrachtung der Mittelwerte und der Mediane (vgl. Abbildung 53) kommt vermutlich durch drei Extremwerte in der Kontrollbedingung zustande. Davon waren bei einem Probanden Identifizierungsaufgaben für durchschnittlich 53 s und bei den anderen beiden für mehr als durchschnittlich 155 s präsent. In der Adaptierungsbedingung hingegen waren bei keinem Probanden Identifizierungsaufgaben länger als durchschnittlich 28.61 s vorhanden.

Die zentralen Tendenzen der kumulierten Präsenzdauer unterschieden sich nicht signifikant voneinander ($z = -0.72$, $p = .469$, $N = 16$, $r = .13$).

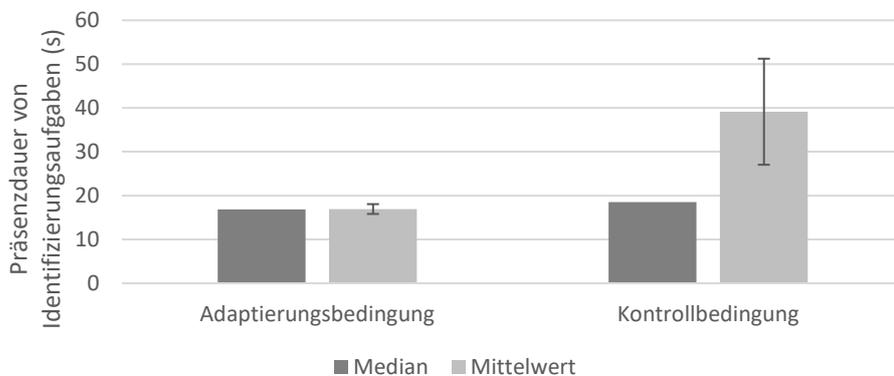


Abbildung 53. Mediane und Mittelwerte der Präsenzdauer von Identifizierungsaufgaben

Leistungseinbrüche. Im Mittel gab es in der Adaptierungsbedingung 15 Leistungseinbrüche bei Identifizierungsaufgaben. Das sind 34% weniger als in der Kontrollbedingung. Der Unterschied in den Medianen geht in die gleiche Richtung, ist jedoch mit 15% um etwa die Hälfte kleiner (vgl. Tabelle 51). Trotzdem weist die Kontrollbedingung auch statistisch signifikant mehr Leistungseinbrüche auf als die Adaptierungsbedingung ($z = -2.45, p = .014, N = 16, r = -.43$).

In der Kontrollbedingung wiesen 25% der Probanden bei mehr als 30 Identifizierungsaufgaben Leistungseinbrüche auf. In der Adaptierungsbedingung war dies nur bei einem Probanden (6%) der Fall. Mit Adaptierungen konnten Leistungseinbrüche beim Identifizieren im Durchschnitt auch mehr als doppelt so schnell wie in der Kontrollbedingung beendet werden. Sie dauerten in der Kontrollbedingung sowohl durchschnittlich ($z = -2.74, p = .006, N = 16, r = -.48$) als auch kumuliert ($z = -2.69, p = .007, N = 16, r = -.48$) signifikant länger als in der Adaptierungsbedingung (Abbildung 54).

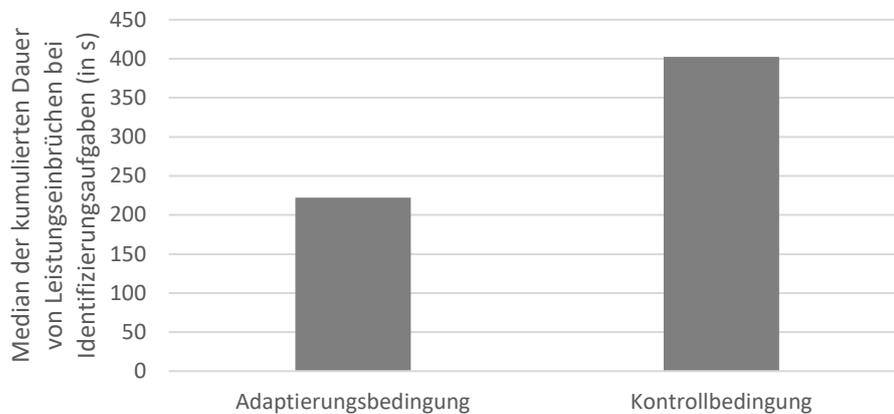


Abbildung 54. Mediane der kumulierten Dauer der Leistungseinbrüche bei Identifizierungsaufgaben

NRTT-Aufgaben

Aufgabenbearbeitung. Mit Adaptierungen wurden signifikant mehr NRTT-Aufgaben korrekt priorisiert bearbeitet als in der Kontrollbedingung. Die meisten Probanden (37.5%) bearbeiteten mit Adaptierungen acht NRTT-Aufgaben korrekt priorisiert. In der Kontrollbedingung bearbeiteten die meisten Probanden (43.8%) hingegen nur fünf NRTT-Aufgaben korrekt priorisiert. Dieser Unterschied ist in der zentralen Tendenz der beiden Bedingungen statistisch signifikant ($z = -2.58, p = .01, N = 16, r = -.46$). Die zentralen Tendenzen der durchschnittlichen ($z = -0.05, p = .959, N = 16, r = -.01$) und kumulierten ($z = -1.5, p = .134, N = 16, r = -.27$) Präsenzdauern korrekt priorisierter NRTT-Aufgaben hingegen unterschieden sich zwischen den beiden Bedingungen nicht signifikant.

Leistungseinbrüche. Bei 50% der Probanden in der Kontrollbedingung und bei 63% der Probanden in der Adaptierungsbedingung konnte keine NRTT-Aufgabe innerhalb von 30 s gelöst werden, sodass bei diesen jede NRTT-Aufgabe einen Leistungseinbruch auslöste. Der Unterschied in der Anzahl der Leistungseinbrüche ist statistisch nicht signifikant ($t(15) = 1.29, p = .218, r = .32$). Auch die kumulierten ($z = -0.05, p = .959, N = 16, r = -.01$) und durchschnittlichen ($z = -0.10, p = .918, N = 16, r = -.02$) Dauern der Leistungseinbrüche unterschieden sich zwischen den beiden Bedingungen statistisch nicht signifikant voneinander.

Fehler in der Identifizierungsaufgabe

In der durchschnittlichen Anzahl der falsch identifizierten Kontakte lag kein signifikanter Unterschied zwischen den Bedingungen vor ($z = -0.73$, $p > .466$, $N = 16$, $r = -.13$). Identifizierungsfehler konnten jedoch mit Hilfe der Adaptierungen tendenziell schneller korrigiert werden. Die zur Korrektur benötigte Zeit war sowohl für die durchschnittliche ($z = -1.82$, $p = .069$, $N = 16$, $r = -.32$) als auch die kumulierte Dauer ($z = -1.79$, $p = .074$, $N = 16$, $r = -.32$) mit Adaptierungen marginal signifikant kürzer als in der Kontrollbedingung.

In den Leistungseinbrüchen durch Identifizierungsfehler zeigten sich die Unterschiede noch deutlicher. Zwar kamen diese selten vor (weshalb der Median in allen Bedingungen 0 betrug), die Anzahl der Leistungseinbrüche war in der Kontrollbedingung jedoch trotzdem marginal signifikant höher ($z = -1.70$, $p = .090$, $N = 16$, $r = -.30$). Die durchschnittliche Dauer der Leistungseinbrüche war in der Kontrollbedingung sogar signifikant höher ($z = -2.19$, $p = .028$, $N = 16$, $r = -.39$), die kumulierte Dauer ebenfalls ($z = -2.19$, $p = .028$, $N = 16$, $r = -.39$).

Tabelle 53 in Anhang F.2 fasst die Ergebnisse zusammen.

Identifizierung von Fakern

Insgesamt übersahen in der Kontrollbedingung drei Probanden jeweils einen Faker, in der Adaptierungsbedingung dagegen wurden alle Faker erfolgreich bearbeitet. Die Anzahl der bearbeiteten Faker war damit in der Kontrollbedingung marginal signifikant geringer ($z = -1.73$, $p = .083$, $N = 16$, $r = -.31$). Auch erfolgte die Bearbeitung ohne Adaptierungen langsamer: Sowohl durchschnittlich, als auch kumuliert waren Faker in der Kontrollbedingung signifikant länger präsent (beide: $z = -2.72$, $p = .007$, $N = 16$, $r = -.48$).

Die Anzahl der Leistungseinbrüche durch Faker unterschied sich zwischen den Bedingungen nicht signifikant. Jedoch war die durchschnittliche Dauer der Leistungseinbrüche in der Kontrollbedingung signifikant höher ($t(15) = -2.50$, $p = .025$, $r = -.54$), die kumulierte Dauer ebenfalls ($t(15) = -4.41$, $p = .001$, $r = -.75$).

Eine Ergebnisübersicht bietet Tabelle 54 in Anhang F.2.

6.2.6 Unterschiede zwischen Szenario 1 und Szenario 2

Wie bereits in Abschnitt 6.1.3 beschrieben, gab es kleine Unterschiede in der Aufgabenanzahl zwischen den Szenarien. Szenario 2 wies eine zusätzliche NRTT- und eine zusätzliche Bekämpfungsaufgabe auf. Da die Adaptierungen gemäß Hypothesen die Aufgabenbearbeitung erleichtern sollten, könnte es sein, dass die zwei zusätzlichen Aufgaben in der Kontrollbedingung deutlich schwerer zu erfüllen waren als in der Adaptierungsbedingung. Daher war es notwendig, zu überprüfen, ob sich diese Ungleichheit in den Szenarien auf die Aufgabenbearbeitung oder auf das Auftreten kritischer Nutzerzustandsausprägungen auswirkte.

Dazu wurden alle Variablen, die im Zusammenhang mit der Überprüfung der Wirksamkeit der Adaptierungen untersucht wurden, auch für den Vergleich von Szenario 1 mit Szenario 2 statistisch analysiert. Da sowohl Szenarien als auch Bedingungen balanciert wurden und somit jeder Proband jedes Szenario in entweder der Kontroll- oder der Adaptierungsbedingung bearbeitet hat, konnten mögliche Unterschiede in den Szenarien auf die gleiche Weise wie mögliche Unterschiede in der Kontroll- im Vergleich zur Adaptierungsbedingung untersucht werden. Die Ergebnisse dieser Vergleiche sind in Anhang F.3 aufgeführt.

Global betrachtet (über alle Teilaufgaben hinweg) kam es nicht zu Effekten der Szenarien. Dass Interaktionen zwischen der Schwierigkeit und der Experimentalbedingung auftraten, kann nicht ausgeschlossen werden, ist aber aufgrund der Balancierung und in Anbetracht der Ergebnisse unwahrscheinlich. Bei Warnaufgaben traten auch Effekte auf, die sich nicht durch Unterschiede in der Aufgabenzahl erklären lassen. Diese sind möglicherweise auf Feinheiten im Szenariodesign zurückzuführen (z. B. Ablenkung durch andere Aufgaben, ungünstige Überlagerung von Aufgaben). Derartige Effekte müssen in realitätsnahen Experimenten in Kauf genommen werden, wenn zur Vermeidung von Lerneffekten nicht mehrmals das exakt gleiche Szenario verwendet werden soll.

6.2.7 Subjektive Beurteilung der Adaptierungen

Da für die subjektive Bewertung der Adaptierungen keine Vergleichswerte existieren, erfolgt die Beschreibung deskriptiv. Dafür wurden die Antworten auf der 15-Punkt-Skala in 5 Kategorien von sehr positiv bis sehr negativ aufgeteilt. In Bezug auf die subjektive Empfindung polarisierten die dynamisch ausgelösten Adaptierungen, wobei die Mehrheit der Probanden (60%) sie als eher hilfreich oder sehr hilfreich bewertete (Abbildung 55, oben). Die übrigen Versuchsteilnehmer empfanden die Adaptierungen jedoch als störend. Ebenfalls 60% der Probanden gaben an, dass sie die Adaptierungen als leistungsfördernd empfanden (Abbildung 55, unten). Etwa jeder vierte Proband gab an, dass sich die Leistung durch die Adaptierung gefühlt verschlechterte.

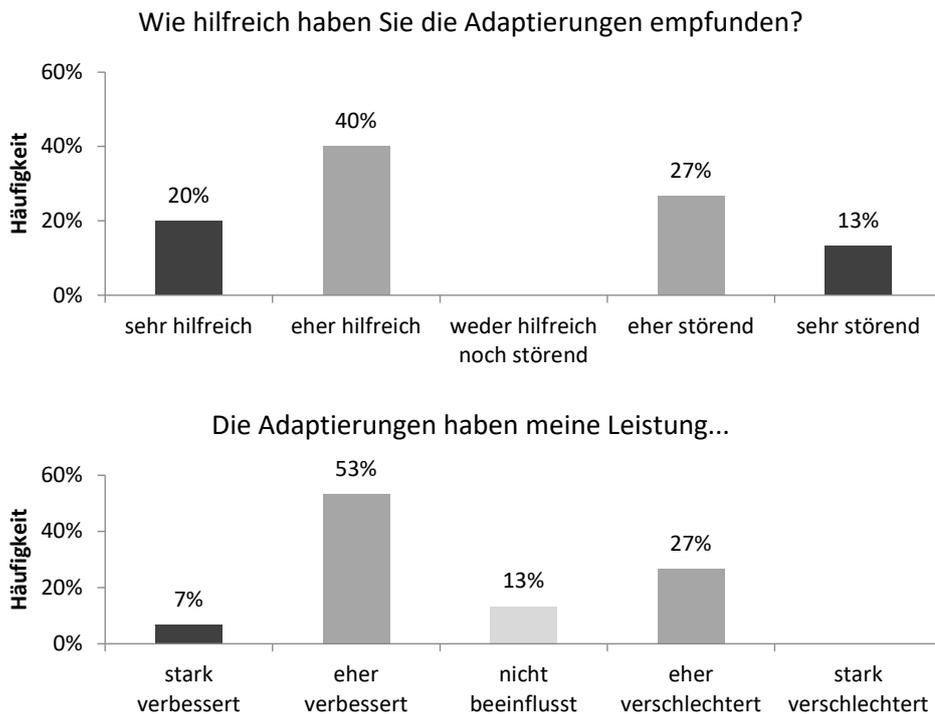


Abbildung 55. Subjektive Beurteilung der Adaptierungen bzgl. Nützlichkeit und Leistung

Bei der gefühlten Wirkung auf die Beanspruchung ergab sich kein klares Bild. 47% der Probanden erfuhren durch die Adaptierungen eine gefühlte Reduktion der Beanspruchung, nahezu ebenso viele (46%) gaben jedoch an, dass die Adaptierungen eine Erhöhung der Beanspruchung verursacht haben (Abbildung 56, oben). Eine positivere Wirkung der Adaptierungen wurde von den Probanden in Bezug auf die Ausrichtung der Aufmerksamkeit

wahrgenommen. Diesbezüglich gaben 73% der Versuchsteilnehmer an, durch die Adaptierungen eine Verbesserung erfahren zu haben, während 14% angaben, dass sich die Ausrichtung der Aufmerksamkeit verschlechtert hat (Abbildung 56, unten).

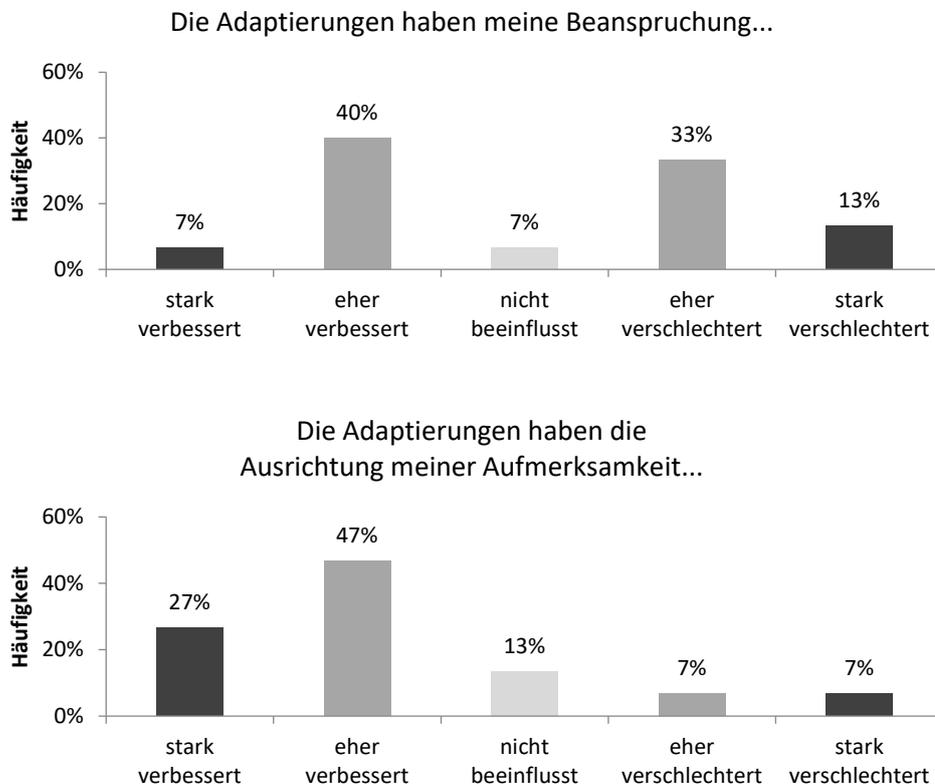


Abbildung 56. Subjektive Beurteilung der Adaptierungen bzgl. Beanspruchung und Aufmerksamkeit

6.3 Diskussion

Im Gegensatz zum vorangegangenen Experiment wurden die fünf verschiedenen Adaptierungsstrategien nun nicht mehr isoliert voneinander, sondern dynamisch ausgelöst, sodass Adaptierungen im Wechsel und auch gleichzeitig auftreten konnten. Methodisch wurde außerdem dem Umstand Rechnung getragen, dass die Adaptierungen die korrekte Priorisierung der Aufgaben unterstützen. Es wurden daher nur die Aufgaben betrachtet, bei deren Bearbeitung kein Leistungseinbruch in einer wichtigeren Aufgabe bestand.

Während die einzelnen Adaptierungsstrategien im vorangegangenen Experiment in der subjektiven Bewertung überzeugen konnten, objektiv aber nur in Teilaspekten signifikant auf Leistung und kritische Nutzerzustandsausprägungen wirkten, kamen die Vorteile der Adaptierungen im Validierungsexperiment deutlicher zum Tragen. So konnte durch das Dynamische Adaptierungsmanagement die Anzahl der Leistungseinbrüche über alle Aufgaben hinweg signifikant reduziert werden. Auch konnten durch die Adaptierungen kognitive Ressourcen freigemacht werden, die es den Probanden ermöglichen, im Durchschnitt 20 Aufgaben mehr korrekt priorisiert zu bearbeiten als in der Kontrollbedingung. Deutlich wird die Wirkung des Dynamischen Adaptierungsmanagements auch daran, dass Episoden kritisch hoher Beanspruchung durchschnittlich um über zwei Drittel kürzer ausfielen als in der Kontrollbedingung. Auch insgesamt ging der Zeitanteil mit kritischen Zustandsdiagnosen

zurück: Kumuliert traten pro Szenario mit Adaptierungen im Schnitt rund 3.5 Minuten weniger kritisch hohe Beanspruchung und knapp 3 Minuten weniger falsch gerichtete Aufmerksamkeit auf. Die folgenden Abschnitte diskutieren die Ergebnisse mit Blick auf die Hypothesen.

6.3.1 Wirkung auf Leistungseinbrüche (H1) und Aufgabenbearbeitung (H2)

Im Durchschnitt gab es in der Adaptierungsbedingung 24% weniger Leistungseinbrüche als in der Kontrollbedingung. Bei Aufgaben mit jeweils höchster Priorität erfuhren Probanden durch die Adaptierungen so signifikant weniger Leistungseinbrüche. Der Unterschied wird auch dadurch anschaulich, dass in der Kontrollbedingung jeder zweite Proband mehr als 30 Leistungseinbrüche aufwies, mit Adaptierungen waren es nur jeder achte. Somit konnte die Hypothese H1a bestätigt werden.

Außerdem bearbeiteten Probanden in der Adaptierungsbedingung signifikant mehr Aufgaben korrekt priorisiert (+17%). Somit wurde auch Hypothese H2a bestätigt. Während mit Adaptierungen nur eine Person (6%) weniger als 100 Aufgaben korrekt priorisiert bearbeitete, traf dies in der Kontrollbedingung auf 25% der Probanden zu.

Durch die dynamische Auslösung kontextadäquater Adaptierungen wurde die zur Verfügung stehende Zeit offenbar sowohl zur effizienteren Aufgabenbearbeitung genutzt, als auch eine globale Stabilisierung der Leistung bewirkt. Ein Hinweis darauf sind die fast durchgehend geringeren Standardabweichungen in der Adaptierungsbedingung.

Die Adaptierungen halfen allerdings nicht dabei, aufgetretene Leistungseinbrüche zu verkürzen [H1b/c] oder Aufgaben insgesamt schneller zu bearbeiten [H2b/c]. Die Tatsache, dass nur die Anzahl der bearbeiteten Aufgaben, nicht aber die Dauer der Aufgabenpräsenz abnahm, kann methodisch darin begründet liegen, dass die Dauer der Aufgabenpräsenz für den Probanden irrelevant ist, solange er die Aufgabe innerhalb der vorgegebenen Zeit bearbeitet. Eine Verzögerung bis zum vorgegebenen Zeitlimit kann sogar der Priorisierung dienlich sein. Schneller ist hier nicht immer besser, so dass die Leistungsmaße künftiger Untersuchungen die zulässige Bearbeitungsdauer berücksichtigen sollten.

6.3.2 Wirkung auf kritische Ausprägungen des Nutzerzustands (H3)

In der Bedingung mit Dynamischem Adaptierungsmanagement waren Probanden gemäß Diagnose signifikant weniger Zeit kritisch beansprucht. Während die Beanspruchung bei Probanden in der Adaptierungsbedingung durchschnittlich etwa 38% der Zeit kritisch erhöht war, war dies in der Kontrollbedingung durchschnittlich etwa 53% der Zeit der Fall. Durchschnittlich wurden mit Adaptierungen fast dreieinhalb Minuten weniger kritisch hohe Beanspruchung diagnostiziert als in der Kontrollbedingung. Die Adaptierungen konnten also sowohl die durchschnittliche Dauer kritischer Beanspruchungsepisoden als auch die Gesamtdauer kritischer Beanspruchung signifikant verkürzen. Für die Zustandsdimension Beanspruchung können die Hypothesen H3b und H3c daher als bestätigt angesehen werden. Der Effekt kann auch dadurch illustriert werden, dass eine Phase kritischer Beanspruchung in der Kontrollbedingung bei etwa 38% der Probanden durchschnittlich länger als eine halbe Minute dauerte. Mit dynamisch ausgelösten Adaptierungen traf dies auf nur 6% der Probanden zu.

In Bezug auf die Zustandsdimension Aufmerksamkeit wiesen die Probanden im Validierungsexperiment mit dem Dynamischen Adaptierungsmanagement marginal signifikant weniger Zeit falsch gerichtete Aufmerksamkeit auf als in der Kontrollbedingung. Während in der Kontrollbedingung die Aufmerksamkeit durchschnittlich 56% der Szenariodauer als falsch

gerichtet diagnostiziert wurde, war sie in der Adaptierungsbedingung nur etwa 44% der Zeit kritisch erhöht. Damit kann die Hypothese H3c für die Zustandsdimension Aufmerksamkeit zwar statistisch nicht bestätigt werden, der statistische Trend und die Effektgröße deuten aber trotzdem auf eine wirksame Unterstützung der Priorisierung durch die Adaptierungsstrategien hin. Gestützt wird dieser Befund dadurch, dass fast drei Viertel der Versuchsteilnehmer angaben, dass die Adaptierungen subjektiv einen positiven Effekt auf die Ausrichtung der Aufmerksamkeit hatten. Jedoch konnte die durchschnittliche Dauer der einzelnen Episoden falsch gerichteter Aufmerksamkeit nicht signifikant verkürzt werden. Hypothese H3b kann daher für die Zustandsdimension Aufmerksamkeit nicht als bestätigt angesehen werden, obwohl auch dieser Vergleich einen mittelgroßen Effekt zugunsten der Adaptierungsbedingung aufwies.

Die Anzahl kritischer Nutzerzustandsepisoden, sowohl für hohe Beanspruchung als auch für falsch gerichtete Aufmerksamkeit, konnte durch das Dynamische Adaptierungsmanagement ebenfalls nicht signifikant verringert werden. Die Hypothese H3a musste demnach für beide Zustandsdimensionen verworfen werden. Dies ist jedoch dadurch erklärbar, dass Adaptierungen eine Reaktion auf kritische Zustandsausprägungen sind. Das Auftreten kritischer Zustände ist also eine zwingende Voraussetzung für das Auslösen der Adaptierung. Wenn kritische Zustandsausprägungen demnach in der Kontrollbedingung deutlich länger bestanden, zählte der gesamte Zeitraum auch nur als eine Auslösung, während sie in der gleichen Zeit mit Adaptierungen mehrfach ausgelöst werden konnten. Demnach spricht es für die Adaptierung, dass nicht signifikant häufiger kritische Zustandsdiagnosen in der Adaptierungsbedingung aufgetreten sind und es ist schlüssig, dass die Wirkung der Adaptierungen auf den Nutzerzustand sich nur in der Dauer der kritischen Zustandsepisoden zeigt.

6.3.3 Wirkung auf den subjektiven Nutzerzustand

Die Adaptierungen wurden von der Mehrheit der Probanden (60%) als hilfreich und leistungssteigernd empfunden. Jedoch war dieses Bild nicht so klar wie in den vorangegangenen Experimenten, denn die übrigen 40% empfanden die Adaptierungen als störend und 27% als leistungsmindernd. Bezüglich der subjektiven Beanspruchung polarisierte die dynamische Adaptierung besonders stark. 47% der Probanden gaben an, dass die Beanspruchung mit den Adaptierungen geringer war, fast ebenso viele (46%) empfanden mit den Adaptierungen jedoch eine stärkere Beanspruchung.

Für die empfundene Steigerung der Beanspruchung in der Adaptierungsbedingung gibt es verschiedene Erklärungsansätze. Einerseits wurden mithilfe der Adaptierungen tatsächlich mehr Aufgaben bearbeitet, was natürlich eine höhere Beanspruchung erklären kann. Andererseits kann das Phänomen durch die häufige und dynamische Auslösung von Adaptierungen bedingt sein, da die Wahrnehmung und Verarbeitung wechselnder Adaptierungen ebenfalls kognitive Ressourcen erfordert: Die Informationsdarstellung wird durch die Adaptierung verändert und muss neu mit dem bestehenden mentalen Modell abgeglichen werden, das Situationsbewusstsein muss aktualisiert und neue Informationen integriert werden. Zudem erfordern viele Adaptierungen eine Reaktion, wie die Verlagerung der Aufmerksamkeit oder den Wechsel der Aufgabe (*task switching*; z. B. Monsell, 2003; Wickens & McCarley, 2008b). Auch ist es möglich, dass Leistungseinbrüche in der Kontrollbedingung vom Probanden unbemerkt blieben, so dass diese relativ unterbrechungsfrei ihre selbst festgelegte Aufgabensequenz abarbeiten konnten. Durch die Adaptierungen wurden Fehler bei der Bearbeitung oder Priorisierung von Aufgaben hervorgehoben (z. B. Hinweis auf einen falsch identifizierten

Kontakt oder eine übersehene Warnaufgabe). Dadurch wird der Proband zum einen bei der Aufgabenbearbeitung unterbrochen, zum anderen wird er sich seiner Leistungsdefizite bewusst und strengt sich mehr an, um die gestellten Anforderungen zu erfüllen. Insbesondere die intrusiveren Strategien zur Lenkung der Aufmerksamkeit wurden im qualitativen Feedback von einigen Probanden als ablenkend und bevormundend bezeichnet. Trotzdem kann argumentiert werden, dass das Übersehen eines nötigen Bekämpfungsvorgangs einen intrusiven Hinweis durch das System rechtfertigt. Schließlich können durch die Ablenkung, z. B. bei Vorliegen wichtiger Aufgaben, Gefahren verhindert und die Leistung gesteigert werden, wodurch diese Kosten gleichermaßen erwartet wie gerechtfertigt sind. Hier zeigt sich jedoch der Bedarf für eine sorgfältige Kosten-Nutzen-Abwägung beim Einsatz von Adaptierungen.

Eine weitere mögliche Erklärung für die gestiegene Anzahl negativer subjektiver Bewertungen der Adaptierungen ist die Beobachtung, dass manche Probanden die Adaptierungen insgesamt schlecht bewerteten, obwohl ihnen nur eine spezifische Adaptierungsstrategie besonders missfiel. Das besondere Missfallen einzelner Strategien führte dann zur Abwertung des Gesamtkonzepts. In zukünftigen Untersuchungen wäre es daher ratsam, trotz dynamischer Auslösung auch jede Strategie einzeln bewerten zu lassen, um ein differenzierteres Bild zu erzeugen.

6.3.4 Wirkung auf die Bearbeitung der Teilaufgaben

Im Folgenden wird auf die Leistung bei der Bearbeitung der einzelnen Teilaufgaben eingegangen, die untersucht wurden, um ein besseres Verständnis der Wirkweise der Adaptierungen zu erlangen.

Ein besonderes Interesse galt dabei den Warn- und Bekämpfungsaufgaben aufgrund ihrer hohen Priorität. Interessanterweise konnte hier weder die bearbeitete Anzahl noch die Präsenzdauer korrekt priorisierter Aufgaben durch die Adaptierungen verbessert werden. Auch die Anzahl der Leistungseinbrüche bei Warn-Aufgaben wurde nicht reduziert, bei Bekämpfungen gab es marginal signifikant weniger Leistungseinbrüche. Dieser insgesamt geringe Einfluss der Adaptierungen wirkt zunächst überraschend, ist aber durch die hohe Priorität und verhältnismäßig geringe Anzahl der Aufgaben erklärbar. Aufgrund der hohen Priorität wurden häufig alle anderen Aufgaben frühzeitig unterbrochen, wenn sich eine Warn- oder Bekämpfungsaufgabe anbahnte, so dass dann auch sehr kurzfristig reagiert wurde, was für diese Aufgabenarten möglicherweise zu Deckeneffekten führte. Die Betrachtung der Mediane (siehe Anhang F.2) stützt diese Annahme.

Erfolgreich verminderten die Adaptierungen jedoch die Dauer der Leistungseinbrüche bei hoch priorisierten Aufgaben. So waren sowohl die durchschnittliche als auch die kumulierte Dauer von Leistungseinbrüchen von Warn-Aufgaben signifikant kürzer, wenn Adaptierungen aktiv waren. Bei Bekämpfungsaufgaben war die kumulierte Dauer marginal signifikant kürzer. Offenbar verhinderten die Adaptierungen, dass hoch priorisierte Aufgaben für längere Zeit übersehen wurden. Diese Effekte stützen die obige Aussage, dass die Adaptierungsstrategien wirksam bei der Priorisierung assistieren.

Auf geringer priorisierte Aufgaben, d.h. Identifizierungs- und NRTT-Aufgaben, wirkten sich die Adaptierungen ebenfalls positiv aus. In der Adaptierungsbedingung wurden signifikant mehr Identifizierungsaufgaben korrekt priorisiert bearbeitet als in der Kontrollbedingung. Diese Aufgaben waren auch für kürzere Zeit präsent, was auf eine schnellere Bearbeitung hindeutet. Außerdem traten mit Adaptierungen weniger und kürzere Leistungseinbrüche bei

Identifizierungsaufgaben auf. Demnach haben die Adaptierungen die angemessene Bearbeitung von Identifizierungsaufgaben effektiv unterstützt.

NRTT-Aufgaben wurden in der Adaptierungsbedingung signifikant häufiger korrekt priorisiert bearbeitet als in der Kontrollbedingung, die Bearbeitung erfolgte jedoch nicht signifikant schneller. Auch auf die Anzahl oder Dauer der Leistungseinbrüche hatten die Adaptierungen keinen signifikanten Einfluss, was an der zeitintensiven Bearbeitung von NRTT-Aufgaben liegen kann, so dass die Mehrzahl von NRTT-Aufgaben zu Leistungseinbrüchen führte.

Die Kombination von vermuteten Deckeneffekten bei hoch priorisierten Aufgaben und Leistungssteigerung bei niedrig priorisierten Aufgaben legt nahe, dass die Adaptierungen erfolgreich kognitive Ressourcen für die Aufgabenbearbeitung freimachen konnten. Diese Interpretation wird nachvollziehbar, wenn die hoch priorisierten Aufgaben (Warnen und Bekämpfen) als Hauptaufgabe, die niedrig priorisierten (Identifizieren und Anlegen von NRTTs) als Zweitaufgabe im Sinne eines Dual-Task-Paradigmas (vgl. Kerr, 1973; Wickens, 1991) betrachtet werden. Die Leistung in der Zweitaufgabe gilt dann als „Gradmesser für die verbleibenden kognitiven Ressourcen“ (Janke, 2003, S. 9), die nicht durch die Bearbeitung der Erstaufgabe verbraucht wurden. Dass im hier vorliegenden Experiment mehr Zweitaufgaben erfolgreich bearbeitet wurden, wenn Adaptierungen genutzt wurden, deutet daraufhin, dass in der Adaptierungsbedingung mehr kognitive Ressourcen vorhanden waren.

Abschließend wurde der Einfluss der Adaptierungen auf die Entdeckung und Korrektur falscher Identifizierungen untersucht. Zum einen wurden dafür Kontakte herangezogen, die von den Probanden falsch identifiziert wurden, zum anderen wurde die Erkennung sogenannter „Faker“ betrachtet, also neutrale Kontakte, die ihr Verhalten plötzlich ändern und daher unidentifiziert werden müssen. Wenig überraschend wirkten die Adaptierungen sich nicht auf die Anzahl der falsch identifizierten Kontakte aus, denn die Auswahl der korrekten Identifizierung wurde von den Adaptierungen nicht unterstützt. Erkannte Falschidentifizierungen wurden jedoch mit Hilfe der Adaptierungen marginal signifikant schneller korrigiert. Faker wurden in der Kontrollbedingung von drei Probanden übersehen, während in der Adaptierungsbedingung alle Faker erfolgreich bearbeitet wurden. Die Korrektur erfolgte in der Adaptierungsbedingung zudem signifikant schneller als in der Kontrollbedingung.

6.4 Schlussfolgerungen

Im Validierungsexperiment konnte die Wirksamkeit des Dynamischen Adaptierungsmanagements insgesamt erfolgreich nachgewiesen und somit die Forschungsfrage 4 beantwortet werden. Tatsächlich konnte Leistungseinbrüchen und kritischen mentalen Zuständen der Nutzer durch dynamische Adaptierung der MMI in der gewählten Aufgabenumgebung effektiv entgegengewirkt werden. Die situativ ausgewählten Adaptierungen konnten die Aufgabenbearbeitung in vielen Aspekten erfolgreich unterstützen, vor allem hinsichtlich der korrekten Priorisierung von Aufgaben in einer anspruchsvollen Multitasking-Situation mit hoher Aufgabenlast. Die Gesamtdauer kritischer Zustandsdiagnosen ging für beide untersuchten Zustandsdimensionen deutlich zurück, so dass festgestellt werden kann, dass die kritischen Nutzerzustandsdimensionen „hohe Beanspruchung“ und „falsch gerichtete Aufmerksamkeit“ durch die dynamische Auslösung von Adaptierungen effektiv adressiert wurden.

Durch das Dynamische Adaptierungsmanagement konnten die Probanden insgesamt mehr Aufgaben korrekt priorisiert bearbeiten. Durch die dynamische Auslösung kontextadäquater

Adaptierungen wurde die zur Verfügung stehende Zeit offenbar sowohl zur effizienteren Aufgabenbearbeitung genutzt, als auch eine globale Stabilisierung der Leistung bewirkt.

Eine Analyse der Leistung in Bezug auf die einzelnen Teilaufgaben ergab, dass hoch priorisierte Aufgaben in beiden Bedingungen weitgehend verlässlich bearbeitet wurden und daher kein wesentliches Verbesserungspotenzial bestand. Jedoch führte die dynamische Adaptierung offenbar zu freien kognitiven Ressourcen, die für die Bearbeitung zusätzlicher gering priorisierter Aufgaben genutzt wurden. So konnte die Dauer von Leistungseinbrüchen für alle Teilaufgaben außer Anlegen von NRTT reduziert werden. Ebenfalls stark profitierten die Probanden von den Adaptierungen bei der Detektion von Irregularitäten. So wurde die Dauer von Leistungseinbrüchen sowohl bei der Korrektur falsch identifizierter Kontakte als auch bei der Umidentifizierung von Kontakten, die ihr Verhalten im Verlauf des Szenarios änderten („Faker“), mit Adaptierungen signifikant reduziert.

Dass die Adaptierungen im dynamischen Zusammenspiel einen so viel größeren Effekt hatten als bei der Einzelbetrachtung in Experiment 1, kann zusammenfassend (frei nach Aristoteles) damit begründet werden, dass das Ganze größer als die Summe seiner Teile ist: Ein komplexes Gesamtsystem kann aufgrund emergenter Effekte – also solcher, die erst durch das Zusammenwirken der Systemkomponenten entstehen – anders reagieren, als sich aus der isolierten Betrachtung seiner Komponenten schließen lässt. Es mag aus Gründen der Komplexitätsreduktion verlockend sein, einen gewissen Effekt (z. B. einen kognitiven Problemzustand) zu isolieren, um ihn durch eine adaptive Reaktion zu adressieren. In Kombination mit anderen Interaktionen und im Zusammenwirken verschiedener Nutzerzustände können emergente Effekte jedoch Phänomene hervorrufen, die auf der Untersystemebene nicht vorhersehbar waren. So ist erklärbar, dass das Dynamische Adaptierungsmanagement seine Vorteile erst in breiterer Konfiguration ausspielen kann. Demnach wäre zu erwarten, dass die Verbesserung der internen Variabilität des Systems durch Berücksichtigung noch weiterer Nutzerzustände oder die Ergänzung weiterer Adaptierungsstrategien zu noch größeren Vorteilen führen kann, als in dieser Arbeit demonstriert wurde.

7 Zusammenfassung und Bewertung

Ziel der vorliegenden Arbeit war der Entwurf einer technischen Komponente für ein soziotechnisches System, die durch Adaptierung der Mensch-Maschine-Interaktion (MMI) an den Nutzer- und Aufgabenkontext aktiv zur Leistung und Stabilität des Gesamtsystems beiträgt. Adaptive MMI kann dabei helfen, den Menschen „im Loop“ zu halten, wenn die Natur der Aufgabe den Verbleib der Verantwortung beim Menschen erfordert. Physiologisch adaptive Funktionalitäten ermöglichen es der technischen Komponente eines Mensch-Maschine-Systems dabei, über einen biokybernetischen Loop situationsspezifisch mit dem Bediener in Wechselwirkung zu treten, um die Zielerreichung des Mensch-Maschine-Gesamtsystems aktiv zu unterstützen. So bleibt der Mensch – seinen Fähigkeiten und der Situation entsprechend – optimal involviert und die Verantwortung für die Tätigkeit kann länger bei ihm verbleiben. Eine Voraussetzung dafür ist, dass die Technik den Zustand der Umwelt und des Menschen erfassen und bewerten kann.

Arbeiten auf diesem Gebiet vernachlässigen häufig, dass der kognitive Zustand des Menschen ein multidimensionales Konstrukt ist. Oft wird nur ein Zustand isoliert betrachtet, z. B. die Beanspruchung oder die Aufmerksamkeit, wodurch Abhängigkeiten und Wechselwirkungen mit anderen Zustandsdimensionen unberücksichtigt bleiben. Zudem wird die Auslösung von Adaptierung häufig allein an das Auftreten diagnostizierter Problemzustände geknüpft. Dieses Vorgehen unterschätzt die menschliche Fähigkeit zur Selbstadaptierung und lässt ohne weitere Betrachtung des sich kontinuierlich verändernden Nutzungskontexts keine Schlüsse darüber zu, wie eine kontextadäquate Unterstützung aussehen könnte.

Als Lösungsansatz für diese Problemstellung wurde in der vorliegenden Arbeit eine technische Komponente für ein Dynamisches Adaptierungsmanagement entworfen, mit dem diagnostizierten Leistungseinbrüchen und kritischen Nutzerzuständen durch situativ ausgewählte Unterstützungsstrategien entgegengewirkt werden kann. Das Dynamische Adaptierungsmanagement wurde auf Basis psychologischer Theorien zu kognitiven Engpässen konzeptionell-deduktiv entworfen und beispielhaft für eine Aufgabe aus dem Bereich „militärische Luftraumüberwachung“ als experimenteller Prototyp implementiert. Neben physiologischen und verhaltensbasierten Maßen nutzt es auch situativen Kontext, um bedarfsadäquate Adaptierungen auszulösen und diese bei Veränderung der vorliegenden Bedingungen gegebenenfalls wieder zu deaktivieren. In einer Versuchsreihe aus drei Laborexperimenten wurde das Konzept empirisch evaluiert, wodurch wichtige und interessante Erkenntnisse über die Wirksamkeit der einzelnen Adaptierungsstrategien und über die Wirksamkeit des Gesamtkonzepts gewonnen werden konnten.

7.1 Entwurfsphase

Hauptergebnis dieser Arbeit ist das Konzept des Dynamischen Adaptierungsmanagements, welches eine bedarfsgerechte und kontextsensitive Anpassung der MMI an kritische mentale Nutzerzustände ermöglicht. Dafür nimmt es aus der Aufgabenumgebung und einer (im Promotionsvorhaben von Schwarz (2019) entwickelten und validierten) Diagnosekomponente Informationen über kritische Nutzerzustandsdimensionen sowie den aktuellen Nutzungskontext (Aufgaben- und Anforderungssituation) entgegen und verarbeitet diese. In der Interaktion von menschlicher und technischer Komponente wird dadurch ein „Verständnis“ der Maschine für

den Menschen erzeugt, das bei den „Handlungen“ der Maschine Berücksichtigung findet. Insbesondere wird der situative Nutzungskontext herangezogen, um mögliche Ursachen für kritische Nutzerzustände zu erkennen. Dazu ermittelt das Dynamische Adaptierungsmanagement auf Basis des Diagnoseoutputs zunächst, ob eine Situation vorliegt, die eine Adaptierung der MMI erfordert. Um einer möglichen produktiven Selbstregulierung des Menschen nicht entgegenzuwirken, wird Adaptierungsbedarf nur angenommen, wenn in Verbindung mit einem kritisch ausgeprägten mentalen Nutzerzustand auch ein Leistungseinbruch detektiert wird.

Die „Handlung“ des Dynamischen Adaptierungsmanagements in Bezug auf den Menschen besteht nun darin, die MMI kontext- und bedarfsgerecht anzupassen, indem Adaptierungsziele bestimmt und Adaptierungsstrategien dynamisch aktiviert oder deaktiviert werden. Dafür wählt es regelbasiert ein oder mehrere passende Adaptierungsziele aus und prüft, ob passende Adaptierungsstrategien verfügbar sind, mit denen das gewählte Ziel erreicht werden kann. In dem Fall wird die Auslösung einer Adaptierungsstrategie in der Aufgabenumgebung angefordert. Da die Adaptierungen situativ wirken und Veränderungen in der MMI auch kognitive Kosten verursachen (z. B. durch Unterbrechung der aktuellen Aufgabe oder Beeinträchtigung des Situationsbewusstseins), werden Adaptierungen nur so lang beibehalten, wie akuter Adaptierungsbedarf besteht. Sofern Leistung, Aufgabenkontext oder Nutzerzustand den Adaptierungsbedarf ändern, werden aktive Strategien im Rahmen einer Erfolgskontrolle deaktiviert. Mit der erfolgreichen Konzeption des Dynamischen Adaptierungsmanagements wurde **Forschungsfrage 1** adressiert.

Daneben bildeten die Herleitung und der Entwurf geeigneter Adaptierungsstrategien einen weiteren Schwerpunkt der Entwurfsphase. Adaptierungsstrategien sind spezifische Veränderungen der MMI, mittels derer die Informationsdarstellung dynamisch zur Laufzeit angepasst werden kann. Um Eigenschaften und Bedarfe des Menschen angemessen zu berücksichtigen, wurde auch hierbei ein humanzentrierter Ansatz verfolgt. Adaptierungsstrategien und die Bedingungen für deren Einsatz wurden aus theoretischen Konzepten und Modellen der Kognitionspsychologie hergeleitet. Damit einzelne Strategien gezielt auf kritisch ausgeprägte Nutzerzustandsdimensionen wirken zu können, wurden Engpässe in der menschlichen Informationsverarbeitung analysiert und die Erkenntnisse aus dieser Analyse gemäß **Forschungsfrage 2** beim Entwurf der Strategien berücksichtigt. Insgesamt wurden sechs Adaptierungsstrategien zunächst in abstrahierter Form hergeleitet, damit sich diese auf verschiedene Anwendungsumgebungen übertragen lassen. Dadurch, dass das Adaptierungsmanagement aus einem Pool von Adaptierungsstrategien schöpfen kann, wird im technischen System eine hohe interne Variabilität erzeugt, die es ihm ermöglicht, situativ angemessen auf Probleme in verschiedenen Nutzerzustandsdimensionen zu reagieren und die Reaktion zudem dynamisch an den Nutzungskontext anzupassen. Art und Anzahl der Strategien sind flexibel und können je nach Bedarf erhöht werden.

Die erarbeiteten Konzepte und Entwürfe für das Dynamische Adaptierungsmanagement und die hergeleiteten Adaptierungsstrategien wurden dann für eine simulierte Aufgabe aus dem Bereich der militärischen Luftraumüberwachung exemplarisch operationalisiert (**Forschungsfrage 3**). Dabei wurden sowohl das Dynamische Adaptierungsmanagement als auch die konzipierten Adaptierungsstrategien für zunächst drei kritische Nutzerzustände funktional implementiert, die mit der multifaktoriellen Nutzerzustandsdiagnose von Schwarz (2019) valide detektiert werden können: hohe Beanspruchung, falsch gerichtete Aufmerksamkeit und passive aufgabenbezogene Müdigkeit. Die prototypische Implementierung als Experimentalumgebung

zeigte, dass sich das allgemein formulierte Konzept des Dynamischen Adaptierungsmanagements auf eine relevante Domäne übertragen lässt und dort wie vorgesehen funktioniert: In einer simulierten Luftraumüberwachungsaufgabe wurden Adaptierungsziele regelkonform ausgewählt und Adaptierungen der MMI flexibel und bedarfsgerecht vor- und zurückgenommen.

7.2 Evaluationsphase

In der Evaluationsphase wurde die Wirkung des Dynamischen Adaptierungsmanagements auf Leistung und Nutzerzustände in drei Laborexperimenten untersucht. Auf Basis der Evaluationsergebnisse wurden die technische Implementierung und/oder das Versuchsdesign nach jedem Experiment im Sinne eines iterativen Vorgehens angepasst. Aufgrund des humanzentrierten Ansatzes bei der Bearbeitung nahm die Evaluationsphase in dieser Arbeit wesentlichen Raum ein, um Funktionsweise, Wirkung und Akzeptanz des Ansatzes ausreichend beleuchten zu können. Nach einer umfangreichen Voruntersuchung wurden zunächst die entworfenen Adaptierungsstrategien einzeln auf ihre Wirkung untersucht (Experiment 1) und schließlich in einem Validierungsexperiment das Gesamtkonzept empirisch validiert (Experiment 2). Die Wirksamkeit einzelner Strategien konnte dabei entgegen der ursprünglichen Erwartung nur sehr eingeschränkt belegt werden (vgl. auch Fuchs et al., 2020). Dieses Erkenntnis stand jedoch in deutlichem Widerspruch zu den durchweg guten subjektiven Bewertungen durch die Probanden. Es wurde daher vermutet, dass bei der Einzelbetrachtung die interne Variabilität nicht ausreichend war und die Wirkung der Adaptierungsstrategien zu punktuell auftrat, um robuste statistische Effekte zu erzielen. Diese Beobachtung bestätigt die Notwendigkeit für einen multidimensionalen Diagnoseansatz von Schwarz (2019) und das in der vorliegenden Arbeit entworfene Dynamische Adaptierungsmanagement. Bei der Evaluation des Gesamtkonzepts, bei dem fünf Adaptierungsstrategien dem technischen System eine hohe interne Variabilität ermöglichten, konnte die Wirksamkeit des Dynamischen Adaptierungsmanagements dann auch empirisch belegt werden. **Forschungsfrage 4** – ob Leistungseinbrüchen und kritischen mentalen Zuständen mit dem effektiv entgegengewirkt werden kann – konnte somit nach Experiment 2 positiv beantwortet werden.

Die wesentlichen Erkenntnisse aus der Evaluationsphase werden nun im Folgenden abschließend zusammengefasst.

Bereits in der Voruntersuchung stellte sich heraus, dass die Induktion „passiver aufgabenbezogener Müdigkeit“ sowohl gemäß Diagnose als auch gemäß subjektiver Einschätzung der Probanden gelang, die zumutbare Experimentaldauer jedoch vermutlich nicht ausreichte, um Auswirkungen auf die Leistung in ausreichendem Umfang zu beobachten. Deshalb wurde auf eine weitere Untersuchung dieses Zustands verzichtet und es kann in dieser Arbeit keine Aussage über die Fähigkeit des Dynamischen Adaptierungsmanagements zur Mitigation passiver aufgabenbezogener Müdigkeit getroffen werden. Auch die Adaptierungsstrategien konnten in der Voruntersuchung aus objektiver Sicht nicht überzeugen. Daher wurden sowohl Untersuchungsparameter (z. B. die Aufgabendichte) als auch die Gestaltung und Funktionsweise einzelner Adaptierungsstrategien im Sinne einer iterativen Vorgehensweise angepasst.

Eine weitere Erkenntnis aus der Voruntersuchung war eine starke Wechselwirkung zwischen hoher Beanspruchung und falsch gerichteter Aufmerksamkeit: Diese Zustände ließen sich nicht unabhängig voneinander induzieren, da sich mit Erhöhung der Aufgabendichte auch die Ausrichtung der Aufmerksamkeit verschlechterte. Erklärbar ist dieses Phänomen am Modell der

menschlichen Informationsverarbeitung von Wickens & Hollands (2000). Die begrenzten Aufmerksamkeitsressourcen steuern einen Selektionsmechanismus, der die Wahrnehmung beeinflusst. Muss aufgrund erhöhter Beanspruchung mehr Anstrengung für die Wahrnehmung aufgewendet werden, wirkt dies als Inhibitor für Aufmerksamkeitsallokation (vgl. SEEV-Modell von Wickens & McCarley, 2008). Diese beobachtbare Wechselwirkung zwischen zwei Nutzerzuständen bestätigt ebenfalls die Wichtigkeit einer multidimensionalen Betrachtung des Nutzerzustands, wie er in der Diagnose von Schwarz (2019) und in der vorliegenden Arbeit verfolgt wird.

In Experiment 1 wurde das Experimentalparadigma angepasst, um die Wechselwirkung zwischen hoher Beanspruchung und falsch gerichteter Aufmerksamkeit zu berücksichtigen. Hier wirkten sich die Strategien Visual Cueing und Decluttering positiv auf kritische Nutzerzustände aus, jedoch hatte keine Strategie signifikante Effekte auf Leistung und Aufgabenbearbeitung. Die in der Einzelbetrachtung eher schwache Wirkung stand in starkem Widerspruch zu den durchweg positiven subjektiven Bewertungen der Adaptierungsstrategien: Insgesamt beurteilten die Teilnehmer von Experiment 1 die Wirkung der Adaptierungen deutlich besser als sie objektiv war. Zum einen mag die Teststärke zu gering gewesen sein, um signifikante Effekte zu beobachten, zum anderen sorgten methodische Herausforderungen (vgl. Abschnitt 5.2.6) möglicherweise dafür, dass potenzielle positive Effekte bei der individuellen Auslösung der Strategien durch andere Faktoren kompensiert wurden. Ein weiteres Erklärungsmodell ist, dass die Beschränkung der Untersuchung auf eine einzelne Dimension des Nutzerzustands und eine einzige Adaptierungsstrategie nicht das volle Spektrum möglicher Probleme abdeckt. So könnten die guten Beurteilungen auf eine gute Wirkung hinweisen, die aber zu punktuell auftrat, um auf Szenarioebene einen nachweisbaren Effekt zu erzeugen. Auch wurden die Ursachen des kritischen Zustands möglicherweise nicht ausreichend adressiert, da sich bei Betrachtung nur einer Zustandsdimension auch die Zahl der berücksichtigten Kontextfaktoren reduziert. Die Ergebnisse bekräftigen insoweit, dass die Adressierung einzelner Nutzerzustände durch einzelne Adaptierungen nicht hinreichend ist, sondern eine multidimensionale Betrachtung des Nutzerzustands mit einer bedarfsgerechten dynamischen Adaptierung der MMI angestrebt werden sollte.

Experiment 1 zeigte zudem, dass die Kosten des Einsatzes von Adaptierungen nicht zu unterschätzen sind. Insbesondere muss mit Einbußen in der Leistung bei anderen Teilaufgaben gerechnet werden. Die aufmerksamkeitslenkenden Adaptierungen wurden so gestaltet, dass sie keine Aufgabenwechsel erzwingen, sondern dem Operateur die Option lassen, die aktuelle Aufgabe zuerst zu beenden. Erfolgt jedoch eine (wenn auch angemessene) Unterbrechung der Aufgabe, wird diese aufgrund von *Task Switching*- oder *Task-Mixing*-Kosten später oder langsamer bearbeitet (Monsell, 2003; Wickens & McCarley, 2008b). Soweit niedrig priorisierte Aufgaben negativ beeinflusst werden, um die Bearbeitung wichtiger und/oder dringlicher Aufgaben sicherzustellen oder zu beschleunigen, sind diese Effekte erwartet und vertretbar. Die mit der Adaptierung assoziierten kognitiven Kosten sollten aber bei der Konzeption adaptiver MMI Berücksichtigung finden. Um angemessene Leistungseinbußen zu berücksichtigen, fokussierte die Auswertung im zweiten Experiment auf „korrekt priorisierte Aufgaben“.

In der empirischen Evaluation des Gesamtkonzepts (Experiment 2) konnte das Dynamische Adaptierungsmanagement dann auch objektiv überzeugen: Im dynamisch gesteuerten Zusammenspiel der Strategien konnte die Leistung erheblich gesteigert und die Dauer kritischer Zustandsausprägungen deutlich reduziert werden. So wurden mit dem Dynamischen Adaptierungsmanagement 17% mehr Aufgaben korrekt priorisiert bearbeitet und die Episoden

kritischer Nutzerzustände fielen kürzer aus: Je 24-minütigem Szenario wurden mit Adaptierungen im Schnitt rund 3.5 Minuten weniger kritisch hohe Beanspruchung und knapp 3 Minuten weniger falsch gerichtete Aufmerksamkeit diagnostiziert als ohne Adaptierungen. Die Anzahl der diagnostizierten Leistungseinbrüche verringerte sich mit Adaptierungen um durchschnittlich 24%. Die Aufgabenbearbeitung erfolgte mit dem Dynamischen Adaptierungsmanagement also angemessener und die korrekte Priorisierung der Aufgaben wurde durch das Konzept effektiv unterstützt. Die Ergebnisse aus dem Validierungsexperiment zeigen somit, dass das Dynamische Adaptierungsmanagement wesentliche Herausforderungen der adaptiven MMI erfolgreich adressiert. Mit dem erarbeiteten Konzept trugen sowohl die menschliche als auch die technische Komponente aktiv zur Leistung und Stabilität des Gesamtsystems bei. Das Dynamische Adaptierungsmanagement leistete seinen Beitrag, indem es Leistungseinbrüche und kritische Nutzerzustandsausprägungen bei den Probanden erkannte und eingriff, um mögliche Ursachen und deren Folgen für die Leistung zu reduzieren. Das Validierungsexperiment bestätigt somit, dass Leistungseinbrüchen und kritischen mentalen Zuständen mit dem Dynamischen Adaptierungsmanagement effektiv entgegengewirkt werden kann, indem mehrere kontextadäquate Adaptierungen situativ eingesetzt werden.

7.3 Zielsetzung und Anforderungen

7.3.1 Adressierung der Gestaltungslücke

Die in Abschnitt 1.2 erarbeitete Gestaltungslücke wurde mit der vorliegenden Arbeit geschlossen, indem ein Vorgehen und eine technische Komponente für ein Dynamisches Adaptierungsmanagement entworfen wurden, mit dem Adaptierungsstrategien kontextsensitiv aktiviert und deaktiviert werden können. Das Dynamische Adaptierungsmanagement ist in mehrerlei Hinsicht innovativ:

- Es wurde, im Gegensatz zu vielen anderen informatischen oder ingenieurwissenschaftlichen Ansätzen, konsequent humanzentriert entworfen und basiert auf Theorien und Modellen der Kognitionspsychologie, um bekannte Probleme mit automatisierten Systemen durch strukturierte Berücksichtigung von Engpässen in der menschlichen Informationsverarbeitung zu verringern.
- Es berücksichtigt, basierend auf dem Output der multifaktoriellen Nutzerzustandsdiagnose von Schwarz (2019), die mehrdimensionale Natur des Nutzerzustands und kann bei der technischen Reaktion auf kritische Zustandsausprägungen zwischen verschiedenen Dimensionen differenzieren.
- Kontext- und bedarfsadäquate Unterstützungsstrategien werden erst zur Laufzeit in Abhängigkeit von kritischen Zustandsausprägungen und der aktuellen Anforderungssituation ausgelöst und bei verändertem Bedarf auch zurückgenommen.
- Über Kontextinformationen zur aktuellen Aufgaben- und Anforderungssituation kann auf mögliche Ursachen festgestellter Zustandsveränderungen geschlossen werden. So kann das Dynamische Adaptierungsmanagement kritischen Nutzerzuständen nicht nur symptomatisch, sondern in gewissen Grenzen auch ursachenbezogen entgegenwirken.

Eine wesentliche Zielsetzung bei der Konzeption des Dynamischen Adaptierungsmanagements war die Berücksichtigung von Kontext bei der Auswahl von Adaptierungen (vgl. Abschnitt 1.1.2). Schon Winter et al. (1997) forderten für intelligente Agenten eine Berücksichtigung des Aufgabenstatus, des Systemstatus und des kognitiven Status des

Bedieners. Die Auslösung von Adaptierungen war in den meisten bisherigen Ansätzen jedoch an statische Bedingungen für einen Nutzerzustand geknüpft, etwa: Wenn hohe Beanspruchung diagnostiziert wird, automatisiere Aufgabe X, bis die Beanspruchung wieder gering ist. Um kontextbasiert zu entscheiden, wann, was und wie adaptiert werden soll, verknüpft das Dynamische Adaptierungsmanagement Systemereignisse, Leistungsindikatoren und Nutzerverhalten mit Diagnosen des Nutzerzustands. Eine bedarfsadäquate Reaktion des technischen Systems erfolgt, indem ein oder mehrere Adaptierungsstrategien flexibel zu- oder abgeschaltet werden, wie es Situation und Nutzerzustand gerade erfordern. Dabei ist neuartig, dass die adaptive Reaktion in Abhängigkeit vom mentalen Nutzerzustand und den Kontextinformationen aus einem Pool verfügbarer Strategien in nahezu Echtzeit ausgewählt und konfiguriert wird, um die aktuellen Ziele der Adaptierung in der vorliegenden Anforderungssituation zu erreichen.

7.3.2 Beachtung allgemeiner Prinzipien für Forschung in der gestaltungsorientierten Wirtschaftsinformatik

Nach Österle et al. (2010) muss Forschung in der gestaltungsorientierten Wirtschaftsinformatik vier Prinzipien befolgen: (1) Abstraktion, (2) Originalität, (3) Begründung und (4) Nutzen. Nachfolgend wird beschrieben, wie diese Prinzipien in der Arbeit Beachtung fanden:

Abstraktion bedeutet nach Österle, dass ein Artefakt auf eine Klasse von Problemen anwendbar sein muss. Sowohl das Dynamische Adaptierungsmanagement als auch die beispielhaften Adaptierungsstrategien wurden zunächst abstrahiert entworfen (Abschnitt 3.1), so dass die erarbeiteten Konzepte auf verschiedene Domänen und Anwendungsfälle anwendbar sind.

Originalität bedeutet, dass ein Artefakt einen innovativen Beitrag zum publizierten Wissensstand leisten muss. Die Ausführungen zu wissenschaftlichen Beiträgen der Arbeit (Abschnitt 1.6) und zur Adressierung der Gestaltungslücke (Abschnitt 7.3.1) zeigen, dass dies in mehrerlei Hinsicht der Fall ist. Im Gegensatz zu vielen anderen informatischen oder ingenieurwissenschaftlichen Ansätzen wurde der vorliegende Lösungsansatz konsequent humanzentriert entworfen und basiert auf Theorien und Modellen der Kognitionspsychologie, um bekannte Probleme mit automatisierten Systemen durch strukturierte Berücksichtigung von Engpässen in der menschlichen Informationsverarbeitung zu verringern.

Begründbarkeit. Ein Artefakt muss nach Österle et al. nachvollziehbar begründet werden und validierbar sein. Dies erfolgte, indem Gestaltungslücken aus dem Stand der Forschung und bisherigen Ansätzen abgeleitet wurden und die Konstruktion der Adaptierungsstrategien argumentativ-deduktiv aus theoretischen Grundlagen der Kognitionspsychologie (Abschnitte 2.1 bis 2.3) erfolgte. Die Validierbarkeit wurde durch Operationalisierung in einer relevanten Domäne erreicht. Dem humanzentrierten Ansatz der Arbeit entsprechend wurde der Entwurf in empirischen Evaluationen untersucht und validiert.

Schließlich muss ein Artefakt heute oder in Zukunft einen *Nutzen* für die Anspruchsgruppen erzeugen können, um den Prinzipien von Österle et al. zu genügen. Der erzeugte Nutzen wurde in einem Validierungsexperiment (Kapitel 6) für eine relevante Domäne untersucht und quantifiziert. Zudem werden im Ausblick (Kapitel 8) weitere mögliche Anwendungsfelder benannt und beschrieben, in denen der entwickelte Ansatz nutzbringend eingesetzt werden kann.

7.3.3 Berücksichtigung der Erkenntnisse aus der Analysephase

In Abschnitt 2.6 wurde eine Reihe von Erkenntnissen aus dem Hintergrundwissen und dem Stand der Forschung aufgeführt, die bei der Gestaltung und Konzeption des Dynamischen Adaptierungsmanagements Berücksichtigung finden sollten. Tabelle 25 stellt dar, wie diese Erkenntnisse in der Lösung beachtet wurden.

Tabelle 25. Berücksichtigung der Erkenntnisse aus der Analysephase der Arbeit

Abschn.	Erkenntnis	Berücksichtigung
2.6.1	Adaptierungen kontext- und situationsspezifisch auswählen	Die Auswahl einer passenden Strategie erfolgt in nahezu Echtzeit auf Basis von Merkmalen der Anforderungssituation (Aufgabenstatus, Aufgabenpriorität), Nutzerverhalten (selektierte Objekte, Klickverhalten) und dem diagnostizierten Nutzerzustand.
2.6.2	Kosten der Adaptierung bedenken	Adaptierungen werden nur ausgelöst, wenn und solange ihr Nutzen gerechtfertigt ist. Die dynamische Konfiguration von Adaptierungsstrategien erlaubt die Verringerung kognitiver Kosten je nach Situation (z. B. geringe Intrusivität bei geringer Kritikalität), wurde in dieser Arbeit jedoch nur konzeptionell berücksichtigt, um die Komplexität der experimentellen Untersuchungen zu begrenzen.
2.6.3	Zielerreichung überprüfen	Wenn die Voraussetzungen für den Einsatz einer Adaptierung (z. B. Nutzerzustand unkritisch, Leistung unkritisch) nicht mehr gegeben sind, wird die Adaptierung wieder beendet. Eine ausführlichere Erfolgskontrolle wurde konzeptionell erarbeitet.
2.6.4	Umgang mit mehreren Problemzuständen ermöglichen	Verschiedene Adaptierungsstrategien können gleichzeitig ausgelöst werden, um mehrere Problemzustände zu adressieren. Durch Regelsätze wird sichergestellt, dass keine Konflikte entstehen, sondern nur komplementär wirkende Strategien zusammenwirken.
2.6.5	Geeignete Interventionsvariablen ermitteln	Jede konzipierte Adaptierungsstrategie nutzt eine bestimmte Interventionsvariable, um indirekt auf den zu adressierenden Nutzerzustand zu wirken. So verringert bspw. Automation die Aufgabenanzahl und Decluttering erhöht die Salienz zu bearbeitender Kontakte.
2.6.6	Oszillation von Nutzerzuständen und Adaptierungen vermeiden	Durch Parametrisierung können Adaptierungen so zurückhaltend wie möglich, aber so intrusiv wie nötig konfiguriert werden, um eine Instabilität des Systems durch schnelle Oszillation von Nutzer- und Adaptierungszuständen zu vermeiden. Die dynamische Konfiguration von Adaptierungsstrategien wurde in dieser Arbeit zwar konzeptionell berücksichtigt, jedoch nicht experimentell untersucht. Beobachteten Oszillationen wurde durch gestalterische Maßnahmen bei der Operationalisierung der Adaptierungen entgegengewirkt.
2.6.7	Nicht-deterministischen Charakter der Kognition berücksichtigen	Da die menschliche Reaktion auf die Adaptierung nicht deterministisch ist, wird der beobachtbare Effekt der Adaptierung im Rahmen einer Erfolgskontrolle mit dem Adaptierungsziel abgeglichen und in Bezug auf die Aufgabenleistung und die adressierten kognitiven Zustände bewertet.
2.6.8	Unzulänglichkeiten von Laboraufgaben vermeiden	Um zu vermeiden, dass die beobachteten Effekte auf Laborkünstlichkeiten zurückzuführen sind, erfolgte die Untersuchungen anhand einer realitätsnahen Aufgabe aus dem Bereich der militärischen Luftraumüberwachung.

7.4 Einordnung und Abgrenzung zu anderen Arbeiten

Das hier bearbeitete Thema tangiert Forschungsarbeiten aus anderen Disziplinen und Fachgebieten, die im Folgenden vorgestellt werden sollen. Schnittmengen und mögliche Anknüpfungspunkte werden dargestellt und herausgearbeitet.

7.4.1 Interruption Management

Durch adaptierungsbedingte Aufgabenwechsel entstehen kognitive Kosten: *Task Switching*- oder *Task-Mixing*-Kosten, die mit der Unterbrechung und späteren Wiederaufnahme unterbrochener Aufgaben einhergehen. Wickens und McCarley (2008b) erläutern die Gründe und die attentiven Mechanismen im Detail. Mögliche Folgen sind eine langsamere Bearbeitung, mehr Fehler und schlechtere Entscheidungen (Monsell, 2003; Adamczyk & Bailey, 2004). Die Unterbrechungsfähigkeit (*interruptability*) von Menschen kann jedoch mit einem aktiven *Interruption Management* (Adamczyk et al., 2005) optimiert werden. Dabei werden opportune Momente für die Unterbrechung identifiziert, bei denen die negativen Folgen reduziert sind.

Im vorliegenden Systemkonzept könnten die kognitiven Kosten durch Adaptierungen möglicherweise reduziert werden, indem deren Auslösung auf Zeitpunkte mit hoher *Interruptability* (z. B. nach Abschluss einer Aufgabe) verschoben würde. Die Nachteile der verzögerten Hilfestellung (z. B. für das Situationsbewusstsein) müssten jedoch sorgfältig gegen die Vorteile des reduzierten *Task Switching* abgewogen werden.

7.4.2 Attentive User Interfaces

Während Adamczyk et al. (2005) für das *Interruption Management* primär Aufgabenmodelle nutzten, um Unterbrechungen zu optimieren, zielen *Attentive User Interfaces* (AUI; Vertegaal, 2003; Vertegaal & Shell, 2008) darauf ab, die Aufmerksamkeit zu erfassen, die Aufmerksamkeitsressourcen zu bewerten und ggf. zu steuern (Vertegaal et al., 2006). Meist wird dazu Kontext aus dem Blickverhalten des Nutzers abgeleitet. DeGuzman et al. (2022) untersuchten beispielsweise, wie mit einem adaptiven AUI die Aufmerksamkeit beim Fahren überwacht und moduliert werden kann. Chen et al. (2007) erweiterten AUI um weitere physiologische Maße, um das Timing von Unterbrechungen zu optimieren.

In der für die vorliegende Arbeit genutzten Diagnosekomponente wird der Fokus der Aufmerksamkeit bisher lediglich über die Auswahl eines Objekts mit der Maus ermittelt. Die Nutzung von Blickbewegungsmessung (*Eye Tracking*) könnte die Diagnose falsch gerichteter Aufmerksamkeit deutlich verbessern. Mit *Eye Tracking* kann der aktuelle Fokus der visuellen Aufmerksamkeit bereits auf Wahrnehmungs- statt erst auf Handlungsebene bewertet werden. Dieses Vorgehen ist somit zum einen schneller und zum anderen besonders auch zur Analyse von Ereignissen geeignet, die keine Verhaltensreaktion aufweisen. Durch eine Kombination von blickabhängigen Objekten mit verhaltensbasierten Maßen und Diagnosen kognitiver Zustände kann eine genauere Analyse der Informationsverarbeitung erreicht werden: Wurde eine Aufgabe wahrgenommen? Falls nicht, wo war die Aufmerksamkeit stattdessen? Wurde die Aufgabe zwar wahrgenommen aber aufgrund hoher Beanspruchung nicht oder verspätet bearbeitet? Die Interpretation dieser Informationen erzeugt reichhaltigen Kontext, der eine weitere Verbesserung der adaptiven Funktionalitäten ermöglicht.

7.4.3 Implicit Human-Computer Interaction

Implicit Human-Computer-Interaction (IHCI) bezeichnet nach Schmidt (2000) eine vom Nutzer durchgeführte Aktion, die nicht primär die Interaktion mit einem Computersystem zum Ziel hat, einem solchen System aber als Input dient. Dafür muss das System jedoch in der Lage sein, Kontext zu erkennen und korrekt zu interpretieren. Der in dieser Arbeit verfolgte Ansatz nutzt Leistungseinbrüche und kognitive Nutzerzustände als Grundlage für die Feststellung von Adaptierungsbedarf und berücksichtigt Aufgabenkontext und –ziele für die Auswahl adäquater Adaptierungen. Diese Informationen werden während der Aufgabenbearbeitung automatisiert erfasst und interpretiert (*implicit Input*). Auch die Auslösung der Adaptierungen erfolgt kontextabhängig ohne explizite Eingaben oder Anforderung durch den Nutzer und stellt daher einen *implicit Output* dar. Damit stellt das Dynamische Adaptierungsmanagement eine Form der impliziten Human-Computer-Interaction (iHCI) dar. Die vier von Schmidt (2005) formulierten Anforderungen an iHCI erfüllt das Dynamische Adaptierungsmanagement wie Tabelle 26 dargestellt.

Tabelle 26. Erfüllung der Voraussetzungen für implizite HCI nach Schmidt (2005)

Voraussetzung	Umsetzung in der vorliegenden Arbeit
1. <i>Perception as precondition.</i> To create applications that offer iHCI capabilities it is inevitable to provide the system with perception for context.	Das Dynamische Adaptierungsmanagement erfasst sowohl physiologische Maße des Menschen als auch den Aufgabenkontext und erhält so ein Verständnis der Situation und des Nutzerzustands. Die Berücksichtigung von Kontext der äußeren Umwelt (z. B. Lichtverhältnisse, Umgebungsgeräusche) ist konzeptionell vorgesehen.
2. <i>Finding and analyzing situations relevant for the application.</i> When applications are based on implicit interaction it becomes a central problem to find the situations that should have an effect on the behaviour of the system.	Das Dynamische Adaptierungsmanagement ermittelt Adaptierungsbedarf durch die Analyse von Leistung und Nutzerzuständen. Ein Leistungseinbruch wird als Versagen der menschlichen Selbstregulierung gewertet. Steht dieser in Zusammenhang mit einem kritischen Nutzerzustand, wird geprüft, ob eine angemessene Änderung des Systemverhaltens möglich ist, um den Nutzer zu unterstützen.
3. <i>Abstracting from situations to context.</i> Describing a situation is already an abstraction. To describe what should have an influence on applications, classes of situations have to be selected which will influence the behaviour of an application.	Das Dynamische Adaptierungsmanagement kombiniert die vorliegende Situation (Leistungseinbruch) mit Kontext über den Nutzer (kognitiver Zustand, Verhalten) und die Aufgabe (Anzahl, Dringlichkeit und Priorität vorliegender Aufgaben), um ein geeignetes Adaptierungsziel auszuwählen. Je nach Aufgabenkontext und Nutzerzustand wird ein anderes Ziel gewählt, das mit der Adaptierung erreicht werden soll.
4. <i>Linking context to behaviour.</i> To describe an iHCI application, classes of situations and in a more abstracted way contexts must be linked to actions carried out by the system.	Im Dynamischen Adaptierungsmanagement werden Kontext und Adaptierungen durch Regeln miteinander verknüpft. Eine Rule Engine überprüft sekundlich zahlreiche Kontextparameter, um das Systemverhalten dynamisch an Leistung, Nutzerzustand und Aufgabenstatus anzupassen.

7.4.4 Intervention User Interfaces

Dem Konzept von Intervention User Interfaces (IUI; Schmidt & Herrmann, 2017) liegt der Gedanke zugrunde, dass es eine Vielzahl automatisierter und autonomer Systeme gibt, bei denen die meisten Entscheidungen automatisch getroffen werden können, der Benutzer aber intervenieren kann, wenn es erforderlich ist. Eine Intervention in diesem Sinne ist ein Eingriff des Benutzers in das technische System, der eine erforderliche Abweichung vom automatisierten Verhalten einleitet. Dafür ist es laut Schmidt & Herrmann nötig, dass IUI dem Benutzer eine

unaufdringliche Wahrnehmung der automatisierten Prozesse ermöglichen, Eingriffsmöglichkeiten vorschlagen und dem Nutzer Änderungen ermöglichen. Einen Bedarf für Interventionen sehen die Autoren typischerweise bei Situationen, die für das automatisierte System nicht vorhersehbar sind. Sie gehen sogar so weit zu sagen, dass die Möglichkeit zur Intervention Designern und Entwicklern erlaubt, weniger Sonderfälle bei der Systemgestaltung zu berücksichtigen, da solche technischen Einschränkungen durch Nutzereingriff kompensiert werden können (Schmidt & Herrmann, 2017, S. 43).

Für sicherheitskritische Umgebungen, wie sie in dieser Arbeit betrachtet werden, wirft der IUI-Ansatz Probleme bezüglich hinlänglich bekannter Erkenntnisse der Automationsforschung auf, wie sie in Abschnitt 2.3 ausführlich dargestellt wurden. Insbesondere bleibt unklar, wie Fähigkeiten und Situationsbewusstsein der Nutzer ohne ständige Einbindung in die Aufgabe ausreichend erhalten bleiben sollen, um die Notwendigkeit eines Eingriffs rechtzeitig erkennen und verlässlich eingreifen zu können, sobald es nötig wird. Die vorliegende Arbeit verfolgt daher einen gegenläufigen Ansatz: Die Aufgabendurchführung soll soweit möglich beim Nutzer verbleiben und das technische System interveniert nur bei Bedarf.

Aus akademischer Sicht besteht unbestritten eine Daseinsberechtigung für beide Ansätze. Insbesondere für unkritische, wenig komplexe oder zeitlich flexible Aufgaben können IUI geeignet sein. Abhängig vom Einsatzzweck muss der passende Ansatz unter Berücksichtigung technischer aber auch menschlicher (insb. kognitiver) Limitierungen ausgewählt werden. In komplexen, sicherheitskritischen Umgebungen dürften IUI noch Schwierigkeiten bereiten, insbesondere wenn der Mensch hohe Expertise und ein umfangreiches Situationsbewusstsein benötigt, um adäquat intervenieren zu können. Anknüpfungspunkte zur vorliegenden Arbeit bestehen aber insoweit, dass es denkbar wäre, den vordefinierten Mechanismen zur Adaptierung durch Nutzerinterventionen zu widersprechen oder deren Konfiguration (temporär oder dauerhaft) anzupassen.

7.4.5 Intelligent User Interfaces

Intelligent User Interfaces werden von Hartmann (2010) wie folgt beschrieben:

“Intelligent User Interfaces [...] facilitate the interaction between user and application. In order to support the user in an optimal way, the Intelligent User Interface has to be aware of the user’s needs and adapt the provided support to her current situation, i.e. her current context” (S. iii)

Diese Eigenschaften erfüllt das hier entwickelte System. Das Dynamische Adaptierungsmanagement ermöglicht dem technischen System, auf Leistungseinbrüche und Diagnosen kritischer Nutzerzustände mit kontextadäquater Unterstützung zu reagieren. Vor allem durch die Berücksichtigung von Nutzerbedürfnissen und Kontext mag das entworfene System seinen Nutzern wie ein *Intelligent User Interface* erscheinen. Trotzdem kann es in der aktuellen Form aufgrund der regelbasierten Umsetzung nicht als solches eingeordnet werden, da dies gemäß Hartmann (2010) die Verwendung von Methoden künstlicher Intelligenz (KI; engl.: *artificial intelligence*, AI) voraussetzt.

Methoden maschinellen Lernens (ML) könnten zukünftig zur dynamischen Korrektur oder Erweiterung des adaptiven Verhaltens zum Einsatz kommen. ML nutzt lernende Algorithmen, um aus vielen Datenpunkten ein komplexes Modell zu entwickeln, das genutzt werden kann, um Eingangsdaten zu klassifizieren, Vorhersagen zu treffen oder Empfehlungen zu generieren, die Technik für Menschen intelligent erscheinen lässt. Auch wenn es Verfechter der Ansicht

gibt, dass ML nicht „intelligent“ sei, weil es vorrangig auf statistischen Methoden beruht, wird es oft als Tochterdisziplin (Langley, 2011) oder Teilgebiet (Kavlakoglu, 2020; Malone et al., 2020) der KI verstanden. ML-Algorithmen werden bereits seit längerer Zeit für die Klassifikation kognitiver Zustände verwendet (z. B. Takahashi et al., 1994; Wilson & Russell, 2003b), könnten sich jedoch auch im Rahmen des Adaptierungsmanagements als nützlich erweisen, damit das technische System den Operateur und seine individuellen Eigenarten kennenlernt und „intelligenter“ adaptiert. Aspekte, die vom ML profitieren könnten, sind beispielsweise:

- die Bewertung des Erfolgs bestimmter Adaptierungsstrategien,
- die Auswahl der optimalen Adaptierung für eine gegebene Situation,
- das Erlernen und Aktualisieren von Benutzereigenschaften, –fähigkeiten und –präferenzen (z. B. hinsichtlich Vorgehensstrategien und Informationspräsentation) sowie
- die Erkennung und Berücksichtigung veränderlicher Bedingungen in Bezug auf Nutzer, Aufgabe oder Umwelt.

Allerdings benötigen ML-Algorithmen üblicherweise große, repräsentative Datenmengen, die das Verhältnis zwischen Ein- und Ausgangsparametern beschreiben. Diese Daten dienen als Trainingsdatensatz für den ML-Algorithmus und müssen entweder beim Aufbau des ML-Algorithmus bereits vorhanden sein (*supervised* und *unsupervised learning*), oder werden während der Nutzung des Systems sukzessive aufgebaut (*reinforcement learning*; RL), um die Güte des zugrundeliegenden Modells zu verbessern. Dabei ist die Qualität der Eingangsdaten von Bedeutung, denn hohe Varianz in den Daten erhöht die Fehlerrate im Output.

Nachteilig ist dabei, dass gelernte Strukturen (z. B. neuronale Netze) anhand neuer Trainingsdaten oft neu aufgebaut oder angepasst werden müssen, wenn wesentliche Veränderungen auftreten oder Ein- und Ausgangsparameter sich verändern. Bei RL ist eine bekannte Limitierung die fehlerbehaftete Trial-and-Error-Phase, in der schlechte Entscheidungen genutzt werden, um ein gutes Ergebnis zu erlernen, was in sicherheitskritischen Umgebungen nicht tolerabel ist. Die Anpassung der Algorithmen an Änderungen oder Erweiterungen des Systems ist somit potenziell unsicher und weniger flexibel als die Anpassung menschenlesbarer und für Experten nachvollziehbarer Regelsätze. Zudem geht durch das selbstständige Lernen Expertenwissen verloren, da dieses Wissen in selbstlernenden Algorithmen mit aktuellen Methoden nur schwer menschenlesbar repräsentiert werden kann. Dadurch ist es schwierig, die Ergebnisse nachzuvollziehen oder zu interpretieren, was oft zu Schwierigkeiten bei der Zulassung solcher Systeme in sicherheitskritischen Bereichen führt. Mittlerweile gibt es Bemühungen, selbstlernende Systeme für den Menschen nachvollziehbar (z. B. *Explainable AI*; Gunning & Aha, 2019) und somit zertifizierbar (z. B. Bhattacharyya et al., 2015) zu machen, um diese auch in der Luftfahrt oder in militärischen Systemen einsetzen zu können. Diese waren jedoch zum Zeitpunkt der konzeptionellen Arbeiten für das Adaptierungsmanagement nur sehr eingeschränkt verfügbar (Hoffmann et al., 2018; Schweiger et al., 2021).

7.4.6 Computational Interaction

Für den vorliegenden Ansatz naheliegender wäre möglicherweise eine Kombination aus regelbasiertem Verhalten und einer modellbasierten Optimierung dieser Regeln über die Zeit. Dabei bliebe das Expertenwissen in den Regeln erhalten, deren Ausprägung passt sich jedoch über die Zeit an den Nutzer an, indem aus Interaktions- und Leistungsdaten Modelle gebildet und über die Zeit verbessert werden. Beispielsweise nutzen Todi et al. (2021) modellbasiertes RL,

um Adaptierungen von Menüstrukturen zu planen und deren Nutzen vorherzusagen. Modellbasiertes RL verwendet ein Vorhersagemodell, um alternative Optionen zu simulieren, ohne sie vorher auszuprobieren. Dies kann bei adaptiven Ansätzen nützlich sein, wenn es die Effizienz von RL beim Finden guter Lösungen verbessert. Allerdings liegt laut Todi et al. eine wesentliche Herausforderung darin, ein hinreichend gutes Modell zu erzeugen.

Der kombinierte Einsatz von Algorithmen und mathematischen Modellen zur Erklärung und Verbesserung der Interaktion wird von Bi et al. (2018) als Computational Interaction bezeichnet:

“Computational Interaction applies computational thinking – that is, abstraction, automation, and analysis – to explain and enhance the interaction between a user (or users) and a system. It is underpinned by modelling which admits formal reasoning [...]” (S. 4)

Ein solches Vorgehen ermöglicht die Optimierung der Auswahlregeln für die Adaptierung durch eine sukzessive Individualisierung der Regelparameter. Zum Beispiel könnte ein unerfahrener Nutzer bereits bei geringerer Beanspruchung von einer Adaptierung profitieren, während ein erfahrener Nutzer durch die Adaptierung möglicherweise gestört würde. Mit dem Computational Interaction-Ansatz könnte das Dynamische Adaptierungsmanagement über die Zeit erkennen, dass die Adaptierung dem erfahrenen Nutzer nur unter bestimmten Umständen hilft und den Auslösemechanismus an diese Beobachtung anpassen. Die Erkennung der Nutzerintention ist ein weiterer Aspekt, der mit Methoden der Computational Interaction realisiert werden kann (Kristensson et al., 2019). Eine Intentionserkennung könnte dem adaptiven System erlauben, Lösungsstrategien des Nutzers zu analysieren, sein Verhalten zu präzisieren und die Adaptierung daran anzupassen.

8 Ausblick

Die Kombination aus multidimensionaler Nutzerstatusdiagnose (Schwarz, 2019) und Dynamischem Adaptierungsmanagement bietet Potenzial, das weit über die in dieser Arbeit beschriebene Anwendung hinausgeht. Beide Komponenten wurden als generische Konzepte entwickelt, die sich auf verschiedene Anwendungsbereiche anwenden lassen, von denen einige beispielhaft in Abschnitt 8.1 dargestellt werden. Abschnitt 8.2 beschreibt mögliche Anschlussarbeiten und Erweiterungen des Konzepts.

8.1 Anwendungsfelder

Anwendungsfelder, in denen adaptive Mensch-Technik-Interaktion die aktuellen Fähigkeiten sinnvoll ergänzen kann, finden sich bei allen hochautomatisierten Aufgaben, in denen der Mensch in der Verantwortung über das Handeln bleibt, Leistungseinbrüche und kritische Nutzerzustände aber ein Sicherheitsrisiko darstellen und schwerwiegende Folgen haben können. Auf Basis der Diagnose kritischer Nutzerzustände können technikseitig bedarfsgerechte Maßnahmen dynamisch ausgelöst werden, um das Mensch-Maschine-Gesamtsystem zu stabilisieren, z. B. durch gezielte Umlenkung der Aufmerksamkeit, Veränderungen in der Informationspräsentation oder Auswahl eines optimalen Automationsgrads. Diese kontextsensitive Anpassung der Interaktion bietet ergonomische Vorteile durch die dynamische Berücksichtigung kritischer Nutzerzustände. Aktuell wird das vorliegende Konzept zur adaptiven MMI im Unterauftrag eines Rüstungsunternehmens in einen Demonstrator für zukünftige bodengestützte Luftabwehr integriert.

Weitere Anwendungsfelder für adaptive MMI finden sich auch in Training und Ausbildung. Hier liegt konkretes Interesse aus dem Bereich der zivilen Flugsicherung vor. Mit dynamischen Adaptierungsmechanismen könnten Trainingspläne im laufenden Training flexibel individualisiert werden. Basierend auf Kontextinformationen über die Aufgabe, den Status des Auszubildenden und die Leistung könnten Fähigkeitslücken gezielter adressiert und knappe Ressourcen (Ausbilder, Simulatoren) effizienter genutzt werden. Dabei ermöglicht der Einsatz einer multidimensionalen Zustandsdiagnose die Detektion kognitiver oder emotionaler Zustände, die den Trainingserfolg gefährden könnten. So könnten beispielsweise Über- oder Unterforderung, Frustration oder Ablenkung erkannt werden. Das adaptive Trainingssystem würde dann die Wiederherstellung eines optimalen Lernzustands durch Adaptierung des Trainings unterstützen. Physiologische Maße ermöglichen zudem eine Objektivierung bei der Messung des Ausbildungsfortschritts sowie die dynamische Anpassung von Schwierigkeitsgrad oder Ausbildungsinhalten. Beispielsweise kann auf Basis von Blickbewegungsmessung objektiv bewertet werden, ob ein Ereignis wahrgenommen wurde und ob die Aufmerksamkeit adäquat gerichtet war. Sollen Stressresistenz oder Bewältigungsstrategien vermittelt werden, kann objektiv der Zeitpunkt erfasst werden, an dem das gewünschte Stressniveau erreicht ist.

Die Ziele der Adaptierung unterscheiden sich im Trainingskontext jedoch erheblich vom Einsatz adaptiver MMI in sicherheitskritischen Umgebungen. Im Gegensatz zum operationellen Anwendungskontext muss beispielsweise hohe Leistung im Training nicht notwendigerweise ein erwünschter Zustand sein. Sie kann gar auf einen Anpassungsbedarf hinweisen, da sie die Möglichkeit bietet, das Training zu beschleunigen. Anstatt die Leistung zu optimieren und potenzielle Gefahren zu vermeiden, zielt adaptives Training nämlich darauf ab, die Effektivität

und Effizienz des Trainings zu optimieren. Ein adaptives Trainingssystem könnte auch kritische kognitive Zustände, die in operationellen Umgebungen vermieden werden sollten, absichtlich induzieren, um die Entwicklung von Selbstregulierungs- oder Bewältigungsstrategien zu ermöglichen.

8.2 Mögliche Anschlussarbeiten und Erweiterungen

Spätestens wenn adaptive Interaktionsparadigmen den Laboren entwachsen, muss die wahre Komplexität dieser hochintegrierten Mensch-Maschine-Systeme Berücksichtigung finden. Das in dieser Arbeit entwickelte Rahmenwerk bietet einen fundierten konzeptionellen Rahmen für ein Dynamisches Adaptierungsmanagement, es stellt jedoch lediglich einen Anfang dar, denn aus Design Science hervorgehende Artefakte sind meist zunächst „Innovationen, welche die Ideen, Praktiken, technischen Fähigkeiten und Produkte definieren, durch welche die Analyse, Design, Implementierung und Nutzung von Informationssystemen effektiv und effizient erreicht werden kann“ (Hevner et al., 2004, S. 83).

Die hier erarbeitete Umsetzung der adaptiven Funktionalitäten ist zudem als beispielhaft zu betrachten, denn das emergente Verhalten eines adaptiven Mensch-Maschine-Systems ist ebenso wie menschliches Verhalten nie vollständig deterministisch. Schon deshalb ist es nicht möglich, alle möglichen Systemzustände zu antizipieren und bei der Gestaltung zu berücksichtigen. Die Gestaltung der Adaptivität muss sich daher – auch bei späteren adaptiven Informationssystemen – auf wesentliche und bekannte Einzelaspekte beschränken. Aufgrund der hohen Dynamik im Verhalten menschlicher Operateure, ihrer Erfahrung, ihrer Strategien und der komplexen Aufgabenumgebungen verbleibt dabei noch eine Vielzahl von Herausforderungen im Zusammenhang mit dem Adaptierungsmanagement. Einige davon werden im Folgenden aufgeführt und können durch Anschlussarbeiten aufgegriffen werden.

Umfangreichere Konfiguration der Adaptierungen

Das Dynamische Adaptierungsmanagement wurde bisher nur beispielhaft implementiert. Insbesondere wurde die Möglichkeit verschiedener Konfigurationen der Adaptierungen zwar konzeptionell erarbeitet und teilweise auch schon prototypisch implementiert, jedoch noch nicht demonstriert und untersucht, um den nötigen Umfang der Versuchsbedingungen im Rahmen zu halten. Beispielsweise könnte die Intrusivität von Adaptierungen (z. B. die Lautstärke eines Alarms oder die Stärke eines Hinweispeils) durch die Priorität der Aufgabe gesteuert werden. Die Funktionalität könnte auch dahingehend erweitert werden, dass weitere Facetten der Diagnose bei der Konfiguration der Adaptierungsstrategie berücksichtigt werden. So sind Adaptierungsstrategien denkbar, die verschiedene Grade kontextsensitiver Hilfestellungen unter Berücksichtigung der Erfahrung des Nutzers anbieten, so dass Novizen detailliertere Informationen erhalten als Experten.

Ergänzung von Adaptierungsstrategien

Die multifaktorielle Nutzerzustandsdiagnose von Schwarz (2019) wurde für Beanspruchung, Aufmerksamkeit und Müdigkeit validiert, konzeptionell jedoch für sechs Zustandsdimensionen entwickelt. Die Adressierung kritischer Zustände in den übrigen drei Dimensionen – Situationsbewusstsein, Motivation und emotionaler Zustand – stellt nicht nur interessante diagnostische Herausforderungen dar, sondern würde auch die Entwicklung neuer Adaptierungsstrategien erfordern.

Aber auch die bestehenden Zustandsdiagnosen würden von weiteren Adaptierungsstrategien profitieren, um die interne Variabilität des technischen Systems weiter zu erhöhen und Leistungseinbrüche sowie kritische Zustandsausprägungen noch problemadäquater als im aktuellen Demonstrator adressieren zu können. Obwohl zunächst nur eine Adaptierungsstrategie pro Adaptierungsziel implementiert wurde, sieht das Konzept schon jetzt mehrere Adaptierungen pro Adaptierungsziel vor, aus denen auf Basis von Diagnoseparametern die am besten passende Strategie ausgewählt werden kann.

Bei steigender Anzahl möglicher Adaptierungen sollte jedoch besonderes Augenmerk auf die Kompatibilität und das Zusammenspiel der verschiedenen Adaptierungen gelegt werden. Insbesondere sollte vermieden werden, dass die simultane oder wechselnde Anwendung verschiedener Adaptierungen beim Nutzer zu Verwirrung oder zu einer überproportionalen Verstärkung der kognitiven Kosten führt.

Algorithmische Kosten-Nutzen-Abwägung

Wann und wie Adaptivität implementiert wird, sollte darauf beruhen, ob die Vorteile der Adaptierung die möglichen Kosten überwiegen (Lavie & Meyer, 2010). In der aktuellen Implementierung des Dynamischen Adaptierungsmanagements erfolgt eine Kosten-Nutzen-Abwägung der Adaptierung vor allem in Hinblick auf Aufgabenpriorität und -dringlichkeit. Bei wichtigen oder zeitkritischen Aufgaben werden intrusive Adaptierungsstrategien als angemessen erachtet und regelbasiert ausgewählt. So entscheidet sich aktuell an der Priorität der Aufgabe, ob intrusives „Visuelles Cueing“ oder das subtilere „Decluttering“ zur Aufmerksamkeitslenkung zum Einsatz kommt. Eine Modellierung der kognitiven Kosten der Adaptierung ließe eine detaillierte quantitative Kosten-Nutzen-Analyse zu. Einen algorithmischen Ansatz bietet möglicherweise die Konfliktauflösung der kognitiven Architektur ACT-R (Anderson et al., 2004). Ähnlich wie das Adaptierungsmanagement eine geeignete Adaptierungsstrategie auswählen muss, bestimmt ACT-R, welche von mehreren möglichen Produktionsregeln den größten Nutzen bietet. Auf unsere Zwecke übertragen würde sich der Nutzen jeder Adaptierungsstrategie als

$$U = P * V - C$$

berechnen, wobei U den erwarteten Nutzen (engl.: *utility*) der Adaptierung darstellt, P die Wahrscheinlichkeit (engl.: *probability*) der Zielerreichung mit dieser Strategie (in der Vergangenheit), V den Wert (engl.: *value*) des Adaptierungsziels und C die Kosten (engl.: *cost*) der Zielerreichung. Abhängig von den Kosten der Zielerreichung und dem Wert des Ziels kann der Nutzen einer Adaptierung demnach positiv oder negativ sein. Eine derartige Modellierung könnte bessere und flexiblere Einzelfallentscheidungen über Auslösung, Beibehaltung oder Deaktivierung von Adaptierungen ermöglichen.

Erweiterung auf Teamumgebungen

Eine Erweiterung des erarbeiteten Konzepts auf Teamumgebungen ist ebenfalls denkbar, birgt jedoch gänzliche neue konzeptionelle Herausforderungen. Ein erster möglicher Schritt wäre daher eine Einzelbetrachtung verschiedener Teammitglieder und ihrer Aufgaben, da sich bestimmte Aspekte der Teaminteraktion auch in Ereignissen auf individueller Ebene widerspiegeln können (Smith-Jentsch et al., 1998). Hier könnten zunächst solche Teamaufgaben adaptiv unterstützt werden, die auf individueller Ebene abgebildet werden können, wie beispielsweise Hinweise auf Kommunikationsbedarf, das Scheduling von Kommunikation oder die Synchronisierung der Team Situation Awareness.

Individualisierung der Adaptierung und Lernendes Adaptierungsmanagement

Nutzer können sich situationsabhängig für unterschiedliche Wege der Aufgabenbearbeitung entscheiden und diese auch von ihrem aktuellen Zustand abhängig machen (Mulder et al., 2008). Beispielsweise tendieren Menschen bei Müdigkeit eher zur Nutzung einfacher und leicht zu merkender Strategien. Auch Parasuraman et al. (1992) weisen darauf hin, dass jeder Operateur unterschiedliche Strategien bei der Aufgabenbewältigung verfolgt und es daher notwendig ist, Algorithmen für die Adaptierung zu entwickeln, die auf den individuellen Nutzer zugeschnitten sind. Hancock (2003) geht einen Schritt weiter und fordert einen Paradigmenwechsel vom *human-centered Design* zu einem *person-specific Design*. Demnach sollten technische Systeme idealerweise an die individuellen Eigenschaften, Ziele, Stimmung, Gewohnheiten, Beanspruchung und Vorlieben des jeweiligen Nutzers anpassbar sein (Hancock et al., 2005), wie es bei *Personal Devices* wie Smartphones oder –watches bereits üblich ist.

Das Dynamische Adaptierungsmanagement berücksichtigt zwar die individuelle Leistung und kognitive Zustände, folgt aber aktuell bei der Auswahl der Adaptierung noch stets den gleichen Regeln. Hier wäre in einem ersten Schritt denkbar, dass ein Operateur bestimmte Strategien deaktivieren kann. Das Adaptierungsmanagement würde dann nach Möglichkeit auf alternative Strategien zurückgreifen, mit denen das gleiche Ziel erreicht werden kann. Dadurch könnte es möglich sein, die Akzeptanz adaptiver Systeme auch bei denjenigen zu erhöhen, die bestimmte Adaptierungsstrategien als störend empfunden haben.

In einer weiteren Ausbaustufe könnten individuelle Unterschiede oder Präferenzen durch eine automatische Anpassung der Diagnoseparameter oder der Regeln für kritische Zustände auf Basis der beobachteten Realität berücksichtigt werden: Ein lernendes Adaptierungsmanagement wäre in der Lage, Abweichungen von seinen modellbasierten Erwartungen zu detektieren und die Erwartungen zu korrigieren. Der Adaptierungsmechanismus würde so befähigt, sich selbst zu adaptieren und sich den individuellen Charakteristiken von Nutzern und Nutzungskontext anzupassen. Dies würde die Robustheit im Umgang mit zwangsläufig unvollständigem Wissen über Nutzer und Umwelt sowie mit Widersprüchen und unerwarteten Zuständen erhöhen.

9 Literatur

9.1 Verzeichnis der verwendeten Literatur

- Adamczyk, P.D. & Bailey, B.P. (2004). If Not Now When?: The Effects of Interruptions at Various Moments Within Task Execution. In *CHI '04: Proceedings of the SIGCHI Conference on Human Factors in Computing Systems* (S. 271–278). ACM Press. <https://doi.org/10.1145/985692.985727>
- Adamczyk P. D., Iqbal S. T. & Bailey B. P. (2005). A method, system, and tools for intelligent interruption management. In *TAMODIA'05: Proceedings of the 4th International Workshop on Task Models and Diagrams* (S. 123–126). ACM Press. <https://doi.org/10.1145/1122935.1122959>
- Akerstedt, T., Mollard, R., Samel, A., Simons, M. & Spencer, M. (2003). *The role of EU FTL legislation in reducing cumulative fatigue in civil aviation*. Beitrag zum ETSC "Meeting to discuss the role of EU FTL legislation in reducing cumulative fatigue in civil aviation" am 19. Februar 2003. <https://www.eurocockpit.be/sites/default/files/Akerstedt-Mollard-Samel-Simons-Spencer-2003.pdf>
- Anderson, J. R., Bothell, D., Byrne, M. D., Douglass, S., Lebiere, C. & Qin, Y. (2004). An Integrated Theory of the Mind. *Psychological Review*, 111(4), 1036–1060. <https://doi.org/10.1037/0033-295X.111.4.1036>
- Arciszewski, H. F. R., de Greef, T. E. & van Delft, J. H. (2009). Adaptive Automation in a Naval Combat Management System. *IEEE Transactions on Systems, Man, and Cybernetics - Part A: Systems and Humans*, 39(6), 1188–1199. <https://doi.org/10.1109/TSMCA.2009.2026428>
- Atkinson, R. C. & Shiffrin, R. M. (1968). Human memory: A proposed system and its control processes. *The psychology of learning and motivation*, 2, 89–195. [https://doi.org/10.1016/S0079-7421\(08\)60422-3](https://doi.org/10.1016/S0079-7421(08)60422-3)
- Atkinson, R. C. & Shiffrin, R. M. (1971). The Control of Short Term Memory. *Scientific American*, 225(2), 82–90. <https://doi.org/10.1038/scientificamerican0871-82>
- Axelsson, P., Hale, K. S. & Fuchs, S. (2007). Optimizing information displays using multimodal design science. *Proceedings of the IEEE 8th Human Factors and Power Plants and HPRCT 13th Annual Meeting* (S. 201–204). IEEE. <https://doi.org/10.1109/HFPP.2007.4413206>
- Baddeley, A. (2003). Working memory: Looking back and looking forward. *Nature Reviews: Neuroscience*, 4, 829–839. <https://doi.org/10.1038/nrn1201>
- Baddeley, A. (1992). Working memory. *Science*, 255(5044), 556–559. <https://doi.org/10.1126/science.1736359>
- Baddeley, A. D. & Hitch, G. (1974). Working Memory. *Psychology of Learning and Motivation*, 8, 47–89. [https://doi.org/10.1016/S0079-7421\(08\)60452-1](https://doi.org/10.1016/S0079-7421(08)60452-1)
- Baddeley, A. D. & Logie, R. H. (1999). Working Memory: The Multiple-Component Model. In A. Miyake & P. Shah (Hrsg.), *Models of Working Memory: Mechanisms of active maintenance and executive control* (S. 28–61). Cambridge University Press. <https://doi.org/10.1017/CBO9781139174909.005>
- Bainbridge, L. (1983). Ironies of Automation. *Automatica*, 19(6), 775–779. [https://doi.org/10.1016/0005-1098\(83\)90046-8](https://doi.org/10.1016/0005-1098(83)90046-8)
- Barker, R. A., Edwards, R. E., O'Neill, K. R. & Tollar, J. R. (2004). *DARPA Improving Warfighter Information Intake Under Stress - Augmented Cognition – Concept Validation Experiment (CVE) Analysis Report for the Boeing Team* (Technischer Bericht zu Vertrag NBCH030031). DARPA/IPTO.
- Barker, R. A. & Edwards, R. E. (2005). The Boeing team fundamentals of augmented cognition. In D.D. Schmorow (Hrsg.), *Foundations of Augmented Cognition*, vol. 11 (S. 469–476). CRC Press. <https://doi.org/10.1201/9781482289701>
- BEA (2012). *Final Report on the accident on 1st June 2009 to the Airbus A330-203 registered F-GZCP operated by Air France flight AF447 Rio de Janeiro – Paris*. Bureau d'Enquêtes et d'Analyses pour la sécurité de l'aviation civile. <http://www.bea.aero/docspa/2009/f-cp090601.en/pdf/f-cp090601.en.pdf>
- Beierle, C. & Kern-Isberner, G. (2014). *Methoden wissensbasierter Systeme*. Springer Vieweg.

- Bi, X., Howes, A., Kristensson, P.O., Oulasvirta, A. & Williamson, J. (2018). Introduction. In A. Oulasvirta, P.O. Kristensson, X. Bi & A. Howes (Hrsg.), *Computational Interaction* (S. 1–13). Oxford University Press.
- Bertalanffy, L. von (1969). *General System Theory – Foundations, Development, Applications*. Braziller.
- Bhattacharyya, S., Cofer, D., Musliner, D. J., Mueller, J. & Engstrom, E. (2015). *Certification Considerations for Adaptive Systems* (Technischer Bericht NASA/CR–2015-218702). NASA Langley Research Center.
- Billings, C.E., Lauber, J.K., Funkhouser, H., Lyman, G. & Huff, E.M. (1976). *NASA Aviation safety reporting system, Quarterly report number 76-1* (Technischer Bericht TM-X-3445). NASA Ames Research Center. <https://ntrs.nasa.gov/api/citations/19760026757/downloads/19760026757.pdf>
- Bradley, M. M. & Lang, P. J. (1994). Measuring emotion: The self-assessment manikin and the semantic differential. *Journal of Behavior Therapy and Experimental Psychiatry*, 25(1), 49–59. [https://doi.org/10.1016/0005-7916\(94\)90063-9](https://doi.org/10.1016/0005-7916(94)90063-9)
- Bratzke, D., Rolke, B. & Ulrich, R. (2009). The source of execution-related dual-task interference: Motor bottleneck or response monitoring? *Journal of Experimental Psychology: Human Perception and Performance*, 35(5), 1413–1426. <https://doi.org/10.1037/a0015874>
- Breton R., Bossé, É. (2003). The Cognitive Costs and Benefits of Automation. In: The Role of Humans in Intelligent and Automated Systems. Proceedings of the RTO Human Factors and Medicine Panel (HFM) Symposium (RTO-MP-088). NATO RTO. <https://apps.dtic.mil/sti/pdfs/ADA422303.pdf>
- Bruder, A. & Schwarz, J. (2019). Evaluation of Diagnostic Rules for Real-Time Assessment of Mental Workload Within a Dynamic Adaptation Framework. In R. Sottilare & J. Schwarz (Hrsg.), *Adaptive Instructional Systems. LNCS, vol. 11597* (S. 391–404). Springer. https://doi.org/10.1007/978-3-030-22341-0_31
- Budde, R., Kautz, K., Kuhlentkamp, K. & Züllighoven, H. (1990). What is prototyping? *Information Technology & People*, 6, 89–95. <https://doi.org/10.1108/EUM0000000003546>
- Bulling, A. & Zander, T. O. (2014). Cognition-Aware Computing. *IEEE Pervasive Computing*, 13(3), 80–83. <https://doi.org/10.1109/MPRV.2014.42>
- Byrne, E. A. & Parasuraman, R. (1996). Psychophysiology and adaptive automation. *Biological*
- Card, S.K., Moran, T.P. & Newell, A. (1983). *The Psychology of Human-Computer Interaction* (1. Aufl.). CRC Press. <https://doi.org/10.1201/9780203736166>
- Casner, S. M., Hutchins, E. L., & Norman, D. (2016). The Challenges of Partially Automated Driving. *Communications of the ACM*, 59(5), 70–77. <https://doi.org/10.1145/2830565>
- Chen, D., Hart, J., Vertegaal, R. (2007). Towards a Physiological Model of User Interruptability. In: Baranauskas, C., Palanque, P., Abascal, J. & Barbosa, S.D.J. (Hrsg.), *Human-Computer Interaction – INTERACT 2007. Lecture Notes in Computer Science, vol 4663*. Springer. https://doi.org/10.1007/978-3-540-74800-7_39
- Chiossi, F., Zagermann, J., Karolus, J., Rodrigues, N., Balestrucci, P., Weiskopf, D., Ehinger, B., Feuchtnner, T., Reiterer, H., Chuang, L., Ernst, M., Bulling, A., Mayer, S. & Schmidt, A. (2022). Adapting visualizations and interfaces to the user. *it - Information Technology*, 64(4-5), 133–143. <https://doi.org/10.1515/itit-2022-0035>
- Cohen, J. (1988). *Statistical power analysis for the behavioral sciences* (2. Aufl.). L. Erlbaum Associates. <https://doi.org/10.4324/9780203771587>
- Coury, B. G. & Semmel, R. D. (1996). Supervisory control and the design of intelligent user interfaces. In R. Parasuraman & M. Mouloua, (Hrsg.), *Automation and Human Performance: Theory and Applications* (S. 201–219). Lawrence Erlbaum Associates. <https://doi.org/10.1201/9781315137957>
- Cowan, N. (2001). *The magical number 4 in short-term memory: A reconsideration of mental storage capacity*. *Behavioral and Brain Sciences*, 24(1), 87–114. <https://doi.org/10.1017/S0140525X01003922>
- De Greef, T. & Arciszewski, H. (2009). Triggering adaptive automation in naval command and control. In S. Cong (Hrsg.), *Frontiers in adaptive control* (S. 165–188). I-Tech. <https://doi.org/10.5772/6429>

- DeGuzman, C.A., Kanaan, D., Donmez, B. (2022). Attentive User Interfaces: Adaptive Interfaces that Monitor and Manage Driver Attention. In A. Riener, M. Jeon & I. Alvarez (Hrsg.), *User Experience Design in the Era of Automated Driving. Studies in Computational Intelligence, vol. 980* (S. 305–334). Springer. https://doi.org/10.1007/978-3-030-77726-5_12
- Deutsche Gesellschaft für Psychologie (2019). *Richtlinien zur Manuskriptgestaltung* (5. Aufl.). Hogrefe.
- DIN EN ISO 9241-210. (2019). *Ergonomie der Mensch-System-Interaktion - Teil 210: Menschzentrierte Gestaltung interaktiver Systeme*. Beuth. <https://doi.org/10.31030/3104744>
- DIN EN 10 075-1 (2000). *Ergonomische Grundlagen bezüglich psychischer Arbeitsbelastung. Teil 1: Allgemeines und Begriffe*. Beuth. <https://dx.doi.org/10.31030/2654667>
- Dingler, T., Schmidt, A. & Machulla, T. (2017). Building Cognition-Aware Systems: A Mobile Toolkit for Extracting Time-of-Day Fluctuations of Cognitive Performance. *Proceedings of the ACM on Interactive, Mobile, Wearable and Ubiquitous Technologies*, 1(3), Artikel 47 (S. 1–15). <http://doi.org/10.1145/3132025>
- Dix, A. (2002). Beyond intention - pushing boundaries with incidental interaction. In *Proceedings of Building Bridges: Interdisciplinary Context-Sensitive Computing* (Vol. 9). The University of Glasgow.
- Dorneich, M., Whitlow, S., Ververs, P.M., Mathan, S., Raj, A., Muth, E., Hoover, A., DuRousseau, D., Parra, L. & Sajda, P. (2004). *DARPA Improving Warfighter Information Intake under Stress - Augmented Cognition – Concept Validation Experiment (CVE) Analysis Report for the Honeywell Team* (Technischer Bericht zu Vertrag DAAD16-03-C-0054). DARPA/IPTO.
- Dorneich, M. C., Whitlow, S. D., Mathan, S., Carciofini, J. & Ververs, P. M. (2005). The communications scheduler: A task scheduling mitigation for a closed loop adaptive system. In D. D. Schmorow (Hrsg.), *Foundations of Augmented Cognition, vol. 11* (S. 132–141). CRC Press. <https://doi.org/10.1201/9781482289701>
- Dorneich, M. C., Ververs, P. M., Mathan, S., Whitlow, S., & Hayes, C. C. (2012). Considering Etiquette in the Design of an Adaptive System. *Journal of Cognitive Engineering and Decision Making*, 6(2), 243–265. <https://doi.org/10.1177/1555343412441001>
- Endsley, M. R. (1995). Toward a Theory of Situation Awareness in Dynamic Systems. *Human Factors*, 37(1), 32–64. <https://doi.org/10.1518/001872095779049543>
- Endsley, M. (1996). Automation and situation awareness. In R Parasuraman & M. Mouloua (Hrsg.), *Human factors in transportation. Automation and human performance: Theory and applications* (S. 163–181). Lawrence Erlbaum Associates. <https://doi.org/10.1201/9781315137957>
- Endsley, M. R. R. (1999). Situation awareness and human error: Designing to support human performance [Paper presentation]. High Consequence Systems Surety Conference. Albuquerque, NM: Sandia National Laboratory.
- Endsley, M. R. R. & Kaber, D. B. (1999). Level of automation effects on performance, situation awareness and workload in a dynamic control task. *Ergonomics*, 42(3), 462–492. <https://doi.org/10.1080/001401399185595>
- Endsley, M. R. & Kiris, E. O. (1995). The out-of-the-loop performance problem and level of control in automation. *Human Factors*, 37(2), 381–394. <https://doi.org/10.1518/001872095779064555>
- Fairclough, S. H. (2009). Fundamentals of Physiological Computing. *Interacting with Computers*, 21(1-2), 133–145. <https://doi.org/10.1016/j.intcom.2008.10.011>
- Fairclough, S. H. (2017). Physiological computing and intelligent adaptation. In M. Jeon (Hrsg.), *Emotions and affect in human factors and human-computer interaction* (S. 539–556). Elsevier Academic Press. <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-801851-4.00020-3>
- Fairclough, S. H. (2017b, December 11). *The Log Roll of Intelligent Adaptation*. <http://physiologicalcomputing.org/2017/12/the-log-roll-of-intelligent-adaptation/>
- Feigh, K. M., Dorneich, M. C. & Hayes, C. C. (2012). Toward a Characterization of Adaptive Systems. *Human Factors*, 54(6), 1008–1024. <https://doi.org/10.1177/0018720812443983>
- Field, A. (2009). *Discovering statistics using SPSS* (3. Auflage). SAGE Publications Ltd.
- Flemisch, F., Abbink, D., Itoh, M., Pacaux-Lemoine, M. P. & Weßel, G. (2016). Shared control is the sharp end of cooperation: Towards a common framework of joint action, shared control and human machine cooperation. *IFAC-PapersOnLine*, 49(19), 72–77. <https://doi.org/10.1016/j.ifacol.2016.10.464>

- Fuchs, S., Hale, K. S., Stanney, K. M., Berka, C., Levendowski, D. & Juhnke, J. (2006). Physiological Sensors Cannot Effectively Drive System Mitigation Alone. In D. D. Schmorow, K. M. Stanney & L. M. Reeves (Hrsg.), *Foundations of Augmented Cognition (2. Aufl.)* (S. 193–200). Strategic Analysis, Inc.
- Fuchs, S., Hale, K. S., Stanney, K. M., Juhnke, J. & Schmorow, D. D. (2007). Enhancing Mitigation in Augmented Cognition. *Journal of Cognitive Engineering and Decision Making*, 1(3), 309–326. <https://doi.org/10.1518/155534307X255645>
- Fuchs, S., Hochgeschurz, S., Schmitz-Hübsch, A. & Thiele, L. (2020). Adapting Interaction to Address Critical User States of High Workload and Incorrect Attentional Focus – An Evaluation of Five Adaptation Strategies. In Schmorow D., Fidopiastis C. (Hrsg.), *Augmented Cognition. Human Cognition and Behavior. HCII 2020. Lecture Notes in Computer Science, vol 12197* (pp 335–352). Springer. https://doi.org/10.1007/978-3-030-50439-7_23
- Fuchs, S. & Schwarz, J. (2013). *Anforderungen an ein ergonomisch ganzheitliches Verständnis von Mensch-Maschine Interaktion* (Abschlussbericht zu Zuwendungsbescheid-Nr. E/T42X/CA080/5F162). Fraunhofer FKIE.
- Fuchs, S., Schwarz, J. (2014). Vom passiven Werkzeug zum sozialen Akteur: Ansatz einer ganzheitlichen Betrachtung adaptiver automatisierter Systeme. In M. Grandt & S. Schmerwitz (Hrsg.), 56. *Fachausschusssitzung Anthropotechnik der DGLR: Der Mensch zwischen Automatisierung, Kompetenz und Verantwortung* (S. 285–288). Deutsche Gesellschaft für Luft- und Raumfahrt.
- Fuchs, S. & Schwarz, J. (2015). *Adaptive Mensch-Maschine-Interaktion: Systemtheoretische Anforderungen, Datenerfassung und –auswertung* (Abschlussbericht zu Zuwendungsbescheid-Nr. E/E4BX/DA005/CF215). Fraunhofer FKIE.
- Fuchs, S. & Schwarz, J. (2017). Towards a Dynamic Selection and Configuration of Adaptation Strategies in Augmented Cognition. In D. D. Schmorow & C. M. Fidopiastis (Hrsg.), *Augmented Cognition. Enhancing Cognition and Behavior in Complex Human Environments. AC 2017. Lecture Notes in Computer Science, vol 10285* (S. 101–115). Springer. https://doi.org/10.1007/978-3-319-58625-0_7
- Fuchs, S., Schwarz, J. & Flemisch F. (2014). Two steps back for one step forward: Revisiting Augmented Cognition principles from a perspective of (social) system theory. In D.D. Schmorow & C.M. Fidopiastis (Hrsg.) *Foundations of Augmented Cognition. Advancing Human Performance and Decision-Making through Adaptive Systems. LNCS, vol. 8534* (S. 114–124), Springer. https://doi.org/10.1007/978-3-319-07527-3_11
- Fuchs, S., Schwarz, J. & Werger, A. (2016). *Adaptive Mensch-Maschine-Interaktion: Ganzheitliche Onlinediagnose und Systemadaptierung*. Abschlussbericht zur Studie E/E4BX/EA192/CF215 (Dezember 2016). Fraunhofer FKIE.
- Gammon, C. & Bornstein, M. (2018). John henry effect. In B. Frey (Hrsg.), *The SAGE encyclopedia of educational research, measurement, and evaluation* (S. 909–912). SAGE Publications, Inc., <https://dx.doi.org/10.4135/9781506326139.n364>
- Gopher, D., Armony, L. & Greenspan, Y. (2000). Switching tasks and attention policies. *Journal of Experimental Psychology: General*, 129(3), 308–339. <https://doi.org/10.1037/0096-3445.129.3.308>
- Gouraud, J., Delorme, A. & Berberian, B. (2017). Autopilot, mind wandering, and the out of the loop performance problem. *Frontiers in Neuroscience*, 11, 541. <https://doi.org/10.3389/fnins.2017.00541>
- Groenewold, A. & Bartonitz, M. (2011). Geschäftsregeln mit Business Rule Engines abbilden. *WissenHeute*, 64, 42–48.
- Gunning, D. & Aha, D. (2019). DARPA’s Explainable Artificial Intelligence (XAI) Program. *AI Magazine*, 40(2), 44–58. <https://doi.org/10.1609/aimag.v40i2.2850>
- Haarmann, A., Boucsein, W. & Schaefer, F. (2009). Combining electrodermal responses and cardiovascular measures for probing adaptive automation during simulated flight. *Applied Ergonomics*, 40(6), 1026–1040. <https://doi.org/10.1016/j.apergo.2009.04.011>
- Hale, K. S., Fuchs, S., Berka, C., Levendowski, D., Axelsson, P., Baskin, A. & Juhnke, J. (2006). *Information Delivery and Display for Shared Awareness in the Net-Centric Battlespace* (Abschlussbericht zu Vertrag W31P4Q-06-C-0041). Design Interactive, Inc.

- Hale, K. S., Reeves, L. M., Axelsson, P. & Stanney, K. M. (2005). Validation of Predictive Workload Component of the Multimodal Information Design Support (MIDS) System. In *Proceedings of the Human Factors and Ergonomics Society 49th Annual Meeting* (S. 1162–1166). Human Factors and Ergonomics Society. <https://doi.org/10.1177/154193120504901214>
- Hancock, P. A. (1989). A Dynamic Model of Stress and Sustained Attention. *Human Factors*, 31(5), 519–537. <https://doi.org/10.1177/001872088903100503>
- Hancock, P. A. (2003). Individuation: Not merely human-centered but person-specific design. In *Proceedings of the Human Factors and Ergonomics Society 47th Annual Meeting* (S. 1085–1086). Human Factors and Ergonomics Society
- Hancock, P. A. (2014). Automation: How much is too much? *Ergonomics*, 57(3), 449–454. <https://doi.org/10.1080/00140139.2013.816375>
- Hancock, P. A. & Chignell, M. H. (1986). Input information requirements for an adaptive human-machine system. In *Proceedings of the Tenth Department of Defense Conference on Psychology*, 10 (S. 493–498). Defense Technical Information Center
- Hancock, P. A., Pepe, A. A. & Murphy, L. L. (2005). Hedonomics: The power of positive and pleasurable ergonomics. *Ergonomics in Design*, 13(1), 8–14. <https://doi.org/10.1177%2F106480460501300104>
- Hart, S. G. & Staveland, L. E. (1988). Development of NASA-TLX (Task Load Index): Results of empirical and theoretical research. In P. A. Hancock & N. Meshkati (Hrsg.), *Human mental workload* (S. 139–183). Elsevier. [https://doi.org/10.1016/S0166-4115\(08\)62386-9](https://doi.org/10.1016/S0166-4115(08)62386-9)
- Hartmann, M. (2010). *Context-Aware Intelligent User Interfaces for Supporting System Use* (Dissertation, Technische Universität Darmstadt). Deutsche Nationalbibliothek. <https://d-nb.info/1003544193/>
- Haun, M. (2014). *Cognitive Computing*. Springer Vieweg Verlag
- Heller, O. (1982). *Theorie und Praxis des Verfahrens der Kategorienunterteilung (KU)*. Würzburger Psychologisches Institut.
- Herczeg, M. (2014). Design for Responsibility: Die Rolle des Operateurs zwischen Automation und Verantwortung. In M. Grandt & S. Schmerwitz (Hrsg.), *56. Fachausschusssitzung Anthropotechnik der DGLR: Der Mensch zwischen Automatisierung, Kompetenz und Verantwortung* (S. 1–15). Deutsche Gesellschaft für Luft- und Raumfahrt.
- Herold, H., Lurz, B. & Wohlrab, J. (2007). *Grundlagen der Informatik*. Pearson.
- Hettinger, L. J., Branco, P., Encarnacao, L. M. & Bonato, P. (2003). Neuroadaptive technologies: Applying neuroergonomics to the design of advanced interfaces, *Theoretical Issues in Ergonomics Science*, 4(1-2), 220–237, <https://doi.org/10.1080/1463922021000020918>
- Hevner, A. R., March, S. T., Park, J. & Ram, S. (2004). Design science in information systems research. *MIS Quarterly: Management Information Systems*, 28(1), 75–105. <https://doi.org/10.2307/25148625>
- Hilburn, B., Jorna, P. G., Byrne E.A. & Parasuraman, R. (1997). The effect of adaptive air traffic control (ATC) decision aiding on controller mental workload. In M. Mouloua & J. Koonce (Hrsg.), *Human Automation Interaction: Research and Practice* (S. 84–91). Lawrence Erlbaum Associates, Inc.
- Hoc, J. M. (2000). From human–machine interaction to human–machine cooperation. *Ergonomics*, 43(7), 833–843. <https://doi.org/10.1080/001401300409044>
- Hockey, G. R. J. (1970). Effect of loud noise on attentional selectivity. *Quarterly Journal of Experimental Psychology*, 22(1), 28–36. <https://doi.org/10.1080/14640747008401898>
- Hockey, G. R. J. (1986). Changes in operator efficiency as function of effects of environmental stress, fatigue and circadian rhythm. In K. Boff, L. Kaufman & J. P. Thomas (Hrsg.), *Handbook of Perception and Human Performance* (Chapter 44). John Wiley and Sons.
- Hoffman, R. R., Klein, G. & Mueller, S. T. (2018). Explaining Explanation For “Explainable Ai”. In *Proceedings of the Human Factors and Ergonomics Society Annual Meeting*, 62(1), 197–201. <https://doi.org/10.1177/1541931218621047>
- Jacucci, G., Fairclough, S. & Solovey, E. (2015). Physiological Computing. *Computer*, 48(10), 12–16, 2015. <https://doi.org/10.1109/MC.2015.291>
- James, W. (1890). *The principles of psychology*, Vol. 2. Henry Holt and Company. <https://doi.org/10.1037/11059-000>

- Janke, O. (2003). *Verbesserte Automatisierung durch Lernen unter Dual-Task-Bedingungen? Zwei Studien mit neurologisch erkrankten Patienten und Normalpersonen* (Dissertation, Heinrich-Heine-Universität Düsseldorf). Deutsche Nationalbibliothek. <https://d-nb.info/971844968>
- Kaber, D.B. & Endsley, M.R. (2004). The effects of level of automation and adaptive automation on human performance, situation awareness and workload in a dynamic control task. *Theoretical Issues in Ergonomics Science*, 5(2), 113–153. <https://doi.org/10.1080/1463922021000054335>
- Kaber, D. B., Prinzel, L. J., III, Wright, M. C. & Clamann, M. P. (2002). *Workload-Matched Adaptive Automation Support of Air Traffic Controller Information Processing Stages* (Technischer Bericht NASA/TP-2002-211932). NASA.
- Kaber, D. B., Riley, J. M., Tan, K.-W. & Endsley, M. R. (2001). On the design of adaptive automation for complex systems. *International Journal of Cognitive Ergonomics*, 5(1), 37–57. https://doi.org/10.1207/S15327566IJCE0501_3
- Kahneman (1973) *Attention and Effort*. Prentice-Hall.
- Karwowski, W., Haas, M & Salvendy, G. (2006). *A Review and Reappraisal of Adaptive Human-Computer Interfaces in Complex Control Systems* (Technischer Bericht AFRL-HE-WP-TR-2006-0123). Air Force Aerospace Medical Research Laboratory.
- Kavlakoglu, E. (2020, May 27). AI vs. Machine Learning vs. Deep Learning vs. Neural Networks: What's the Difference? *IBM Cloud Blog*. <https://www.ibm.com/cloud/blog/ai-vs-machine-learning-vs-deep-learning-vs-neural-networks>
- Keilhacker, P. (2013). *Subjektive Bewertung von Lärminderungsmaßnahmen mittels Kategorien- und Verhältnisskalierung* [Dissertation]. Katholische Universität Eichstätt-Ingolstadt.
- Kerr, B. (1973). Processing demands during mental operations. *Memory & Cognition*, 1(4), 401–412. <https://doi.org/10.3758/BF03208899>
- Kinncses, W.E. (2005). DaimlerChrysler's closed loop integrated prototype: Current status and outlook. In D.D. Schmorow (Hrsg.), *Foundations of Augmented Cognition*, vol. 11 (S. 477–478). CRC Press. <https://doi.org/10.1201/9781482289701>
- Kirsh, D. (2000). A few thoughts on cognitive overload. *Intellectica*, 30, 19–51. <https://doi.org/10.3406/intel.2000.1592>
- Klapp, S. T., Maslovat, D. & Jagacinski, R. J. (2019). The bottleneck of the psychological refractory period effect involves timing of response initiation rather than response selection. *Psychonomic Bulletin & Review*, 26(1), 29–47. <https://doi.org/10.3758/s13423-018-1498-6>
- Koch, I. (2008). Hin und her. Multitasking – eine Herausforderung für die Arbeitswelt der Zukunft? *Forschung & Lehre*, 10, 702-703.
- Kortschot, S. W., Jamieson, G. A. & Prasad, A. (2022). Detecting and responding to information overload with an adaptive user interface. *Human Factors*, 64(4), 675–693. <https://doi.org/10.1177/0018720820964343>
- Kristensson, P. O., Banovic, N., Oulasvirta, A. & Williamson, J. (2019). Computational Interaction with Bayesian Methods. *Extended Abstracts of the 2019 CHI Conference on Human Factors in Computing Systems* (CHI EA '19) (Paper C16; S. 1–6). Association for Computing Machinery. <https://doi.org/10.1145/3290607.3298820>
- Kroft, P. & Wickens, C. D. (2001). *The display of multiple geographical data bases: Implications of visual attention* (Technischer Bericht ARL-01-2/NASA-01-2). University of Illinois, Aviation Research Laboratory
- Kruse, A. A., Schmorow, D. D. (2005). Session Overview: Foundations of Augmented Cognition. In D. D. Schmorow (Hrsg.), *Foundations of Augmented Cognition* (S. 441–445). CRC Press.
- Langley, P. (2011). The changing science of machine learning. *Machine Learning*, 82, 275–279. <https://doi.org/10.1007/s10994-011-5242-y>
- Lavie, T. & Meyer, J. (2010). Benefits and costs of adaptive user interfaces. *International Journal of Human-Computer Studies*, 68(8), 508–524. <https://doi.org/10.1016/j.ijhcs.2010.01.004>
- Lee, J. D. & See, K. A. (2004). Trust in automation: designing for appropriate reliance. *Human Factors*, 46(1), 50–80. https://doi.org/10.1518/hfes.46.1.50_30392

- Licklider, J. C. R. (1960). Man-Computer Symbiosis. *IRE Transactions on Human Factors in Electronics, HFE-1*(March), 4–11. <https://doi.org/10.1109/THFE2.1960.4503259>
- Lin, J., Matthews, G., Reinerman-Jones, L. & Wohleber, R. (2018). Assessing operator psychological states and performance in UAS operations. In D. Schmorow & C. Fidopiastis (Hrsg.), *Augmented Cognition: Intelligent Technologies. AC 2018. Lecture Notes in Computer Science, vol. 10915* (S. 131–147). Springer. https://doi.org/10.1007/978-3-319-91470-1_12
- Lorentzen, K. F. (2002). Luhmann goes Latour – zur Soziologie hybrider Beziehungen. In W. Rammert & I. Schulz-Schaeffer (Hrsg.), *Können Maschinen handeln? Soziologische Beiträge zum Verhältnis von Mensch und Technik* (S. 101–118). Campus.
- Mack, A. & Rock, I. (1998). *Inattentional Blindness*. MIT Press. <https://doi.org/10.7551/mitpress/3707.001.0001>
- Mackworth, N.H. (1948). The breakdown of vigilance during prolonged visual search. *Quarterly Journal of Experimental Psychology, 1*, 6–21. <https://doi.org/10.1080/17470214808416738>
- Mallam, S. C., Nazir, S. & Sharma, A. (2020). The human element in future Maritime Operations – perceived impact of autonomous shipping. *Ergonomics, 63*(3), 334–345. <https://doi.org/10.1080/00140139.2019.1659995>
- Malone, T., Rus, D. & Laubacher, R. (2020). *Artificial Intelligence and the Future of Work* (Research Brief RB 17/2020). MIT Industrial Performance Center. <https://workofthefuture.mit.edu/research-post/artificial-intelligence-and-the-future-of-work/>
- Manzey, D. (2008). Systemgestaltung und Automatisierung. In P. Badke-Schaub, G. Hofinger & K. Lauche (Hrsg.), *Human Factors. Psychologie sicheren Handelns in Risikobereichen* (S. 333–352). Springer. https://doi.org/10.1007/978-3-540-72321-9_19
- May, J. F. & Baldwin, C. L. (2009). Driver fatigue: The importance of identifying causal factors of fatigue when considering detection and countermeasure technologies. *Transportation Research Part F: Psychology and Behaviour, 12*(3), 218–224. <https://doi.org/10.1016/j.trf.2008.11.005>
- McFarlane, D. C. (2002). Comparison of Four Primary Methods for Coordinating the Interruption of People in Human-Computer Interaction. *Human-Computer Interaction, 17*(1), 63–139. https://doi.org/10.1207/S15327051HCI1701_2
- Metzger, U. & Parasuraman, R. (2005). Automation in future air traffic management: effects of decision aid reliability on controller performance and mental workload. *Human Factors, 47*(1), 35–49. <http://dx.doi.org/10.1518/0018720053653802>
- Miller, G. A. (1956). The magical number seven, plus or minus two: Some limits on our capacity for processing information. *Psychological Review, 63*, 81–97. <https://doi.org/10.1037/h0043158>
- Millot, P. & Lemoine, M.P. (1998). An attempt for generic concepts toward human-machine cooperation. In *Proceedings of the 1998 IEEE International Conference on Systems, Man, and Cybernetics (SMC)* (S. 1044–1049). IEEE. <https://doi.org/10.1109/ICSMC.1998.725555>
- Monsell, S. (2003). Task Switching. *Trends in Cognitive Sciences, 7*, 134–140. [https://doi.org/10.1016/S1364-6613\(03\)00028-7](https://doi.org/10.1016/S1364-6613(03)00028-7)
- Mulder, B., de Waard, D., Hoogeboom, P., Quispel, L., Stuiver, A. (2008). Using physiological measures for task adaptation. In J. H. D. M. Westerink, M. Ouwkerk, T. J. M. Overbeek, W. F. Pasveer & B. de Ruyter (Hrsg.), *Probing Experience. Philips Research, vol 8* (S. 221–234). Springer. https://doi.org/10.1007/978-1-4020-6593-4_19
- Neerinx, M. A. 2003. Cognitive Task Load Analysis: Allocating Tasks and Designing Support. In E. Hollnagel (Hrsg.), *Handbook of Cognitive Task Design* (S. 283–305). CRC Press. <https://doi.org/10.1201/9781410607775>
- Norman, D. A. (1968). Toward a theory of memory and attention. *Psychological Review, 75*(6), 522–536. <https://doi.org/10.1037/h0026699>
- Norman, D. A. & Shallice, T. (1980). Attention to Action: Willed and Automatic Control of Behaviour. In R. J. Davidson, G.E. Schwartz & D. Shapiro (Hrsg.), *Consciousness and Self-Regulation* (S. 1–18). Springer. https://doi.org/10.1007/978-1-4757-0629-1_1
- Olson W. A. & Sarter N. B. (2001). Management by Consent in Human-Machine Systems: When and Why It Breaks Down. *Human Factors, 43*(2), 255–266. <https://doi.org/10.1518/001872001775900904>

- Österle, H., Becker, J., Frank, U., Hess, T., Karagiannis, D., Krcmar, H., Loos, P., Mertens, P., Oberweis, A. & Sinz, E. (2010). Memorandum zur gestaltungsorientierten Wirtschaftsinformatik. *Schmalenbachs Zeitschrift für betriebswirtschaftliche Forschung*, 62, 664–672. <https://doi.org/10.1007/BF03372838>
- Parasuraman, R. (1987). Human-Computer Monitoring. *Human Factors*, 29(6), 695–706. <https://doi.org/10.1177/001872088702900609>
- Parasuraman, R. (2003). Neuroergonomics: research and practice. *Theoretical Issues in Ergonomic Science*, 4, 5–20. <https://doi.org/10.1080/14639220210199753>
- Parasuraman, R., Bahri, T., Deaton, J. E., Morrison, J. G. & Barnes, M. (1992). *Theory and design of adaptive automation in aviation systems* (Progress Report NAWCADWAR-92033-60 under Contract No. N62269-90-0022-5931). Naval Air Warfare Center – Aircraft Division.
- Parasuraman, R., Molloy, R. & Singh, I. L. (1993). Performance consequences of automation-induced "complacency". *The International Journal of Aviation Psychology*, 3(1), 1–23. https://doi.org/10.1207/s15327108ijap0301_1
- Parasuraman, R., Mouloua, M., Molloy, R. & Hilburn, B. (1993). Adaptive function allocation reduces performance cost of static automation. In J. G. Morrison (Hrsg.), *The Adaptive Function Allocation for Intelligent Cockpits (AFAIC) Program: Interim Research Guidelines for the Application of Adaptive Automation* (Report No. NAWCADWAR-93031-60) (S. 37–42), Naval Air Warfare Center.
- Parasuraman, R. & Riley, V. (1997). Humans and automation: Use, misuse, disuse, abuse. *Human Factors: The Journal of the Human Factors and Ergonomics Society*, 39(2), 230–253. <https://doi.org/10.1518/001872097778543886>
- Parasuraman, R., Sheridan, T. B. & Wickens, C. D. (2000). A Model for Types and Levels of Human Interaction with Automation. *IEEE Transactions on Systems, Man, and Cybernetics - Part A: Systems and Humans*, 30(3), 286–297. <https://doi.org/10.1109/3468.844354>
- Parasuraman, R. & Wickens, C. D. (2008). Humans: Still Vital After All These Years of Automation. *Human Factors*, 50(3), 511–520. <https://doi.org/10.1518/001872008X312198>
- Pashler, H. (1994). Dual-task interference in simple tasks: Data and theory. *Psychological Bulletin*, 116, 220–244. <https://doi.org/10.1037/0033-2909.116.2.220>
- Paul, C. L. (2011). Automation: friend or foe? *Ergonomics in Design*, 19(2), 31–32. <https://doi.org/10.1177/1064804611411409>
- Pope, A. T., Bogart, E. H. & Bartolome, D. S. (1995). Biocybernetic system evaluates indices of operator engagement in automated task. *Biological psychology*, 40(1-2), 187–195. [https://doi.org/10.1016/0301-0511\(95\)05116-3](https://doi.org/10.1016/0301-0511(95)05116-3)
- Posner, M. I. (1980). Orienting of attention. *Quarterly Journal of Exp. Psychology*, 32, 3–25. <https://doi.org/10.1080/00335558008248231>
- Posner, M. I., Snyder, C. R. R. & Davidson, B. J. (1980). Attention and the detection of signals. *Journal of Experimental Psychology: General*, 109, 160–174. <https://doi.org/10.1037/0096-3445.109.2.160>
- Rammert, W. & Schulz-Schaeffer, I. (2002). Technik und Handeln – Wenn soziales Handeln sich auf menschliches Verhalten und technische Abläufe verteilt. In W. Rammert & I. Schulz-Schaeffer (Hrsg.), *Können Maschinen handeln? Soziologische Beiträge zum Verhältnis von Mensch und Technik* (S. 11–64). Campus. https://doi.org/10.1007/978-3-531-90485-6_6
- Rensink, R. A. (2002). Change Detection. *Annual Review of Psychology*, 53, 245–277. <https://doi.org/10.1146/annurev.psych.53.100901.135125>
- Riley, V. (1985). Monitoring the monitor: Some possible effects of embedding human models in highly automated manned systems. In *Proceedings of the IEEE Conference on Systems, Man, and Cybernetics*, 15, 6–9. IEEE.
- Rittel, H. J. & Webber, M. M. (1984). Planning Problems Are Wicked Problems. In N. Cross (Hrsg.): *Developments in Design Methodology* (S. 135–144). John Wiley & Sons.
- Rohmert, W. (1984). Das Belastungs-Beanspruchungs-Konzept. *Zeitschrift für Arbeitswissenschaft*, 38(4), 193–200.
- Rohmert, W. & Rutenfranz, J. (1975). *Arbeitswissenschaftliche Beurteilung der Belastung und Beanspruchung an unterschiedlichen industriellen Arbeitsplätzen*. Bundesministerium für Arbeit und Sozialordnung.

- Ropohl, G. (1979). *Eine Systemtheorie der Technik. Zur Grundlegung der allgemeinen Technologie*. Hanser.
- Ropohl, G. (2009). *Allgemeine Technologie: Eine Systemtheorie der Technik*. (3. Auflage). Universitätsverlag Karlsruhe. <https://doi.org/10.5445/KSP/1000011529>
- Rothrock, L., Koubek, R., Fuchs, F., Haas, M. & Salvendy, G., 2002. Review and reappraisal of adaptive interfaces: toward biologically inspired paradigms. *Theoretical Issues in Ergonomics Science* 3(1), 47–84. <https://doi.org/10.1080/14639220110110342>
- Rouse, W. B. (1976). Adaptive Allocation of Decision Making Responsibility between Supervisor and Computer. In T. B. Sheridan & G. Johannsen (Hrsg.), *Monitoring Behavior and Supervisory Control. NATO Conference Series, vol 1* (S. 295–306). Springer. https://doi.org/10.1007/978-1-4684-2523-9_24
- Rouse, W. B. (1977). Human-computer interaction in multitask situations. *IEEE Transactions on Systems, Man, and Cybernetics*, 7(5), 384–392. <https://doi.org/10.1109/TSMC.1977.4309727>
- Rouse, W. B. (1988). Adaptive Aiding for Human/Computer Control. *Human Factors*, 30(4), 431–443. <https://doi.org/10.1177/001872088803000405>
- Rouse, W. B. & Rouse, S. H. (1983). *A framework for research on adaptive decision aids*. (Technischer Bericht AFAMRL-TR-83-082). Air Force Aerospace Medical Research Laboratory.
- Sarter, N. B. & Woods, D. D. (1995). How in the world did we ever get into that mode? Mode error and awareness in supervisory control. *Human Factors*, 37(1), 5–19. <https://doi.org/10.1518/001872095779049516>
- Scerbo, M. W. (1996). Theoretical Perspectives on Adaptive Automation. In R. Parasuraman & M. Mouloua (Hrsg.), *Automation and human performance: Theory and applications* (S. 37–63). Lawrence Erlbaum Associates, Inc. <https://doi.org/10.1201/9781315137957>
- Scerbo, M. W. (2006). Adaptive Automation. In Raja Parasuraman & M. Rizzo (Hrsg.), *Neuroergonomics: The Brain at Work* (S. 239–252). Oxford University Press. <https://doi.org/10.1093/acprof:oso/9780195177619.003.0016>
- Scerbo, M. W. (2006b). Dynamic Function Allocation. In W. Karwowski (Hrsg.), *International encyclopedia of ergonomics and human factors* (S. 1080–1082). CRC Press.
- Schmidt, A. (2000). Implicit human computer interaction through context. *Personal Technologies*, 4(2), 191–199. <https://doi.org/10.1007/BF01324126>
- Schmidt, A. (2005). Interactive Context-Aware Systems Interacting with Ambient Intelligence. In G. Riva, F. Vatalaro, F. Davide, M. Alcañiz (Hrsg.), *Ambient Intelligence* (S. 159–178). IOS Press.
- Schmidt, A. (2014) Context-Aware Computing: Context-Awareness, Context-Aware User Interfaces, and Implicit Interaction. In M. Soegaard, M. and Dam, R.F. (Hrsg.): *The Encyclopedia of Human-Computer Interaction* (2. Aufl.). The Interaction Design Foundation.
- Schmidt, A. & Herrmann, T. (2017). Intervention user interfaces. *Interactions*, 24(5), 40–45. <https://doi.org/10.1145/3121357>
- Schmitz-Hübsch, A. (2019). *Der Einfluss situationaler affektiver Zustände auf den Zusammenhang zwischen Aufmerksamkeit und Performanz: Evidenz aus einer Command and Control Aufgabe* (unveröffentlichte Masterarbeit). Rheinische Friedrich-Wilhelms-Universität Bonn.
- Schmitz-Hübsch, A., Stasch, S. M. & Fuchs, S. (2021). Individual Differences in the Relationship Between Emotion and Performance in Command-and-Control Environments. In R. A. Sottilare & J. Schwarz (Hrsg.) *Adaptive Instructional Systems. Adaptation Strategies and Methods. HCII 2021. Lecture Notes in Computer Science, vol 12793* (pp. 135–148). Springer. https://doi.org/10.1007/978-3-030-77873-6_10
- Schmorrow, D. D. & Kruse, A. A., (2002). DARPA's Augmented Cognition Program - tomorrow's human computer interaction from vision to reality: building cognitively aware computational systems. In *Proceedings of the IEEE 7th Conference on Human Factors and Power Plants* (S. 7-1–7-4). IEEE. <https://doi.org/10.1109/HFPP.2002.1042859>
- Schmorrow, D. D., Kruse, A. A., Reeves, L. M. & Bolton, A. (2007). Augmenting Cognition in HCI: 21st Century Adaptive System Science and Technology. In J. A. Jacko & A. Sears (Hrsg.), *Handbook of Human-Computer Interaction* (3. Aufl., S. 1222–1241). CRC Press. <https://doi.org/10.1201/9781410615862>

- Schmorrow, D. D., Stanney, K. M., Wilson, G. & Young, P. (2005). Augmented cognition in human-system interaction. In G. Salvendy (Hrsg.), *Handbook of human factors and ergonomics* (3. Aufl., S. 1364–1384). Wiley. <https://doi.org/10.1002/0470048204.ch52>
- Schwarz, J. (2013). Benutzerzustandserfassung zur Regelung Kognitiver Assistenz an Bord von Marineschiffen. In D. Söffker (Hrsg.), *2. Interdisziplinärer Workshop Kognitive Systeme: Mensch, Teams, Systeme und Automaten*. DuEPublico. <https://doi.org/10.17185/duepublico/31351>
- Schwarz, J. C. (2019). *Multifaktorielle Echtzeitdiagnose des Nutzerzustands in adaptiver Mensch-Maschine-Interaktion* (Dissertation, Technische Universität Dortmund). <https://doi.org/10.17877/DE290R-20269>
- Schwarz, J. & Fuchs, S. (2014). Adaptive Automation als sozialer Akteur - Anforderungen an die Gestaltung aus psychologischer und systemtheoretischer Sicht. In M. Grandt & S. Schmerwitz (Hrsg.), *Der Mensch zwischen Automatisierung, Kompetenz und verantwortung (DGLR-Bericht 2014-01)* (S. 107–123). Deutsche Gesellschaft für Luft- und Raumfahrt e.V. <https://www.dglr.de/publikationen/2014/53901b009.pdf>
- Schwarz, J., Fuchs, S. & Flemisch, F. (2014). Towards a more holistic view on user state assessment in adaptive human-computer interaction. In *Proceedings of the 2014 IEEE International Conference on Systems, Man, and Cybernetics (SMC)* (S. 1228–1234). IEEE. <https://doi.org/10.1109/SMC.2014.6974082>
- Schwarz, J., Bracco, F., Chiorri, C., Lommi, A., De Angelis, P. et al. (2012). *FODAI – Fatigue and Overload Detection and Advising Interface. WP3 – Definition and Validation of the Methodology* (Final Synthesis Report on Methodology Validation – Unclassified EDA Report). CETENA.
- Schweiger, A., Annighoefer, B., Reich, M., Regli, C. Moy, Y., Soodt, T., de Cacqueray, A. & Redon, R. (2021). Classification for Avionics Capabilities Enabled by Artificial Intelligence. In *2021 IEEE/AIAA 40th Digital Avionics Systems Conference (DASC)* (S. 1–10). IEEE. <https://doi.org/10.1109/DASC52595.2021.9594364>
- Sciarini, L. W. & Nicholson, D. (2009). Assessing cognitive state with multiple physiological measures: A modular approach. In D. D. Schmorrow, I. V. Estabrooke & M. Grootjen (Hrsg.), *Augmented Cognition, HCII 2009, LNAI 5638* (S. 533–542). Springer. https://doi.org/10.1007/978-3-642-02812-0_62
- Shallice, T. (1982). Specific impairments of planning. *Philosophical Transactions of the Royal Society of London. B, Biological Sciences*, 298(1089), 199–209. <https://doi.org/10.1098/rstb.1982.0082>
- Sheridan, T. B. (2011). Adaptive Automation, Level of Automation, Allocation Authority, Supervisory Control, and Adaptive Control: Distinctions and Modes of Adaptation. *IEEE Transactions on Systems, Man, and Cybernetics – Part A: Systems and Humans*, 41(4), 662–667. <https://doi.org/10.1109/TSMCA.2010.2093888>
- Sheridan, T. B. (2021). Human supervisory control of automation. In G. Salvendy & W. Karwowski (Hrsg.), *Handbook of human factors and ergonomics* (5. Aufl.) (S.736–760). Wiley.
- Simmel, G. (1900). *Philosophie des Geldes*. Leipzig: Duncker & Humbolt. <https://doi.org/10.1515/9783110653427>
- Simons, D. J., Franconeri, S. L. & Reimer, R. L. (2000). Change Blindness in the Absence of a Visual Disruption. *Perception*, 29(10), 1143–1154. <https://doi.org/10.1068/p3104>
- Smith-Jentsch, K. A., Zeisig, R. L., Acton, B. & McPherson, J. A. (1998). Team dimensional training: A strategy for guided team self-correction. In J. A. Cannon-Bowers & E. Salas (Hrsg.), *Making decisions under stress: Implications for individual and team training* (S. 271–297). American Psychological Association. <https://doi.org/10.1037/10278-010>
- Sottolare, R. A. (2018). A Comprehensive Review of Design Goals and Emerging Solutions for Adaptive Instructional Systems. *Technology, Instruction, Cognition & Learning*, 11(1), 5–38.
- St. John, M., Manes, D. I., Smallman, H. S., Feher, B. A. & Morrison, J. G. (2004). Heuristic automation for decluttering tactical displays. *Proceedings of the Human Factors and Ergonomics Society 48th Annual Meeting*, 48(3), 416–420. <https://doi.org/10.1177/154193120404800330>
- Staal, M.A. (2004). *Stress, Cognition, and Human Performance: A Literature Review and Conceptual Framework* (Technischer Bericht NASA/TM-2004-212824). NASA Ames Research Center.

- Stanney, K. M., Schmorow, D. D., Johnston, M., Fuchs, S., Jones, D., Hale, K. S., Ahmad, A. & Young, P. (2009). Augmented Cognition: An Overview. *Reviews of Human Factors and Ergonomics*, 5(1), 195–224. <https://doi.org/10.1518/155723409X448062>
- Steinhauser, N. B., Pavlas, D. & Hancock, P. A. (2009). Design Principles for Adaptive Automation and Aiding. *Ergonomics in Design*, 17(2), 6–10. <https://doi.org/10.1518/106480409X435943>
- Struk, A. A., Scholer, A. A. & Danckert, J. (2016). A Self-Regulatory Approach to Understanding Boredom Proneness. *Cognition and Emotion*, 30(8), 1388–1401. <https://doi.org/10.1080/02699931.2015.1064363>
- Takahashi, M., Kubo, O., Kitamura, M. & Yoshikawa, H. (1994). Neural network for human cognitive state estimation. In *Proceedings of IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems (IROS'94)*, vol.3 (S. 2176–2183). IEEE. <https://doi.org/10.1109/IROS.1994.407565>
- Telford, C. W. (1931). The refractory phase of voluntary and associative responses. *Journal of Experimental Psychology*, 14(1), 1–36. <https://doi.org/10.1037/h0073262>
- Tollar, J. R. (2005). Statistical Process Control as a Triggering Mechanism for Augmented Cognition Mitigations. In D. D. Schmorow (Hrsg.), *Foundations of Augmented Cognition* (S. 414–420). CRC Press. <https://doi.org/10.1201/9781482289701>
- Tremoulet, P., Barton, P., Craven, P., Corrado, C., Mayer, G., Stibler, K., et al. (2005). *DARPA Improving Warfighter Information Intake Under Stress – Augmented cognition phase 3 concept validation experiment (CVE) analysis report for the Lockheed-Martin ATL team* (Technischer Bericht zu Vertrag NBCH030032). DARPA/IPTO.
- UN ECE (2014). *Report of the sixty-eighth session of the Working Party on Road Traffic Safety* (ECE/TRANS/WP.1/145, 17.04.2014). United Nations Economic and Social Council.
- Veltman, H. J. A. & Jansen, C. (2004). The adaptive operator. In D. A. Vincenzi, M. Mouloua & P. A. Hancock (Hrsg.), *Human performance, situation awareness, and automation: Current research and trends, HPSAA II, Vol. II* (S. 7–10). Lawrence Erlbaum Associates. <https://doi.org/10.4324/9781410610997>
- Veltman, J. A. & Jansen, C. (2006). *The role of operator state assessment in adaptive automation* (Technischer Bericht TNO-DV3 2005 A245). TNO.
- Vertegaal, R. (2003). Attentive User Interfaces. *Communications of the ACM*, 46(3), 30–33. <https://doi.org/10.1145/636772.636794>
- Vertegaal, R. & Shell, J. S. (2008). Attentive user interfaces: the surveillance and sousveillance of gaze-aware objects. *Social Science Information*, 47(3), 275–298. <https://doi.org/10.1177/0539018408092574>
- Vertegaal, R., Shell, J.S., Chen, D. & Mamuji, A. (2006). Designing for augmented attention: Towards a framework for attentive user interfaces. *Computers in Human Behavior*, 22(4), 771–789. <https://doi.org/10.1016/j.chb.2005.12.012>
- Ververs, P. M., Whitlow, S. D., Dorneich, M. C. & Mathan, S. (2005). Building Honeywell's Adaptive System for the Augmented Cognition Program. In D. D. Schmorow (Hrsg.), *Foundations of Augmented Cognition* (S. 460–468). CRC Press. <https://doi.org/10.1201/9781482289701>
- Welford, A. T. (1952). The “psychological refractory period” and the timing of high-speed performance – A review and a theory. *British Journal of Psychology. General Section*, 43(1), 2–19. <https://doi.org/10.1111/j.2044-8295.1952.tb00322.x>
- Welford, A. T. (1967). Single-channel operation in the brain. *Acta Psychologica*, 27, 5–22. [https://doi.org/10.1016/0001-6918\(67\)90040-6](https://doi.org/10.1016/0001-6918(67)90040-6)
- Werger, A. (2016). *Entwicklung eines Regeleditors für die regelbasierte Interpretation von heterogenen Daten zur Leistungs- und Nutzerzustandsdiagnose* (unveröffentlichte Bachelorarbeit). Hochschule Bonn-Rhein-Sieg.
- Weyer, J. (2008). *Techniksoziologie – Genese, Gestaltung und Steuerung sozio-technischer Systeme*. Juventa.
- Wickens, C. D. (1984). Processing resources in attention. In R. Parasuraman & R. Davies (Hrsg.), *Varieties of Attention* (S. 63–101). Academic Press.

- Wickens, C.D. (1991). *Processing resources in attention, dual task performance, and workload assessment* (Technical Report EPL-SI-3/ONR-81-3). Engineering Psychology Research Laboratory, University of Illinois at Urbana-Champaign.
- Wickens, C. D. (2002). Multiple resources and performance prediction. *Theoretical Issues in Ergonomics Science*, 3(2), 159–177.
- Wickens, C. D. (2005). *Attentional Tunneling and Task Management* (Technischer Bericht AHFD-05-01/NASA-05-10). NASA Ames Research Center.
- Wickens, C. D. (2008). Multiple resources and mental workload. *Human Factors*, 50(3), 449–455. <https://doi.org/10.1518/001872008X288394>
- Wickens, C. D. & Alexander, A. L. (2009). Attentional Tunneling and Task Management in Synthetic Vision Displays. *The International Journal of Aviation Psychology*, 19(2), 182–199. <https://doi.org/10.1080/10508410902766549>
- Wickens, C. D., Conejo, R. & Gempler, K. (1999). Unreliable Automated Attention Cueing for Air-Ground Targeting and Traffic Maneuvering. *Proceedings of the Human Factors and Ergonomics Society Annual Meeting*, 43(1), 21–25. <https://doi.org/10.1177/154193129904300105>
- Wickens, C. D & Hollands, J. G. (2000). *Engineering Psychology and Human Performance* (3. Aufl.). Prentice Hall.
- Wickens, C. D. & McCarley, J. S. (2008). *Applied Attention Theory*. CRC Press. <https://doi.org/10.1201/9780429059261>
- Wickens C. D. & McCarley J. S. (2008b). Executive control: Attention switching, interruptions, and task management. In C. D. Wickens & J. S. McCarley (Hrsg.), *Applied Attention Theory* (S. 145–160). CRC Press. <https://doi.org/10.1201/9780429059261>
- Wiener, N. (1950). *The human use of human beings*. Houghton Mifflin.
- Wiener, E. L. & Curry, R. E. (1980). Flight-deck automation: promises and problems. *Ergonomics*, 23(10), 995–1011. <https://doi.org/10.1080/00140138008924809>
- Wilde, T. & Hess, T. (2006). *Methodenspektrum der Wirtschaftsinformatik: Überblick und Portfoliobildung* (Arbeitsbericht 2006/2). Institut für Wirtschaftsinformatik und Neue Medien der Ludwig-Maximilians-Universität München. <https://doi.org/10.5282/ubm/epub.14146>
- Wilkinson, R. T., Edwards, R. S. & Haines, E. (1966). Performance following a night of reduced sleep. *Psychonomic Science*, 5, 471–472. <https://doi.org/10.3758/BF03328474>
- Wilson, G. F. (2002). Adaptive aiding implemented by psychophysically determined operator functional state. In *Proceedings of the NATO RTO HFM Symposium on "The Role of Humans in Intelligent and Automated Systems"* (RTO-MP-088) (S. 18-2–18-8). NATO RTO.
- Wilson, G. F. (2005). Operator functional state assessment for adaptive automation implementation. In J. A. Caldwell & N. J. Wesensten (Hrsg.), *Biomonitoring for Physiological and Cognitive Performance during Military Operations* (*Proceedings of SPIE Vol. 5797*) (S. 100–104). SPIE. <https://doi.org/10.1117/12.601806>
- Wilson, G. F. & Russell, C. A. (2003). Operator functional state classification using multiple psychophysiological features in an air traffic control task. *Human Factors*, 45(3), 381–389. <http://www.ncbi.nlm.nih.gov/pubmed/14702990>
- Wilson, G. F. & Russell, C. A. (2003b). Real-Time Assessment of Mental Workload Using Psychophysiological Measures and Artificial Neural Networks. *Human Factors*, 45(4), 635–644. <https://doi.org/10.1518/hfes.45.4.635.27088>
- Wilson, G. F. & Russell, C. A. (2006). Psychophysically Versus Task Determined Adaptive Aiding Accomplishment. In D. D. Schmorrow, K. M. Stanney & L. M. Reeves (Hrsg.), *Foundations of Augmented Cognition* (S. 201–207). Strategic Analysis, Inc.
- Winter, H., Champigneux, G., Reising, J. & Strohal, M. (1997). Intelligent decision aids for human operators. In *Proceedings of the AGARD symposium on "Future aerospace technology in the service of the alliance"* (AGARD-CP-600, Vol. 2) (S. B3). NATO AGARD.
- Witt, O., Özyurt, E., Schwarz, J., Döring, B. & Dörfel, G. (2012). *Simulationsgestützte Entwicklung von Assistenzsystemen für Führungsaufgaben auf Marineschiffen unter Berücksichtigung des Demographischen Wandels (SADeWa)* (Abschlussbericht). Fraunhofer FKIE.

- Wolfe, J. M. (1998). Visual Search. In H. Pashler (Hrsg.), *Attention*. University College London Press. <https://doi.org/10.1002/9781119170174.epcn213>
- Woods, D. D. (1996). Decomposing Automation: Apparent Simplicity, Real Complexity. In R Parasuraman & M. Mouloua (Hrsg.), *Automation and Human Performance: Theory and Applications* (S. 3–17). Erlbaum. <https://doi.org/10.1201/9781315137957>
- Wright, M. C. (2002). *The Effects of Automation on Team Performance and Team Coordination*. Dissertation. North Carolina State University, Dept. of Industrial Engineering.
- Yantis S. (1993). Stimulus-driven attentional capture and attentional control settings. *Journal of experimental psychology. Human perception and performance*, 19(3), 676–681. <https://doi.org/10.1037//0096-1523.19.3.676>
- Yeh, M. & Wickens, C. D. (2001). Attentional filtering in the design of electronic map displays: A comparison of color coding, intensity coding, and decluttering techniques. *Human Factors*, 43(4), 543–562. <https://doi.org/10.1518/001872001775870359>
- Young, P. M., Clegg, B. A. & Smith, C. A. P. (2004) Dynamic Models of Augmented Cognition, *International Journal of Human–Computer Interaction*, 17(2), 259–273, https://doi.org/10.1207/s15327590ijhc1702_8
- Zakay, D. & Block, R. A. (2004). Prospective and retrospective duration judgments: an executive-control perspective. *Acta Neurobiologiae Experimentalis*, 64(3), 319–328.
- Zander, T.O., Kothe, C., Welke, S., Roetting, M. (2009). Utilizing Secondary Input from Passive Brain-Computer Interfaces for Enhancing Human-Machine Interaction. In: D. D. Schmorow, I. V. Estabrooke, M. Grootjen (Hrsg.), *Foundations of Augmented Cognition. Neuroergonomics and Operational Neuroscience. FAC 2009. Lecture Notes in Computer Science*, vol 5638 (S. 759–771). Springer. https://doi.org/10.1007/978-3-642-02812-0_86
- Zander, T. O., Krol, L. R., Birbaumer, N. P., Gramann, K. (2003). Neuroadaptive technology enables implicit cursor control based on medial prefrontal cortex activity. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 113(52), 14898–14903. <https://doi.org/10.1073/pnas.1605155114>

9.2 Eigene Veröffentlichungen zum Thema der Promotion nach § 9 Abs. 4 Satz 3 der Promotionsordnung 2012

- Fuchs, S., Hochgeschurz, S., Schmitz-Hübsch, A. & Thiele, L. (2020). Adapting Interaction to Address Critical User States of High Workload and Incorrect Attentional Focus – An Evaluation of Five Adaptation Strategies. In Schmorow D., Fidopiastis C. (Hrsg.), *Augmented Cognition. Human Cognition and Behavior. HCI 2020. Lecture Notes in Computer Science*, vol. 12197 (pp 335–352). Springer. https://doi.org/10.1007/978-3-030-50439-7_23
- Schwarz, J. & Fuchs, S. (2018). Validating a »Real-Time Assessment of Multidimensional User State« (RASMUS) for Adaptive Human-Computer Interaction, In *Proceedings of the 2018 IEEE International Conference on Systems, Man, and Cybernetics (SMC)* (S. 704-709). IEEE. <https://doi.org/10.1109/SMC.2018.00128>
- Fuchs, S. (2018). Adaptation Strategies and Adaptation Management. In D. D. Schmorow & C. Fidopiastis (Hrsg.), *Augmented Cognition: Intelligent Technologies, LNAI 10915* (S. 3–8). Springer. https://doi.org/10.1007/978-3-319-91470-1_1
- Fuchs, S. & Schwarz, J. (2017). Towards a Dynamic Selection and Configuration of Adaptation Strategies in Augmented Cognition. In D. D. Schmorow & C. M. Fidopiastis (Hrsg.), *Augmented Cognition. Enhancing Cognition and Behavior in Complex Human Environments. AC 2017. Lecture Notes in Computer Science*, vol. 10285 (S. 101–115). Springer. https://doi.org/10.1007/978-3-319-58625-0_7
- Schwarz, J. & Fuchs, S. (2017). Multidimensional real-time assessment of user state and performance to trigger dynamic system adaptation. In D. D. Schmorow & C. M. Fidopiastis (Hrsg.), *Augmented Cognition. Neurocognition and Machine Learning. AC 2017. Lecture Notes in Computer Science*, vol. 10284 (S. 383–398). Springer. https://doi.org/10.1007/978-3-319-58628-1_30
- Schwarz, J., Fuchs, S. & Flemisch, F. (2014). Towards a more holistic view on user state assessment in adaptive human-computer interaction. In *Proceedings of the 2014 IEEE International Conference on Systems, Man, and Cybernetics (SMC)* (S. 1228–1234). IEEE. <https://doi.org/10.1109/SMC.2014.6974082>
- Schwarz, J. & Fuchs, S. (2014). Adaptive Automation als sozialer Akteur: Anforderungen an die Gestaltung aus psychologischer und systemtheoretischer Sicht. In M. Grandt & S. Schmerwitz (Hrsg.), *56. Fachausschusssitzung Anthropotechnik der DGLR: Der Mensch zwischen Automatisierung, Kompetenz und Verantwortung* (S. 107–123). Deutsche Gesellschaft für Luft- und Raumfahrt e.V.
- Fuchs, S., Schwarz, J. (2014). Vom passiven Werkzeug zum sozialen Akteur: Ansatz einer ganzheitlichen Betrachtung adaptiver automatisierter Systeme. In M. Grandt & S. Schmerwitz (Hrsg.), *56. Fachausschusssitzung Anthropotechnik der DGLR: Der Mensch zwischen Automatisierung, Kompetenz und Verantwortung* (S. 285–288). Deutsche Gesellschaft für Luft- und Raumfahrt e.V.
- Fuchs, S., Schwarz, J. & Flemisch F. (2014). Two steps back for one step forward: Revisiting Augmented Cognition principles from a perspective of (social) system theory. In D.D. Schmorow & C.M. Fidopiastis (Hrsg.) *Foundations of Augmented Cognition. Advancing Human Performance and Decision-Making through Adaptive Systems. LNCS*, vol. 8534 (S. 114–124), Springer. https://doi.org/10.1007/978-3-319-07527-3_11
- Stanney, K. M., Schmorow, D. D., Johnston, M., Fuchs, S., Jones, D., Hale, K. S., Ahmad, A. & Young, P. (2009). Augmented Cognition: An Overview. *Reviews of Human Factors and Ergonomics*, 5(1), 195–224. <https://doi.org/10.1518/155723409X448062>
- Fuchs, S., Hale, K. S., Stanney, K. M., Juhnke, J. & Schmorow, D. D. (2007). Enhancing Mitigation in Augmented Cognition. *Journal of Cognitive Engineering and Decision Making*, 1(3), 309–326. <https://doi.org/10.1518/155534307X255645>
- Fuchs, S., Hale, K. S., Stanney, K. M., Berka, C., Levendowski, D. & Juhnke, J. (2006). Physiological Sensors Cannot Effectively Drive System Mitigation Alone. In D. D. Schmorow, K. M. Stanney & L. M. Reeves (Hrsg.), *Foundations of Augmented Cognition (2. Aufl.)* (S. 193–200). Strategic Analysis, Inc.

Anhang A. Material zur Voruntersuchung

A.1 Leistungs- und Zustandsmonitor

Der Leistungs- und Zustandsmonitor der multifaktoriellen Nutzerzustandsdiagnose (Abbildung 57) illustriert die Anzahl der aufgetretenen Teilaufgaben im zeitlichen Verlauf sowie deren aktuellen Status. Die Listen im unteren Teil zeigen die diagnostizierte Ausprägung der Nutzerzustände und der dazugehörigen Einflussfaktoren.

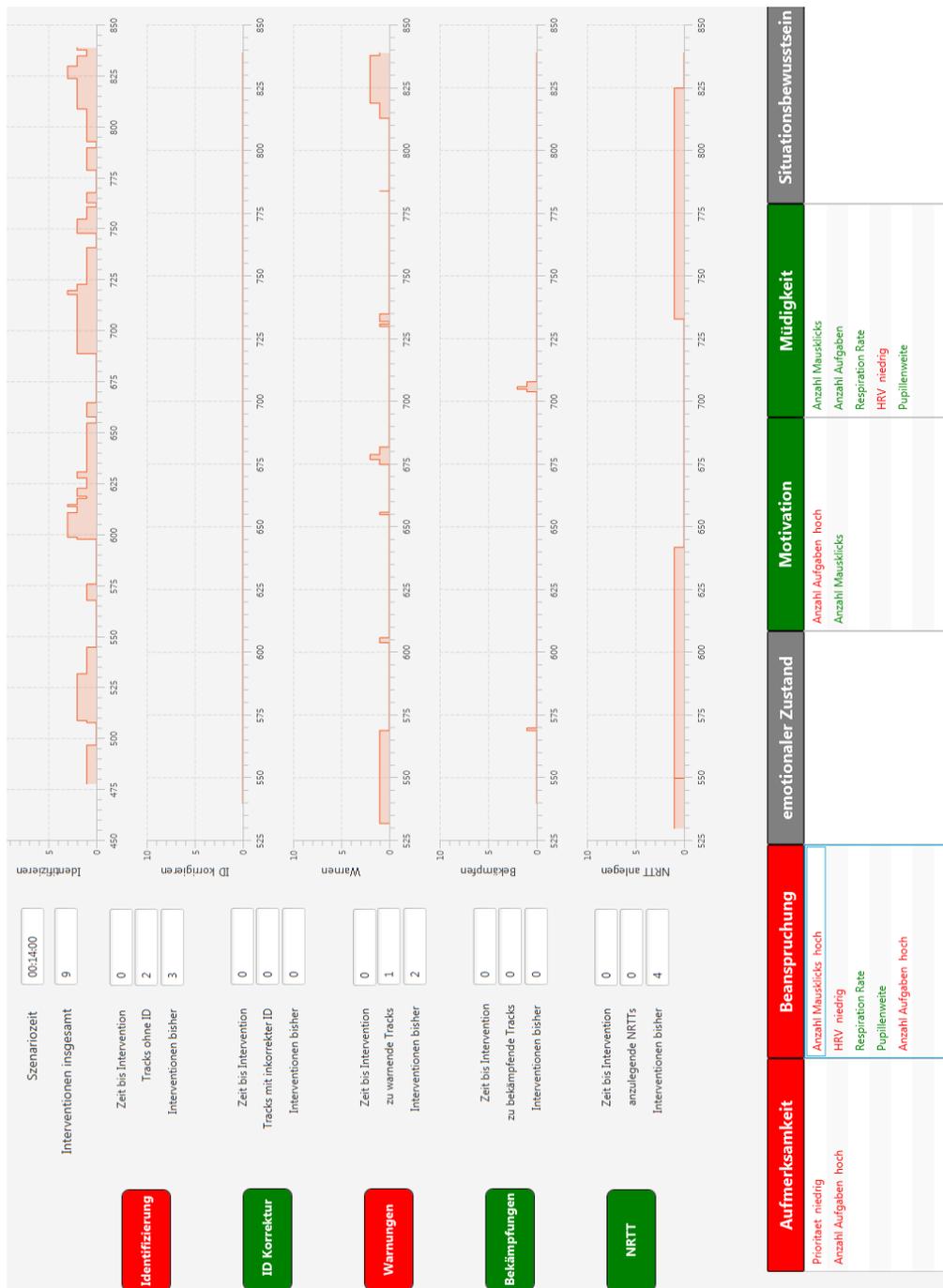


Abbildung 57. Leistungs- und Zustandsmonitor der multifaktoriellen Nutzerzustandsdiagnose

A.2 Versuchsplan

Zunächst war eine Stichprobe von 30 Probanden vorgesehen. Wenn ein Datensatz, zum Beispiel aufgrund technischer Probleme, nicht ausgewertet werden konnte, wurde diese Versuchsperson ersetzt (VP31 bis VP37). Die ausgeschlossene Versuchsperson ist in Tabelle 27 der Spalte ganz rechts zu entnehmen.

Tabelle 27. Rotationsschema der Voruntersuchung. CTL = Kontrollbedingung, CSH = Context-Sensitive Help, AUT = Automation, SCH = Scheduling, CUV = Visual Cueing, DEC = Decluttering, CUA = Auditory Cueing

	Testphase B			Testphase BA			Testphase A			Testphase M	
VP01	CTL	CSH	AUT	CTL	SCH	-	CTL	CUV	DEC	CTL	CUA
VP02	CSH	AUT	CTL	SCH	CTL	-	CTL	CUV	DEC	CUA	CTL
VP03	AUT	CTL	CSH	CTL	SCH	-	CTL	CUV	DEC	CTL	CUA
VP04	CTL	CSH	AUT	SCH	CTL	-	CUV	DEC	CTL	CUA	CTL
VP05	CSH	AUT	CTL	CTL	SCH	-	CUV	DEC	CTL	CTL	CUA
VP06	AUT	CTL	CSH	SCH	CTL	-	CUV	DEC	CTL	CUA	CTL
VP07	CTL	CSH	AUT	CTL	SCH	-	DEC	CTL	CUV	CTL	CUA
VP08	CSH	AUT	CTL	SCH	CTL	-	DEC	CTL	CUV	CUA	CTL
VP09	AUT	CTL	CSH	CTL	SCH	-	DEC	CTL	CUV	CTL	CUA
VP10	CTL	CSH	AUT	SCH	CTL	-	CTL	CUV	DEC	CUA	CTL
VP11	CTL	CUV	DEC	CSH	AUT	CTL	CTL	SCH	-	CTL	CUA
VP12	CTL	CUV	DEC	AUT	CTL	CSH	SCH	CTL	-	CUA	CTL
VP13	CUV	DEC	CTL	CTL	CSH	AUT	CTL	SCH	-	CTL	CUA
VP14	CUV	DEC	CTL	CSH	AUT	CTL	SCH	CTL	-	CUA	CTL
VP15	CUV	DEC	CTL	AUT	CTL	CSH	CTL	SCH	-	CTL	CUA
VP16	DEC	CTL	CUV	CTL	CSH	AUT	SCH	CTL	-	CUA	CTL
VP17	DEC	CTL	CUV	CSH	AUT	CTL	CTL	SCH	-	CTL	CUA
VP18	DEC	CTL	CUV	AUT	CTL	CSH	SCH	CTL	-	CUA	CTL
VP19	CTL	CUV	DEC	CTL	CSH	AUT	CTL	SCH	-	CTL	CUA
VP20	CTL	CUV	DEC	CSH	AUT	CTL	SCH	CTL	-	CUA	CTL
VP21	CTL	SCH	-	CTL	CUV	DEC	AUT	CTL	CSH	CTL	CUA
VP22	SCH	CTL	-	CUV	DEC	CTL	CTL	CSH	AUT	CUA	CTL
VP23	CTL	SCH	-	CUV	DEC	CTL	CSH	AUT	CTL	CTL	CUA
VP24	SCH	CTL	-	CUV	DEC	CTL	AUT	CTL	CSH	CUA	CTL
VP25	CTL	SCH	-	DEC	CTL	CUV	CTL	CSH	AUT	CTL	CUA
VP26	SCH	CTL	-	DEC	CTL	CUV	CSH	AUT	CTL	CUA	CTL
VP27	CTL	SCH	-	DEC	CTL	CUV	AUT	CTL	CSH	CTL	CUA
VP28	SCH	CTL	-	CTL	CUV	DEC	CTL	CSH	AUT	CUA	CTL
VP29	CTL	SCH	-	CUV	DEC	CTL	CSH	AUT	CTL	CTL	CUA
VP30	SCH	CTL	-	DEC	CTL	CUV	AUT	CTL	CSH	CUA	CTL
VP31	CTL	CSH	AUT	CTL	SCH	-	CTL	CUV	DEC	CTL	CUA
VP32	CTL	CUV	DEC	AUT	CTL	CSH	CTL	SCH	-	CTL	CUA
VP33	CTL	SCH	-	CTL	CUV	DEC	AUT	CTL	CSH	CTL	CUA
VP34	AUT	CTL	CSH	SCH	CTL	-	CTL	CUV	DEC	CUA	CTL
VP35	CTL	CUV	DEC	AUT	CTL	CSH	SCH	CTL	-	CUA	CTL
VP36	SCH	CTL	-	DEC	CTL	CUV	AUT	CTL	CSH	CUA	CTL
VP37	SCH	CTL	-	DEC	CTL	CUV	AUT	CTL	CSH	CUA	CTL

A.3 Einverständniserklärung



Einverständniserklärung

Sehr geehrte Versuchsteilnehmerin, sehr geehrter Versuchsteilnehmer,

vielen Dank, dass Sie sich bereit erklärt haben, an unserer Untersuchung teilzunehmen.

Bitte lesen Sie sich die folgenden Informationen aufmerksam durch. Wenn Sie noch Fragen haben, beantworten wir Ihnen diese gerne.

- Die Teilnahme an der Untersuchung ist freiwillig. Durch eine Verweigerung der Teilnahme werden Ihnen keine Nachteile entstehen. Die Teilnahme kann außerdem jederzeit ohne Nennung von Gründen abgebrochen werden, ohne dass Ihnen Nachteile entstehen.
- Die Untersuchung wird ausschließlich zu wissenschaftlichen Zwecken durchgeführt. Die aufgezeichneten Daten werden in keiner Weise zu einer Bewertung Ihrer Person verwendet.
- Die Erhebung und Datenauswertung erfolgt anonym. Für die Erhebung der Daten wird Ihnen eine Probandennummer zugeteilt, die bei allen Fragebögen und Tests angegeben wird.
- Die beabsichtigte Bekanntgabe des Untersuchungsergebnisses wird keine Einzeldaten enthalten und keinen Rückschluss auf Einzelpersonen zulassen.
- Die aufgezeichneten Daten (inkl. Videomaterial) sind nur den an der Untersuchung beteiligten Mitarbeitern des FKIE zugänglich.

Ich habe die vorliegenden Informationen zur Kenntnis genommen und wurde über Sinn und Zweck der Untersuchung informiert. Mit der Teilnahme an der Untersuchung und der Aufzeichnung meiner Daten unter den oben genannten Bedingungen bin ich einverstanden.

Datum

Nachname, Vorname

Unterschrift

A.4 Pre-Test-Fragebogen

Alle Fragen wurden einzeln elektronisch dargereicht. Zu jeder Frage gehörte ein Kommentarfeld für Anmerkungen. Die Eingabe wurde mittels einer „Weiter“-Schaltfläche bestätigt.

Guten Tag,

im Folgenden möchten wir Ihnen gerne einige Fragen zu Ihrem aktuellen Befinden sowie zu weiteren Faktoren stellen, die die Leistungsfähigkeit beeinflussen können. Ihre Angaben werden selbstverständlich anonym behandelt. Sie werden lediglich für die statistische Auswertung verwendet. Es werden keine Rückschlüsse auf Ihre Person gezogen.

Wie bewerten Sie den Grad Ihrer Müdigkeit?

sehr gering			gering			mittel			hoch			sehr hoch		
<input type="checkbox"/>														

Wie hoch ist Ihre Motivation, bei der Untersuchung eine gute Leistung zu erzielen?

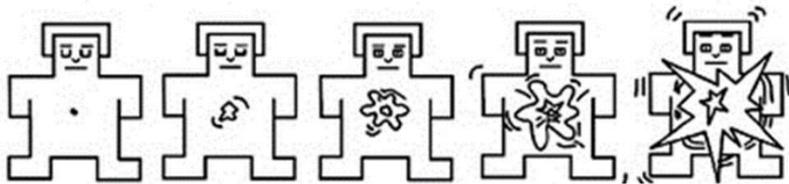
sehr gering			gering			mittel			hoch			sehr hoch		
<input type="checkbox"/>														

Wie beurteilen Sie Ihren Gefühlszustand?



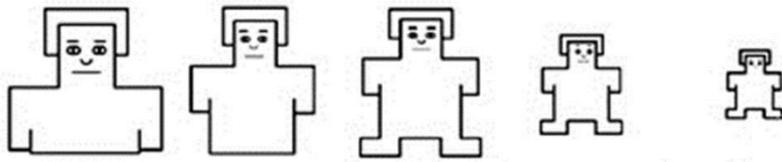
sehr schlecht			schlecht			mittel			gut			sehr gut		
<input type="checkbox"/>														

Wie beurteilen Sie Ihren Erregungszustand?



sehr gering			gering			mittel			hoch			sehr hoch		
<input type="checkbox"/>														

Wie beurteilen Sie Ihr Gefühl der Dominanz und Kontrolle?



sehr hoch			hoch			mittel			gering			sehr gering		

Bitte geben Sie ihr Alter an: _____

Bitte geben Sie ihr Geschlecht an:

<input type="checkbox"/>	Männlich
<input type="checkbox"/>	Weiblich

Wie gut kennen Sie sich mit Computerspielen (Simulations- oder Strategiespiele) aus?

<input type="checkbox"/>	Gar nicht
<input type="checkbox"/>	Ein wenig
<input type="checkbox"/>	Gut
<input type="checkbox"/>	Sehr gut

A.5 Instruktion

Liebe(r) Versuchsteilnehmer(in),

vielen Dank für Ihre Bereitschaft, an unserem Versuch teilzunehmen!

In diesem Experiment möchten wir untersuchen, ob die von uns entwickelte Methode zur Nutzerzustandsdiagnose in der Lage ist, Zustandsveränderungen beim Menschen, die sich aus der Interaktion mit einem technischen System ergeben, korrekt zu erkennen.

Im Sinne eines adaptiven Systems werden die Funktionsweise und das Verhalten des technischen Systems bedarfsgerecht angepasst, um kritischen Nutzerzuständen entgegenzuwirken. Dazu werden situationsbedingt verschiedene Adaptierungen dynamisch ausgelöst und unterstützen den Nutzer bei der Bearbeitung der Aufgabe, wenn das System dies anhand der Diagnoseergebnisse für nötig erachtet.

Für die Diagnose kritischer Nutzerzustände verwenden wir in diesem Experiment als physiologische Sensoren einen Eyetracker und einen Brustgurt. Mit dem Eyetracker werden Blickbewegungen sowie die Pupillenweite erfasst. Mit dem Brustgurt werden verschiedene Vitalfunktionen, wie die Herzrate, die Atmungsrate, die Neigung des Oberkörpers und die Körpertemperatur aufgezeichnet, die als Indikatoren für Nutzerzustände herangezogen werden können. Weiterhin werden Merkmale der Aufgabe und verhaltensbasierte Maße (Mausclicks, Dauer der Aufgabebearbeitung) von der Diagnosekomponente erfasst und ausgewertet.

Der Ablauf der Untersuchung gliedert sich folgendermaßen:

- Einweisung in die Aufgabe
- Fragebogen zur Person und zum momentanen Befinden
- Anpassen und Kalibrieren der physiologischen Sensoren
- Übungsszenario
- Versuchsdurchführung mit Bearbeitung von vier Szenarien (insg. 70 Minuten + Fragebögen nach jeder Versuchsbedingung)

Insgesamt wird die Untersuchungsdauer ca. 2 Stunden und 15 Minuten betragen.

Viel Spaß und viel Erfolg!

WICHTIG!

**Bitte andere Kollegen nicht über die Inhalte des Experiments informieren!
Für uns ist es wichtig, dass die Versuchsteilnehmer den Szenarioverlauf vorher nicht kennen.**

Danke!

Beschreibung der Experimentalaufgabe

Bei der Experimentalaufgabe übernehmen Sie die Rolle eines Marineoperators, der Luftkontakte („Tracks“) auf einem simulierten Radarbildschirm („Tactical Display Area“, kurz: TDA) überwacht. Die Aufgabe beinhaltet verschiedene Teilaufgaben, die im Folgenden kurz erläutert werden. Wie diese Aufgaben ausgeführt werden können, wird Ihnen während des Übungsszenarios gezeigt.

Für die Bearbeitung der Aufgaben steht unterschiedlich viel Zeit zur Verfügung.

Identifizierung (30 Sek.)

Noch nicht identifizierte Kontakte erscheinen als gelbe Symbole auf der TDA. Diese müssen anhand von ID-Kriterien (siehe 2. Blatt) als „friend“ (freundlich), „hostile“ (feindlich), oder „neutral“ (zivil) identifiziert werden. Ändern bereits identifizierte Kontakte ihr Verhalten, so dass dies eine Änderung ihrer Identität notwendig macht, müssen diese unidentifiziert werden.

Anlegen von NRT-Tracks (30 Sek.)

Von Zeit zu Zeit müssen sogenannte „Non real-time tracks“ (NRTTs) manuell auf der TDA angelegt werden. Dies wird durch einen Briefumschlag im Fenster links unten auf dem Bildschirm angezeigt. Bei Klick auf den Briefumschlag erscheinen Informationen, die für das Anlegen des NRTT benötigt werden (Identität, Koordinaten, Geschwindigkeit, Höhe, Flugrichtung). Das Anlegen eines NRTT-Tracks wird im Rahmen eines Trainingsszenarios erläutert.

Warnung (20 Sek.)

Kontakte, die „hostile“ (also feindlich) sind, müssen durch Drücken der entsprechenden Schaltfläche gewarnt werden, sobald sie in die Sicherheitszone („Identification Safety Range“, kurz: ISR) des Eigenschiffs eindringen. Diese ist auf der TDA durch einen blauen Kreis kenntlich gemacht.

Bekämpfung (10 Sek.)

„hostile“-Kontakte, die trotz Warnung auf das Eigenschiff zufliegen, müssen durch Drücken des „Fire“-Buttons bekämpft werden, sobald sie in die Weapon Range (WR) eindringen. Die Weapon Range ist auf der TDA durch einen roten Kreis kenntlich gemacht. Sollte der Kontakt trotz Bekämpfung bestehen bleiben, bitte nochmals den Track auswählen und den „Fire“-Button drücken.

Priorität der Aufgaben

Wenn mehrere Aufgaben zur gleichen Zeit bearbeitet werden müssen, sollte die Aufgaben mit höchster Priorität zuerst bearbeitet werden.

1. Bekämpfung
2. Warnung
3. Identifizieren von Kontakten innerhalb der ISR und WR
4. Anlegen von NRTT
5. Identifizierung von Kontakten außerhalb der ISR und WR

Höchste Priorität



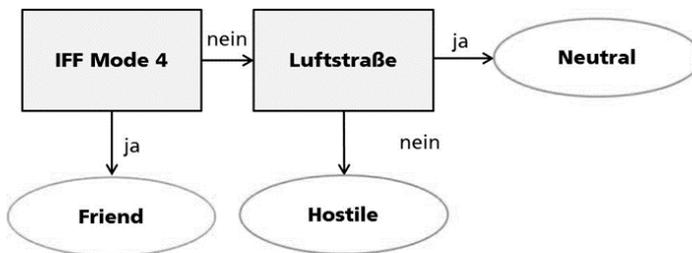
Niedrigste Priorität

ID-Kriterien

Kriterien für die Identifizierung:

- IFF-Mode
- Luftstraßenkonformität

Vorgehen bei der Identifizierung:



A.6 Beschreibung der Adaptierungsstrategien

Vor jeder Testphase (hier als Teilexperiment bezeichnet) wurde nur die zugehörige Instruktion dargereicht.

Teilexperiment 1

Im folgenden Szenario kann das System den Nutzer durch folgende Adaptierungsstrategien unterstützen, wenn es auf Basis der Diagnose Unterstützungsbedarf feststellt:

- **Automatisierte Identifizierung:** Bei hoher Beanspruchung übernimmt das System die Identifizierung bestimmter Tracks. Automatisiert identifizierte Tracks werden durch ein *Badge* mit dem Buchstaben A gekennzeichnet. Der Nutzer sollte die Identität manuell bestätigen, sobald sein Beanspruchungsgrad es zulässt. Wurde die Identität bestätigt, verschwindet das Badge.



- **Hinweis auf die durchzuführende Aufgabe:** Bei stockender Aufgabenbearbeitung weist ein gelber Balken unter dem Track auf den durchzuführenden Arbeitsschritt hin.



Teilexperiment 2

Im folgenden Szenario kann das System den Nutzer durch folgende Adaptierungsstrategien unterstützen, wenn es auf Basis der Diagnose Unterstützungsbedarf feststellt:

- **Sequenzielle Darstellung der Aufgaben:** Aufgaben werden nacheinander statt gleichzeitig dargeboten.

Teilexperiment 3

Im folgenden Szenario kann das System den Nutzer durch folgende Adaptierungsstrategien unterstützen, wenn es auf Basis der Diagnose Unterstützungsbedarf feststellt:

- **Hinweis auf Aufgabe mit hoher Priorität:** Ein roter Pfeil führt vom Mauszeiger zu der wichtigsten Aufgabe.
- **Ablenkung durch „Clutter“ verringern:** Die Auffälligkeit von Tracks ohne Aufgaben wird durch halbtransparente Darstellung reduziert.

Teilexperiment 4

Im folgenden Szenario kann das System den Nutzer durch folgende Adaptierungsstrategien unterstützen, wenn es auf Basis der Diagnose Unterstützungsbedarf feststellt:

- Ein **Hinweiston** macht den Nutzer auf das Vorhandensein einer Aufgabe aufmerksam, wenn diese nicht rechtzeitig wahrgenommen wird.

A.7 Post-Test-Fragebögen

Alle Fragen wurden einzeln elektronisch dargereicht. Zu jeder Frage gehörte ein Kommentarfeld für Anmerkungen. Die Eingabe wurde mittels einer „Weiter“-Schaltfläche bestätigt.

Wie sehr mussten Sie sich anstrengen, um die gestellten Aufgaben zu erfüllen?

sehr wenig			wenig			mittel			stark			sehr stark		

Wie bewerten Sie den Grad Ihrer Müdigkeit?

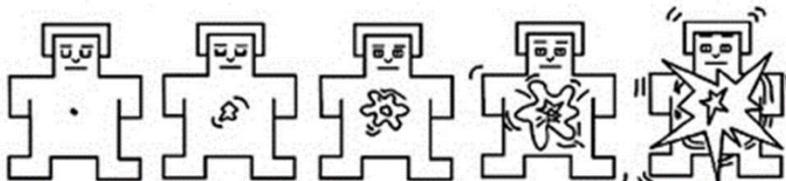
sehr gering			gering			mittel			hoch			sehr hoch		

Wie beurteilen Sie Ihren Gefühlszustand?



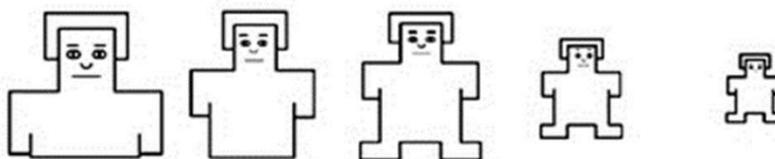
sehr schlecht			schlecht			mittel			gut			sehr gut		

Wie beurteilen Sie Ihren Erregungszustand?



sehr gering			gering			mittel			hoch			sehr hoch		

Wie beurteilen Sie Ihr Gefühl der Dominanz und Kontrolle?



sehr hoch			hoch			mittel			gering			sehr gering		

Zusätzliche Fragen in allen Adaptierungsbedingungen

Wie oft ist die Adaptierungsstrategie „XY“ aufgetreten (geschätzt)? _____

Wie hilfreich oder störend haben Sie die Adaptierungsstrategie empfunden?

sehr hilfreich			etwas hilfreich			weder hilfreich noch störend			etwas störend			sehr störend			Keine Adaptierung aufgetreten		

Welchen Effekt hatte die Adaptierungsstrategie auf meine Leistung bei der Aufgabenbearbeitung? Meine Leistung wurde durch die Adaptierung...

stark erhöht			etwas erhöht			nicht beeinflusst			etwas reduziert			stark reduziert			Keine Adaptierung aufgetreten		

War der Zeitpunkt des Auftretens der Adaptierung angemessen?

völlig angemessen			eher angemessen			eher unangemessen			völlig unangemessen			Keine Adaptierung aufgetreten		

Wie angemessen war die Dauer der Adaptierung?

völlig angemessen			eher angemessen			eher unangemessen			völlig unangemessen			Keine Adaptierung aufgetreten		

Wie könnte die Adaptierung verbessert werden? _____

Haben Sie weitere Anmerkungen/Vorschläge/Ideen? _____

Zusätzliche Frage in Testphase 1

Welchen Effekt hatte die Adaptierungsstrategie auf meine Beanspruchung?
 Meine Beanspruchung wurde durch die Adaptierung...

stark erhöht			etwas erhöht			nicht beeinflusst			etwas reduziert			stark reduziert			Keine Adaptierung aufgetreten		
<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>															

Zusätzliche Fragen in Testphase 2

Welchen Effekt hatte die Adaptierungsstrategie auf meine Beanspruchung?
 Meine Beanspruchung wurde durch die Adaptierung...

stark erhöht			etwas erhöht			nicht beeinflusst			etwas reduziert			stark reduziert			Keine Adaptierung aufgetreten		
<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>															

Welchen Effekt hatte die Adaptierungsstrategie auf meine Aufmerksamkeit?
 Meine Aufmerksamkeit wurde durch die Adaptierung...

stark erhöht			etwas erhöht			nicht beeinflusst			etwas reduziert			stark reduziert			Keine Adaptierung aufgetreten		
<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>															

Zusätzliche Frage in Testphase 3

Welchen Effekt hatte die Adaptierungsstrategie auf meine Aufmerksamkeit?
 Meine Aufmerksamkeit wurde durch die Adaptierung...

stark erhöht			etwas erhöht			nicht beeinflusst			etwas reduziert			stark reduziert			Keine Adaptierung aufgetreten		
<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>															

Zusätzliche Frage in Testphase 4

Welchen Effekt hatte die Adaptierungsstrategie auf meine Müdigkeit?
 Meine Müdigkeit wurde durch die Adaptierung...

stark erhöht			etwas erhöht			nicht beeinflusst			etwas reduziert			stark reduziert			Keine Adaptierung aufgetreten		
<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>															

A.8 Versuchsprotokoll

Versuchsprotokoll

Datum: _____

Probandennummer: _____

Uhrzeit: _____

Übungsszenario

Beginn: _____

Ende: _____

1. Versuchsszenario

Beginn: _____

Ende: _____

Bedingung: _____

2. Versuchsszenario

Beginn: _____

Ende: _____

Bedingung: _____

3. Versuchsszenario

Beginn: _____

Ende: _____

Bedingung: _____

4. Versuchsszenario

Beginn: _____

Ende: _____

Bedingung: Müdigkeit

Anhang B. Ergebnisse der Voruntersuchung

B.1 Ergebnisse der Testphase B

Die Adaptierungsstrategie „Context-Sensitive Help“ wurde insgesamt 105 Mal und bei 27 der 30 Probanden aktiviert. Die Adaptierungsstrategie „Automation“ trat insgesamt 89 Mal bei 22 der 30 Probanden auf. Tabelle 28 zeigt statistische Kennzahlen für die Fälle, in denen Adaptierungen ausgelöst wurden. Context-Sensitive Help wurde von nur 20 Probanden bemerkt, Automation bemerkten alle Probanden bei denen die Strategie auftrat.

Die Diagnosekomponente diagnostizierte durchschnittlich 13.5 Mal pro Proband ($SD = 6.4$) und 22.2% ($SD = 14.3$) der Gesamtzeit kritisch hohe Beanspruchung. Der zeitliche Anteil kritisch hoher Beanspruchung unterschied sich, wie erwartet, nicht signifikant von der Testphase BA, welche die gleiche Aufgabendichte aufwies wie die Testphase B. Der zeitliche Anteil kritisch hoher Beanspruchung war jedoch signifikant höher als in den Testphasen A und M, in denen keine hohe Beanspruchung induziert wurde (Tabelle 29).

Ein Manipulationscheck mit den subjektiven Maßen bestätigt die erfolgreiche Induktion, denn auch die empfundene Anstrengung war in der Testphase B signifikant höher als in den Testphasen, in denen keine Beanspruchung induziert wurde. Bei der Frage nach der subjektiven Beanspruchung am Ende der Testphase B gaben 31% der Probanden an, dass sie sich stark oder sehr stark anstrengen mussten.

Tabelle 28. Auslösung von Adaptierungsstrategien in Testphase B

	Median	M	SD	Min	Max
Context-Sensitive Help ($n = 27$)					
Anzahl	2.50	3.50	3.00	0.00	11.00
Kumulierte Dauer (in s)	33.00	51.07	55.45	0.00	224.00
Durchschnittliche Dauer (in s)	11.50	13.82	10.15	0.00	44.80
Automation ($n = 22$)					
Anzahl	2.00	2.93	2.91	0.00	12.00
Kumulierte Dauer (in s)	21.00	31.97	41.69	0.00	155.00
Durchschnittliche Dauer (in s)	8.47	10.24	7.54	0.00	31.00

Tabelle 29. Vergleich des zeitlichen Anteils kritisch hoher Beanspruchung und der subjektiven Anstrengung zwischen Testphase B und den übrigen Testphasen

Testphase	zeitl. Anteil kritisch hoher Beanspr. (%)	Ergebnisse der Teststatistik		subjektive Anstrengung	Ergebnisse der Teststatistik	
	$M (SD)$	$t(29)$	$p (r)$	$M (SD)$	$t(29)$	$p (r)$
B	22.2 (14.3)	-	-	8.13 (2.16)	-	-
BA	28.4 (17.6)	-1.26	.219 (.23)	8.15 (3.00)	-.041	.967 (<.01)
A	6.7 (7.0)	7.07	< .001 (.80)	6.17 (2.13)	5.55	< .001 (.71)
M	1.0 (2.5)	7.82	< .001 (.82)	3.42 (2.81)	7.90	< .001 (.83)

B.1.1 Wirkung auf den subjektiven Nutzerzustand

Auf einer Skala von 1 bis 15 bewerteten die Probanden subjektiv ihre Anstrengung und Müdigkeit. Im Durchschnitt gaben sie an, sich stärker anstrengen zu müssen, wenn die Adaptierungen aktiv waren (Tabelle 30, oben). Für Context-Sensitive Help wurde der Effekt statistisch marginal signifikant. Der subjektive Grad der Müdigkeit unterschied sich zwischen Context-Sensitive Help und der Kontrollbedingung kaum. Mit aktiver Automationsstrategie wurde die Müdigkeit jedoch niedriger bewertet (Tabelle 30, unten). Dieser Unterschied war signifikant.

Tabelle 30. Subjektive Bewertung von Anstrengung und Müdigkeit im Vergleich zur Kontrollbedingung in der Testphase B

	Median	M (SD)	t/z	p (r)
Subjektive Anstrengung				
Kontrollbedingung (N = 30)	8	8.07 (2.16)	-	-
Context-Sensitive Help (n = 27)	8	8.48 (2.24)	z = -1.76	.079 (.24)
Automation (n = 22)	9	8.55 (1.92)	t(21) = -.33	.744 (.07)
Subjektive Müdigkeit				
Kontrollbedingung (N = 30)	6	6.43 (2.49)	-	-
Context-Sensitive Help (n = 27)	6	6.48 (2.53)	z = -1.39	.166 (.19)
Automation (n = 22)	6	5.82 (2.54)	z = -2.37	.018 (.36)

Anmerkungen: Bewertung der Nutzerzustandsdimensionen auf einer Skala von 1 bis 15. Der Ausschluss von Beobachtungen ohne Adaptierungen führte zu Abweichungen der Stichprobengrößen.

B.1.2 Subjektive Beurteilung der Adaptierungsstrategien

Die Mehrheit der Probanden empfand die Adaptierungsstrategien dieser Testphase als hilfreich (Context-Sensitive Help: 60.0%, Automation 72.7% (Abbildung 58, oben). Jeweils zwei Probanden (10.0% bzw. 9.1%) fanden die Strategien etwas oder sehr störend. Auch der Einfluss auf die Leistung wurde überwiegend positiv bewertet. Sechzig Prozent der Probanden gaben an, dass Context-Sensitive Help ihre Leistung erhöht hat, bei Automation waren es 81.8% (Abbildung 58, Mitte).

Der subjektive Einfluss auf die Beanspruchung war weniger deutlich positiv ausgeprägt. Dreißig Prozent der Probanden fanden, dass Context-Sensitive Help die Beanspruchung reduzierte (Abbildung 58, unten). Jeder Fünfte empfand die Strategie als störend. Die Hälfte der Probanden gab an, dass die Strategie keinen Einfluss auf ihre Beanspruchung hatte. Bezüglich der Automationsstrategie empfand knapp die Hälfte der Probanden (45.5%) die Strategie als beanspruchungssenkend, während knapp jeder fünfte Proband (18.2%) angab, dass die Strategie die Beanspruchung erhöht hat.

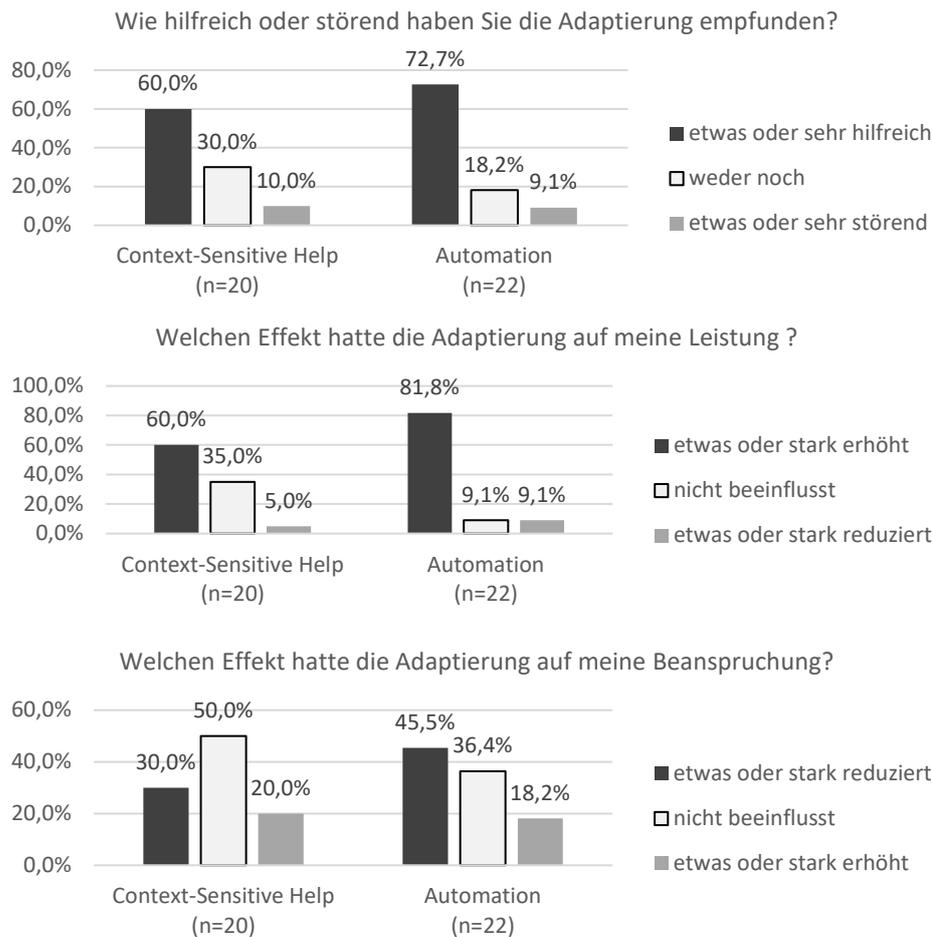


Abbildung 58. Subjektive Beurteilung der Adaptierungen in der Testphase B

B.2 Ergebnisse der Testphase BA

Die Adaptierungsstrategie Scheduling wurde insgesamt 73 Mal und bei 19 der 30 Probanden aktiviert. Tabelle 31 zeigt statistische Kennzahlen für die Fälle, in denen Scheduling ausgelöst wurde. Das Auftreten von Scheduling war für die Probanden schwer erkennbar, da die Strategie lediglich die Darstellung von Aufgaben verzögerte, jedoch optisch nicht offenkundig war. Nur 10 der 19 Probanden, bei denen Scheduling auftrat, gaben an, das Auftreten der Strategie bemerkt zu haben.

Tabelle 31. Auslösung von Scheduling in Testphase BA

	Median	M	SD	Min	Max
Anzahl	3.00	3.84	2.67	1.00	11.00
Kumulierte Dauer (in s)	20.00	24.53	21.39	1.00	78.00
Durchschnittliche Dauer (in s)	5.00	6.42	5.31	1.00	23.00

Anmerkung: n = 19.

Die Diagnosekomponente diagnostizierte durchschnittlich 9.3 Mal pro Proband ($SD = 4.2$) und 28.4% der Gesamtzeit kritische Beanspruchung. Der zeitliche Anteil kritisch hoher Beanspruchung war damit signifikant höher als in den Testphasen A und M, jedoch

erwartungsgemäß nicht höher als in Testphase B, welche die gleiche Aufgabendichte aufwies (Tabelle 32).

Ein Manipulationscheck mit einem Vergleich der subjektiven Anstrengung bestätigt die erfolgreiche Induktion von Beanspruchung. Die subjektiv empfundene Anstrengung war ebenfalls signifikant höher als in den Testphasen A und M. Nutzer gaben bei 21 der insgesamt 60 Phasen an, dass sie sich stark oder sehr stark anstrengen mussten.

Falsch gerichtete Aufmerksamkeit wurde im Durchschnitt 15.9 Mal pro Proband ($SD = 4.8$) und 56.6% ($SD = 21.4$) der Gesamtzeit diagnostiziert. Der zeitliche Anteil war damit signifikant höher als in den Testphasen A und M, jedoch nicht höher als in der Testphase B (*Anmerkung*: Bewertung der Nutzerzustandsdimensionen auf einer Skala von 1 bis 15.

Tabelle 33), obwohl nur bei der Testphase A falsche Aufmerksamkeit induziert werden sollte, bei der Testphase B jedoch nicht.

Tabelle 32. Vergleich des zeitlichen Anteils kritisch hoher Beanspruchung und der subjektiven Anstrengung zwischen Testphase BA und den übrigen Testphasen

Testphase	zeitl. Anteil kritisch hoher Beanspr. (%)	Ergebnisse der Teststatistik		subjektive Anstrengung	Ergebnisse der Teststatistik	
	$M (SD)$	$t(29)$	$p (r)$	$M (SD)$	$t(29)$	$p (r)$
B	22.2 (14.3)	1.26	.219 (.22)	8.13 (2.16)	.041	.967 (<.01)
BA	28.4 (17.6)	-	-	8.15 (3.00)	-	-
A	6.7 (7.0)	5.70	<.001 (.73)	6.17 (2.13)	4.05	<.001 (.60)
M	1.0 (2.5)	8.42	<.001 (.84)	3.42 (2.81)	8.08	<.001 (.83)

Anmerkung: Bewertung der Nutzerzustandsdimensionen auf einer Skala von 1 bis 15.

Tabelle 33. Vergleich des zeitlichen Anteils falsch gerichteter Aufmerksamkeit zwischen den verschiedenen Testphasen und Testphase BA

Testphase	zeitlicher Anteil mit falsch gerichteter Aufmerksamkeit in %	Ergebnisse der Teststatistik	
	$M (SD)$	$t(29)$	$p (r)$
B	47.0 (21.8)	1.81	.081 (.31)
BA	56.6 (21.4)	-	-
A	21.8 (19.8)	6.69	<.001 (.78)
M	1.2 (2.0)	14.55	<.001 (.94)

B.2.1 Wirkung auf den subjektiven Nutzerzustand

Wenn Scheduling aktiv war, gaben die Probanden auf einer Skala von 1 bis 15 im Durchschnitt an, sich stärker anstrengen zu müssen als in der Kontrollbedingung. Dieser Unterschied wurde jedoch statistisch nicht signifikant. Ihre Müdigkeit bewerteten die Probanden mit Scheduling allerdings signifikant höher als in der Kontrollbedingung (Tabelle 34).

Tabelle 34. Subjektive Bewertung von Anstrengung und Müdigkeit im Vergleich zur Kontrollbedingung in der Testphase BA

	<i>Median</i>	<i>M (SD)</i>	<i>t/z</i>	<i>p (r)</i>
Subjektive Anstrengung				
Kontrollbedingung (N = 30)	8	7.93 (3.00)	-	-
Scheduling (n = 19)	9	8.63 (2.79)	$t(18) = -1.41$.174 (.32)
Subjektive Müdigkeit				
Kontrollbedingung (N = 30)	6	6.23 (2.29)	-	-
Scheduling (n = 19)	7	7.47 (2.46)	$z = -2.326$.020 (.38)

Anmerkungen: Bewertung der Nutzerzustandsdimensionen auf einer Skala von 1 bis 15. Der Ausschluss von Beobachtungen ohne Adaptierungen führte zu Abweichungen der Stichprobengrößen.

B.2.2 Subjektive Beurteilung der Adaptierungsstrategie

Die Mehrheit der Probanden, bei denen die Strategie auftrat und auch bemerkt wurde (50%), empfand die Adaptierungsstrategie Scheduling weder hilfreich noch störend (Abbildung 59, oben). Vier Probanden (40%) empfanden sie als etwas oder sehr hilfreich, einer (10%) empfand sie als störend. Die gleiche Verteilung zeigt sich bei der subjektiven Einschätzung des Effekts auf die Leistung bei der Aufgabenbearbeitung (Abbildung 59, 2. v. o.). Hier empfanden vier Versuchspersonen, bei denen die Strategie auftrat und bemerkt wurde (40%), diese als etwas oder sehr hilfreich, eine empfand sie als störend (10%). Die Hälfte der Probanden gab jedoch an, dass die Leistung von der Strategie nicht beeinflusst wurde.

Bei der Bewertung des Einflusses auf die Beanspruchung (Abbildung 59, 2. v. u.) zeigte sich erneut die gleiche Verteilung. Ein Proband (10%), bei dem die Strategie auftrat, empfand dadurch erhöhte Beanspruchung, vier Probanden (40%) gaben an, dass die Beanspruchung sich reduziert habe. Die Hälfte der Probanden gab an, keinen Effekt auf die Beanspruchung wahrgenommen zu haben.

In Bezug auf die Aufmerksamkeit gaben nur zwei Probanden (20%) an, dass Scheduling förderlich für die Ausrichtung der Aufmerksamkeit war (Abbildung 59, unten). Die Hälfte der Probanden fand, dass Scheduling die Ausrichtung der Aufmerksamkeit nicht beeinflusst hat. Drei von zehn Probanden gaben an, eine Verschlechterung der Ausrichtung der Aufmerksamkeit erfahren zu haben.

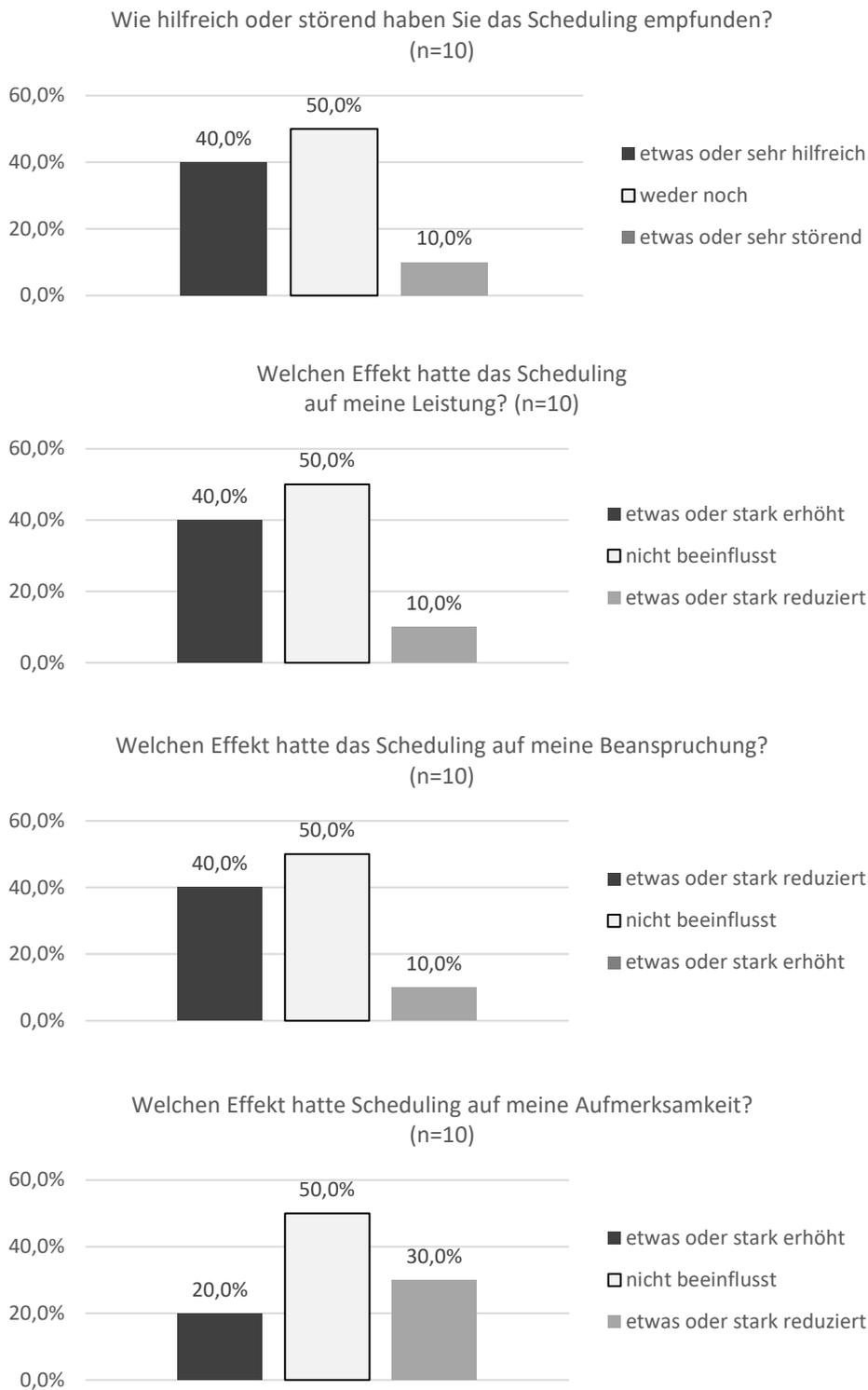


Abbildung 59. Subjektive Beurteilung des Scheduling bzgl. (von oben nach unten) Nützlichkeit, Leistung, Beanspruchung und Aufmerksamkeit

B.3 Ergebnisse der Testphase A

Die Adaptierungsstrategie Visual Cueing wurde insgesamt 78 Mal und bei 20 der 30 Probanden aktiviert. Die Adaptierungsstrategie Decluttering trat insgesamt 101 Mal bei 25 der 30 Probanden auf. Tabelle 35 zeigt statistische Kennzahlen für die Fälle, in denen Adaptierungen ausgelöst wurden. Achtzehn der 20 Probanden, bei denen Visual Cueing auftrat, bemerkten die Strategie. Fast alle Probanden ($n = 24$) nahmen das Auftreten von Decluttering wahr.

Tabelle 35. Auslösung von Adaptierungsstrategien in Testphase A

	<i>Median</i>	<i>M</i>	<i>SD</i>	<i>Min</i>	<i>Max</i>
Visual Cueing ($n = 20$)					
Anzahl	3.00	3.90	2.57	1.00	9.00
Kumulierte Dauer (in s)	51.50	66.55	66.49	2.00	288.00
Durchschnittliche Dauer (in s)	12.46	21.32	32.77	2.00	144.00
Decluttering ($n = 25$)					
Anzahl	4.00	4.04	2.37	1.00	11.00
Kumulierte Dauer (in s)	53.00	78.28	78.79	3.00	252.00
Durchschnittliche Dauer (in s)	15.50	17.67	14.14	1.50	63.00

Falsch gerichtete Aufmerksamkeit wurde im Durchschnitt 9.8 Mal pro Proband ($SD = 6.0$) und 21.8% der Gesamtzeit diagnostiziert. Der Anteil falsch gerichteter Aufmerksamkeit war damit signifikant niedriger als in den Testphasen mit induzierter Beanspruchung (B und BA), jedoch signifikant höher als in der Testphase M (Tabelle 36).

Tabelle 36. Vergleich des zeitlichen Anteils falsch gerichteter Aufmerksamkeit zwischen Testphase A und den übrigen Testphasen

Testphase	zeitlicher Anteil mit falsch gerichteter Aufmerksamkeit in %	Ergebnisse der Teststatistik	
	<i>M (SD)</i>	<i>t(29)</i>	<i>p (r)</i>
B	47.0 (21.8)	6.177	< .001 (.75)
BA	56.6 (21.4)	6.691	< .001 (.78)
A	21.8 (19.8)	-	-
M	1.2 (2.0)	5.77	< .001 (.73)

B.3.1 Wirkung auf den subjektiven Nutzerzustand

In der Testphase A gaben die Probanden an, dass sie sich bei Vorhandensein der Adaptierungsstrategien etwas mehr anstrengen mussten als in der Kontrollbedingung. Es zeigten sich Mittelwertunterschiede (geringere Müdigkeit mit Adaptierung), aber keiner der Vergleiche für die Zustandsdimensionen wies statistische Signifikanz auf (Tabelle 37).

Tabelle 37. Subjektive Bewertung von Anstrengung und Müdigkeit im Vergleich zur Kontrollbedingung in der Testphase A

	<i>Median</i>	<i>M (SD)</i>	<i>t/z</i>	<i>p (r)</i>
Subjektive Anstrengung				
Kontrollbedingung (N = 30)	6	6.00 (2.03)	-	-
Visual Cueing (n = 20)	6	6.70 (2.34)	$t(19) = -1.12$.275 (.25)
Decluttering (n = 25)	7	6.52 (2.22)	$z = -.94$.348 (.13)
Subjektive Müdigkeit				
Kontrollbedingung (N = 30)	6.5	6.73 (2.21)	-	-
Visual Cueing (n = 20)	6	6.25 (2.12)	$z = -.50$.614 (.08)
Decluttering (n = 25)	6	6.60 (2.36)	$z = -1.24$.216 (.18)

Anmerkungen: Bewertung der Nutzerzustandsdimensionen auf einer Skala von 1 bis 15. Der Ausschluss von Beobachtungen ohne Adaptierungen führte zu Abweichungen der Stichprobengrößen.

B.3.2 Subjektive Beurteilung der Adaptierungsstrategien

Eine deutliche Mehrheit der Probanden (77.8% bei Visual Cueing und 66.7% bei Decluttering) empfand die Adaptierungsstrategien, mit denen falsch gerichtete Aufmerksamkeit adressiert werden sollte, als hilfreich (Abbildung 60, oben). Visual Cueing wurde von einem Probanden (11.1%) als neutral oder störend empfunden, die Decluttering-Strategie fand etwa jeder fünfte Versuchsteilnehmer (20.8%) „etwas störend“, kein Proband empfand sie als „sehr störend“.

Der empfundene Einfluss auf die Leistung war ebenfalls deutlich positiv ausgeprägt. 61.1% der Probanden empfanden die Visual Cueing-Strategie als leistungssteigernd, bei der Decluttering-Strategie waren es 58.3%. Rund jeder sechste Versuchsteilnehmer (16.7%) fand, dass diese Strategien die Leistung „etwas reduziert“ haben (Abbildung 60, Mitte).

Mit den Strategien Visual Cueing und Decluttering sollte die Ausrichtung der Aufmerksamkeit korrigiert werden. Jeweils zwei Drittel der Probanden gaben an, dass sich die Ausrichtung der Aufmerksamkeit durch die Strategien gefühlt verbesserte. Knapp jeder fünfte (22.2% bei Visual Cueing, 20.8% bei Decluttering) Proband empfand durch die Strategie eine Verschlechterung der Aufmerksamkeitsausrichtung (Abbildung 60, unten).

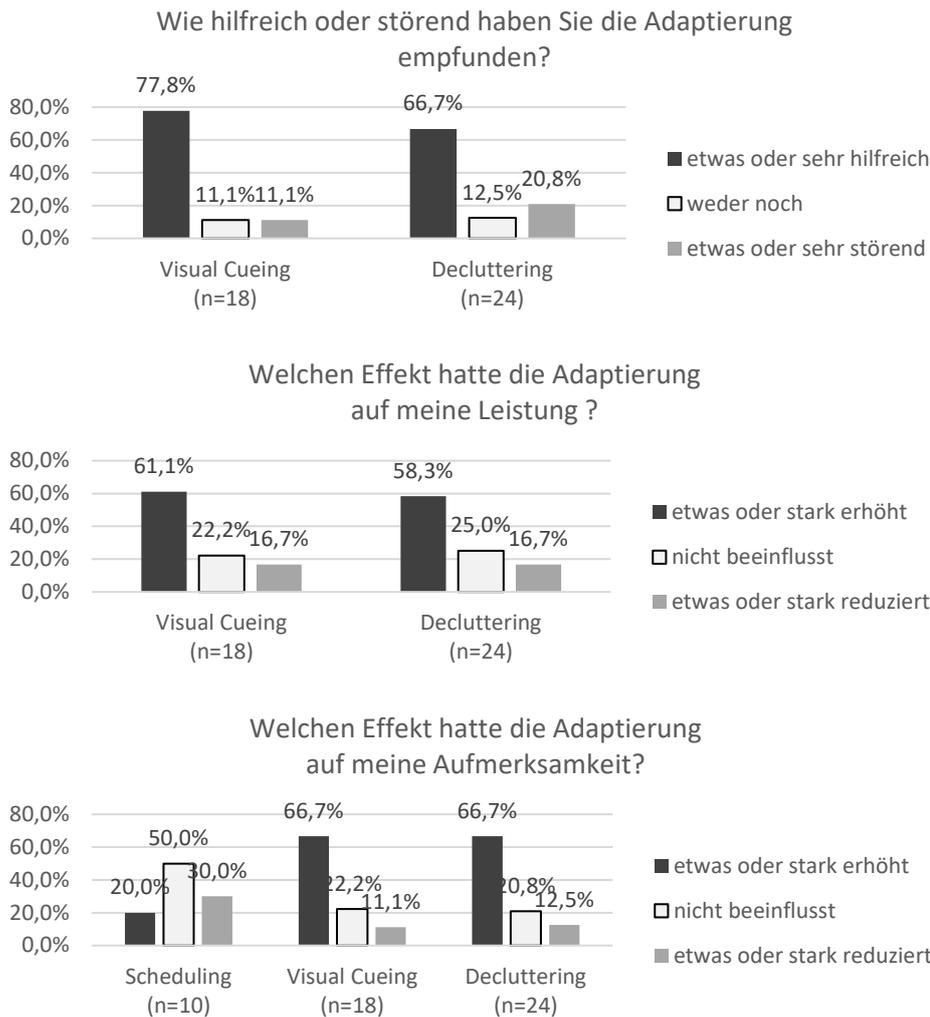


Abbildung 60. Subjektive Beurteilung der Adaptierungen bzgl. Nützlichkeit (oben), Leistung (Mitte) und Aufmerksamkeit (unten)

B.4 Ergebnisse der Testphase M

Die Adaptierungsstrategie Auditory Cueing, mit der die passive aufgabenbezogene Müdigkeit adressiert werden sollte, trat nur bei wenigen Probanden auf ($n = 9$). Trotz subjektiv wahrgenommener hoher Müdigkeit wurde sie nur insgesamt 12 Mal aktiviert. Der Hinweiston wurde von allen Probanden wahrgenommen. Tabelle 38 zeigt statistische Kennzahlen für die Fälle, in denen Adaptierungen ausgelöst wurden.

Tabelle 38. Auslösung von Auditory Cueing in Testphase M

	Median	M	SD	Min	Max
Anzahl	1.00	1.33	0.71	1.00	3.00
Kumulierte Dauer (in s)	5.00	14.44	19.01	1.00	59.00
Durchschnittliche Dauer (in s)	5.00	8.96	9.02	1.00	28.00

Anmerkungen: $n = 9$.

In dieser Testphase wurde passive aufgabenbezogene Müdigkeit im Durchschnitt 13.8 Mal pro Proband ($SD = 4.4$) und 53.5% der Gesamtzeit diagnostiziert. Der Anteil der passiven aufgabenbezogenen Müdigkeit war damit signifikant höher als in allen anderen Testphasen (Tabelle 39). Der erwünschte Nutzerzustand konnte demnach erfolgreich induziert werden.

Tabelle 39. Vergleich des zeitlichen Anteils passiver aufgabenbezogener Müdigkeit zwischen Testphase M und den übrigen Testphasen

Testphase	zeitlicher Anteil mit passiver aufgabenbezogener Müdigkeit in %	Ergebnisse der Teststatistik	
	$M (SD)$	$t(29)$	$p (r)$
B	1.9 (4.1)	11.963	< .001 (.91)
BA	0.4 (1.1)	12.833	< .001 (.92)
A	8.1 (6.8)	10.545	< .001 (.89)
M	53.5 (22.6)	-	-

Ein Manipulationscheck mit den subjektiven Maßen bestätigt die erfolgreiche Induktion. Die subjektive Müdigkeit war signifikant stärker ausgeprägt als in allen anderen Testphasen. Bei 58.3% der Phasen (35 von 60 Phasen) gaben die Probanden hohe oder sehr hohe Müdigkeit an. Die Testphase M wurde auch signifikant weniger anstrengend empfunden als die übrigen Testphasen B (Tabelle 40).

Tabelle 40. Vergleich von subjektiver Anstrengung und subjektiver Müdigkeit zwischen Testphase M und den übrigen Testphasen

Testphase	subjektive Anstrengung	Ergebnisse der Teststatistik		subjektive Müdigkeit	Ergebnisse der Teststatistik	
	$M (SD)$	$t(29)$	$p (r)$	$M (SD)$	$t(29)$	$p (r)$
B	8.13 (2.16)	-7.90	< .001 (.82)	6.32 (2.43)	7.22	< .001 (.80)
BA	8.15 (3.00)	-8.08	< .001 (.83)	6.31 (2.50)	6.69	< .001 (.78)
A	6.17 (2.13)	-4.60	< .001 (.65)	6.54 (2.24)	7.74	< .001 (.82)
M	3.42 (2.81)	-	-	9.85 (2.89)	-	-

B.4.1 Wirkung auf den subjektiven Nutzerzustand

Sowohl Anstrengung als auch Müdigkeit verringerten sich subjektiv im Mittel durch das Auditory Cueing (Tabelle 41). Diese Unterschiede waren jedoch nicht statistisch signifikant.

Tabelle 41. Subjektive Bewertung von Anstrengung und Müdigkeit im Vergleich zur Kontrollbedingung in der Testphase M

	Median	$M (SD)$	t/z	$p (r)$
Subjektive Anstrengung				
Kontrollbedingung ($N = 30$)	2.5	3.23 (2.56)	-	-
Auditory Cueing ($n = 9$)	3	2.67 (1.22)	$t(8) = -1.41$.195 (.25)
Subjektive Müdigkeit				
Kontrollbedingung ($N = 30$)	10	9.73 (2.83)	-	-
Auditory Cueing ($n = 9$)	8	8.89 (2.80)	$t(8) = 1.08$.312 (.20)

Anmerkungen: Bewertung der Nutzerzustandsdimensionen auf einer Skala von 1 bis 15. Der Ausschluss von Beobachtungen ohne Adaptierungen führte zu Abweichungen der Stichprobengrößen.

B.4.2 Subjektive Beurteilung der Adaptierungsstrategie

Die Adaptierungsstrategie Auditory Cueing wurde von über der Hälfte der Probanden (55.6%) als störend empfunden (Abbildung 61, oben). Bezüglich des empfundenen Effekts auf die Leistung gab es beim Auditory Cueing kein klares Bild. Ein Drittel der Probanden empfand die Strategie als leistungssteigernd, ein Drittel bemerkte keinen Effekt auf die Leistung, ein weiteres Drittel fühlte sich durch die Strategie in der Leistung gehemmt (Abbildung 61, Mitte).

Auch wenn die Strategie nicht klar als hilfreich oder leistungssteigernd beurteilt wurde, empfand die Mehrheit der Probanden, dass die Müdigkeit wirksam adressiert wurde. Hier gaben 55.5% der Probanden an, dass ihre Müdigkeit durch das Auditory Cueing reduziert wurde. Nur ein Proband gab an, dass die Strategie seine Müdigkeit erhöhte (Abbildung 61, unten).

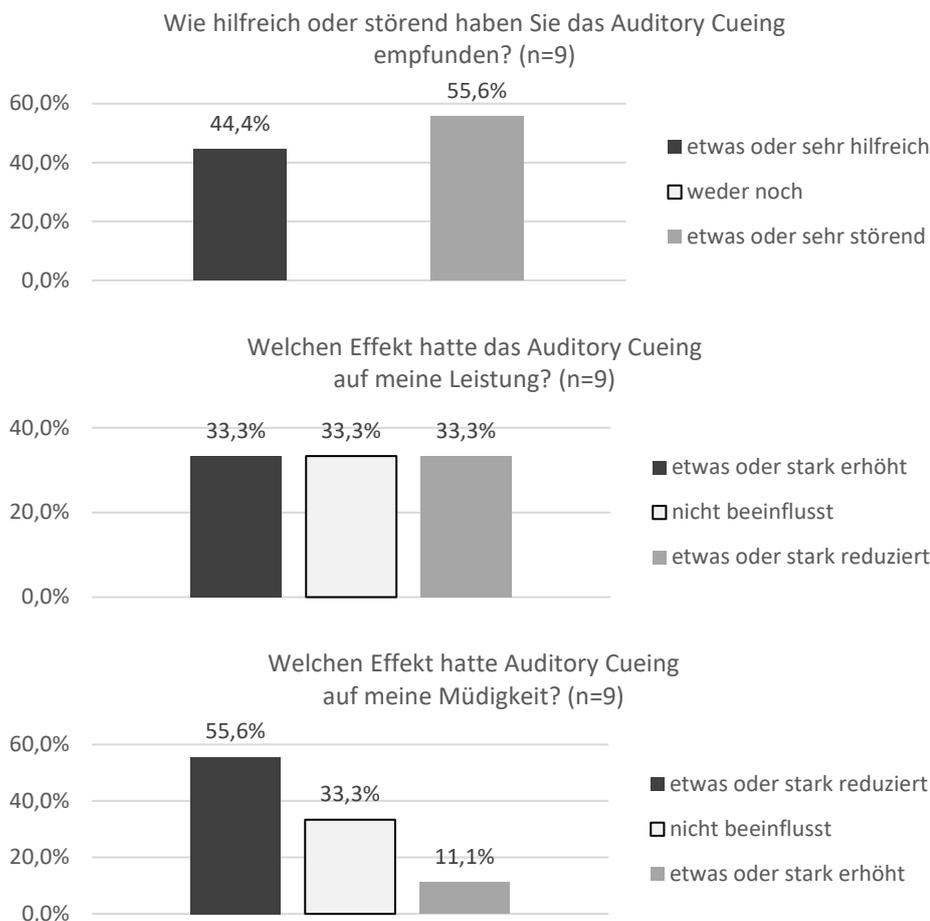


Abbildung 61. Subjektive Beurteilung von Auditory Cueing bzgl. Nützlichkeit (oben), Leistung (Mitte) und Müdigkeit (unten)

B.5 Post-hoc-Untersuchung von Reihenfolgeeffekten

Für die Untersuchung von Reihenfolgeeffekten zwischen den Testphasen wurden bivariate Korrelationen nach Pearson zwischen dem Messzeitpunkt und den Nutzerzustandsdimensionen berechnet. Der Korrelationskoeffizient nach Pearson ist ein Maß für den linearen Zusammenhang. Im Falle eines linearen Zusammenhangs zwischen Messzeitpunkt und Anzahl oder Dauer kritischer Nutzerzustandsausprägungen wäre davon auszugehen, dass die Nutzerzustände abhängig von der Messreihenfolge waren.

Zur Untersuchung dieses Zusammenhangs wurden drei Messzeitpunkte unterschieden, wobei jede der ersten drei Testphasen einen Messzeitpunkt darstellte. Bei Testphase M waren Reihenfolgeeffekte wie eine stärker ausgeprägte Müdigkeit erwünscht, weshalb die Testphase M von der Permutation ausgenommen war und aus dieser Post-hoc Analyse ausgeschlossen wurde. Anzahl und kumulierte Dauer kritischer Zustandsepisoden wurden für die drei betrachteten Zustandsdimensionen pro Versuchsperson über die einzelnen Testphasen gemittelt, die jeweils an der gleichen Position in der Rotationstabelle standen (siehe rote Markierungen in Anhang A.2). Für den ersten Messzeitpunkt wurden also die Zustandsdimensionen von der Testphase Beanspruchung der Versuchspersonen 1 bis 10 gemittelt, von der Testphase Aufmerksamkeit die der Versuchspersonen 11 bis 20 und von der Testphase Beanspruchung und Aufmerksamkeit die der Versuchspersonen 21 bis 30.

Abbildung 62 zeigt die kumulierte Dauer der kritisch ausgeprägten Zustandsdimensionen zu den drei Messzeitpunkten. Weder die kumulierte Dauer der kritisch ausgeprägten Beanspruchung noch die der passiven aufgabenbezogenen Müdigkeit korrelierten signifikant mit dem Messzeitpunkt. Für falsch gerichtete Aufmerksamkeit und Messzeitpunkt weist der Verlauf der Kurve darauf hin, dass die Aufmerksamkeit mit jeder Testphase etwas besser ausgerichtet wurde. Hier lag ein statistischer Trend zu einer negativen Korrelation vor ($r = -.204, p = .053$).

Abbildung 63 zeigt die Anzahl kritisch ausgeprägter Zustandsepisoden zu den drei Messzeitpunkten. Für die Anzahl der kritischen Zustandsepisoden lagen keine signifikanten Korrelationen mit dem Messzeitpunkt vor.

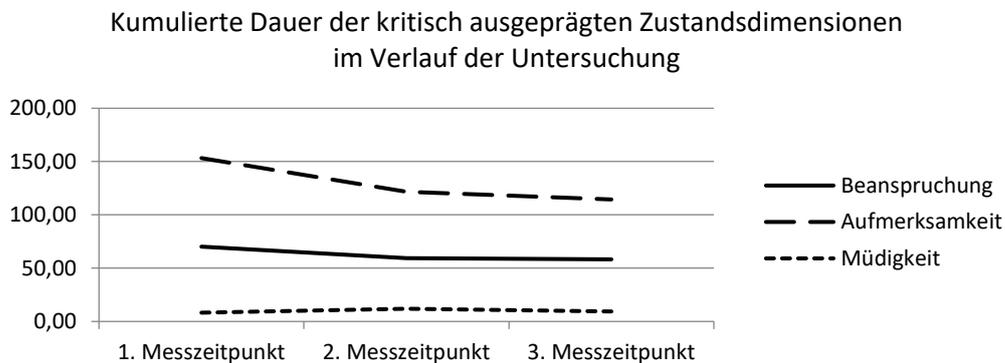


Abbildung 62. Kumulierte Dauer der kritisch ausgeprägten Zustandsdimensionen im Verlauf der Untersuchung

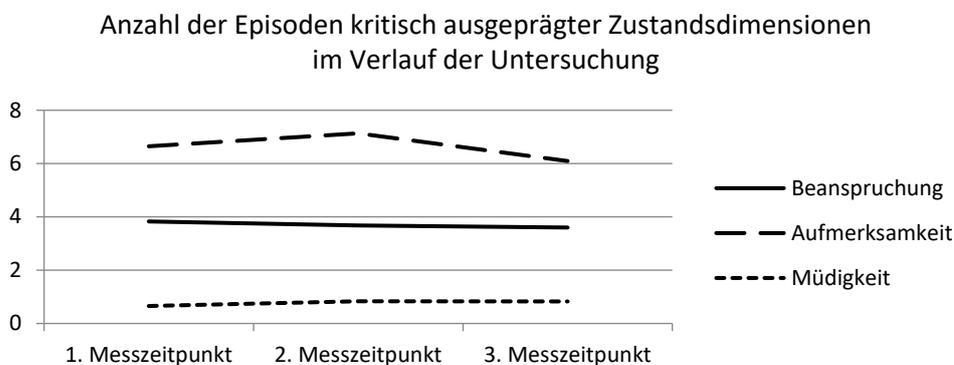


Abbildung 63. Anzahl der Episoden kritisch ausgeprägter Zustandsdimensionen im Verlauf der Untersuchung

Anhang C. Material zu Experiment 1

C.1 Versuchsplan

	Messzeitpunkte					
	1	2	3	4	5	6
	Szenario 1			Szenario 2		
VP01	CTL	CSH	DEC	AUT	CUV	SCH
VP02	CSH	AUT	CTL	SCH	DEC	CUV
VP03	AUT	SCH	CSH	CUV	CTL	DEC
VP04	SCH	CUV	AUT	DEC	CSH	CTL
VP05	CUV	DEC	SCH	CTL	AUT	CSH
VP06	DEC	CTL	CUV	CSH	SCH	AUT
	Szenario 2			Szenario 1		
VP07	AUT	CUV	SCH	CTL	CSH	DEC
VP08	SCH	DEC	CUV	CSH	AUT	CTL
VP09	CUV	CTL	DEC	AUT	SCH	CSH
VP10	DEC	CSH	CTL	SCH	CUV	AUT
VP11	CTL	AUT	CSH	CUV	DEC	SCH
VP12	CSH	SCH	AUT	DEC	CTL	CUV
	Szenario 2			Szenario 1		
VP13	CTL	CSH	DEC	AUT	CUV	SCH
VP14	CSH	AUT	CTL	SCH	DEC	CUV
VP15	AUT	SCH	CSH	CUV	CTL	DEC
VP16	SCH	CUV	AUT	DEC	CSH	CTL
VP17	CUV	DEC	SCH	CTL	AUT	CSH
VP18	DEC	CTL	CUV	CSH	SCH	AUT
	Szenario 1			Szenario 2		
VP19	AUT	CUV	SCH	CTL	CSH	DEC
VP20	SCH	DEC	CUV	CSH	AUT	CTL
VP21	CUV	CTL	DEC	AUT	SCH	CSH
VP22	DEC	CSH	CTL	SCH	CUV	AUT
VP23	CTL	AUT	CSH	CUV	DEC	SCH
VP24	CSH	SCH	AUT	DEC	CTL	CUV

Anmerkungen: CTL = Kontrollbedingung; CSH = Context-Sensitive Help, DEC = Decluttering, AUT = Automation, CUV = Visual Cueing, SCH = Scheduling

C.2 Instruktion

Das Deckblatt der Instruktionen wurde für Experiment 1 leicht angepasst (siehe unten). Aufgabenbeschreibung und Erläuterungen zur Priorität der Aufgaben entsprachen der Voruntersuchung (siehe Anhang A.5) und sind daher nicht erneut aufgeführt.

Liebe(r) Versuchsteilnehmer(in),

vielen Dank für Ihre Bereitschaft, an unserem Versuch teilzunehmen!

In diesem Experiment passen wir die Funktionsweise und das Verhalten des technischen Systems bedarfsgerecht an, um kritischen Nutzerzuständen entgegenzuwirken. Wir möchten untersuchen, ob die von uns entwickelten Methoden zur dynamischen Adaptierung der Interaktion in der Lage sind, den Nutzer bei der Bearbeitung der Aufgabe effektiv zu unterstützen.

Für die Diagnose kritischer Nutzerzustände verwenden wir in diesem Experiment als physiologische Sensoren einen Eye Tracker und einen Brustgurt. Mit dem Eye Tracker werden Blickbewegungen sowie die Pupillenweite erfasst. Mit dem Brustgurt werden verschiedene Vitalfunktionen, wie die Herzrate, die Atmungsrate, die Neigung des Oberkörpers und die Körpertemperatur aufgezeichnet, die als Indikatoren für Nutzerzustände herangezogen werden können. Das Bild der Webcam wird zur automatisierten Klassifikation von Emotionen in der Mimik genutzt. Weiterhin werden Merkmale der Aufgabe (z.B. Anzahl und Art der zu bearbeitenden Aufgaben) und verhaltensbasierte Maße (Mausklicks, Dauer der Aufgabenbearbeitung) von der Diagnosekomponente erfasst und ausgewertet.

Im Sinne eines adaptiven Systems werden bei Vorliegen bestimmter Parameter je nach Versuchsbedingung verschiedene Adaptierungen dynamisch ausgelöst und unterstützen die Aufgabenbearbeitung, wenn das System dies anhand der Diagnoseergebnisse für nötig erachtet. Am Ende jeder Versuchsbedingung wird das Szenario durch einen Fragebogen unterbrochen.

Der Ablauf der Untersuchung gliedert sich folgendermaßen:

- Einweisung in die Aufgabe
- Fragebogen zur Person und zum momentanen Befinden
- Anpassen und Kalibrieren der physiologischen Sensoren
- Übungsszenario
- Versuchsdurchführung mit Bearbeitung von zwei Szenarien (insg. 48 Minuten zzgl. Fragebögen nach jeder Versuchsbedingung)

Insgesamt wird die Untersuchungsdauer ca. 1 Stunden und 15 Minuten betragen.

Viel Spaß und viel Erfolg!

WICHTIG!

**Bitte andere Kollegen nicht über die Inhalte des Experiments informieren!
Für uns ist es wichtig, dass die Versuchsteilnehmer den Szenarioverlauf vorher nicht kennen.**

Danke!

C.3 Beschreibung der Adaptierungsstrategien

Vor jeder Adaptierungsbedingung wurde nur die jeweils zugehörige Instruktion dargereicht.

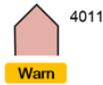
Automatisierte Identifizierung:

Bei hoher Beanspruchung übernimmt das System die Identifizierung bestimmter Tracks. Automatisiert identifizierte Tracks werden durch ein *Fragezeichen über der Tracknummer* gekennzeichnet. Der Nutzer sollte die Identität manuell bestätigen, sobald sein Beanspruchungsgrad es zulässt. Wurde die Identität bestätigt, verschwindet das Fragezeichen.



Hinweis auf die durchzuführende(n) Aufgabe(n):

Bei stockender Aufgabenbearbeitung weist ein oranger Balken unter dem Track auf den aktuell wichtigsten Arbeitsschritt hin. Ist die wichtigste Aufgabe das Anlegen eines NRTT, wird der Briefumschlag (auch am Cursor) orange hinterlegt.



Hinweis auf Aufgabe am Track



Hinweis auf NRTT am Cursor

Sequenzielle Darstellung der Aufgaben:

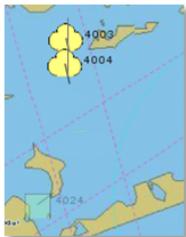
Bestimmte Aufgaben werden nacheinander statt gleichzeitig dargeboten.

Hinweis auf Aufgabe mit hoher Priorität:

Ein roter Pfeil führt vom Mauszeiger zur wichtigsten Aufgabe.

Ablenkung durch unwichtige Tracks verringern:

Die Auffälligkeit von Tracks ohne zu bearbeitende Aufgaben wird durch halbtransparente Darstellung reduziert.



C.4 Post-Test-Fragebögen

Alle Fragen wurden einzeln elektronisch dargereicht. Zu jeder Frage gehörte ein Kommentarfeld für Anmerkungen. Die Eingabe wurde mittels einer „Weiter“-Schaltfläche bestätigt.

Wie sehr mussten Sie sich anstrengen, um die gestellten Aufgaben zu erfüllen?

sehr wenig			wenig			mittel			stark			sehr stark		

Wie bewerten Sie den Grad Ihrer Erschöpfung durch die Aufgabe?

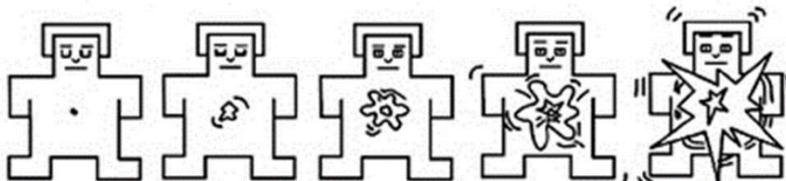
sehr gering			gering			mittel			hoch			sehr hoch		

Wie beurteilen Sie Ihren Gefühlszustand?



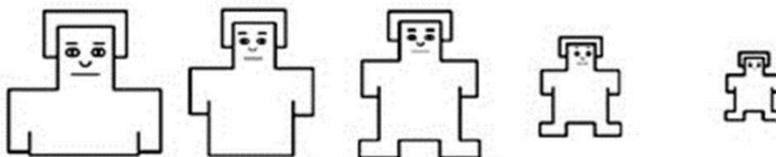
sehr schlecht			schlecht			mittel			gut			sehr gut		

Wie beurteilen Sie Ihren Erregungszustand?



sehr gering			gering			mittel			hoch			sehr hoch		

Wie beurteilen Sie Ihr Gefühl der Dominanz und Kontrolle?



sehr hoch			hoch			mittel			gering			sehr gering		

Zusätzliche Fragen in den Adaptierungsbedingungen

Wie hilfreich oder störend haben Sie die Adaptierungsstrategie empfunden?

sehr hilfreich			etwas hilfreich			weder hilfreich noch störend			etwas störend			sehr störend			Keine Adaptierung aufgetreten		

Welchen Effekt hatte die Adaptierungsstrategie auf meine Leistung bei der Aufgabenbearbeitung? Meine Leistung wurde durch die Adaptierung...

stark erhöht			etwas erhöht			nicht beeinflusst			etwas reduziert			stark reduziert			Keine Adaptierung aufgetreten		

Welchen Effekt hatte die Adaptierungsstrategie auf meine Beanspruchung? Meine Beanspruchung wurde durch die Adaptierung...

stark erhöht			etwas erhöht			nicht beeinflusst			etwas reduziert			stark reduziert			Keine Adaptierung aufgetreten		

Welchen Effekt hatte die Adaptierungsstrategie auf meine Aufmerksamkeit? Die Ausrichtung meiner Aufmerksamkeit wurde durch die Adaptierung...

stark erhöht			etwas erhöht			nicht beeinflusst			etwas reduziert			stark reduziert			Keine Adaptierung aufgetreten		

War der Zeitpunkt des Auftretens der Adaptierung angemessen?

völlig angemessen			eher angemessen			eher unangemessen			völlig unangemessen			Keine Adaptierung aufgetreten		

Haben Sie weitere Anmerkungen/Vorschläge/Ideen? Z. B. Wie die Adaptierung verbessert werden könnte _____

Anhang D. Ergebnisse zu Experiment 1

D.1 Ergebnisse der hypothesenprüfenden Untersuchung

Dieser Abschnitt beschreibt die detaillierten Ergebnisse der statistischen Analysen zu Experiment 1. Für die Untersuchung wurden drei Hypothesen formuliert, mit denen der Effekt der Adaptierungen auf das Auftreten von Leistungseinbrüchen (H1), die Effizienz der Aufgabenbearbeitung (H2) und das Auftreten kritischer Nutzerzustände (H3) untersucht wurde.

Aus Gründen der Vollständigkeit und der Vergleichbarkeit werden in Ergebnistabellen stets Mittelwerte und Standardabweichungen angegeben, auch wenn non-parametrische Tests gerechnet wurden. Diagramme zeigen je nach verwendetem Test Mediane und/oder Mittelwerte, als Dispersionsmaß wird an Mittelwerten stets der Standardfehler angegeben.

Bis auf die Automationsstrategie wurden alle Adaptierungsstrategien bei jedem Probanden mindestens einmal ausgelöst. Während Decluttering im Mittel 18.08 Mal aufgetreten ist, war Automation durchschnittlich nur 3.38 Mal aktiv. Ähnlich verhält es sich mit der kumulierten und der durchschnittlichen Dauer. Context-Sensitive Help war beispielsweise im Vergleich zu den anderen Adaptierungsstrategien durchschnittlich am längsten aktiv (31.28 s). Automation hingegen wurde im Mittel bereits nach 1.79 s wieder deaktiviert. Die großen vorhandenen interindividuellen Unterschiede werden auch bei Betrachtung des Minimums und des Maximums deutlich. Beispielsweise war Scheduling bei einem Probanden insgesamt nur für 1.00 s aktiv, dafür aber bei einem anderen für 325.00 s. Tabelle 42 stellt statistische Kennwerte der Anzahl, der kumulierten und der durchschnittlichen Dauer ausgelöster Adaptierungsstrategien dar.

Tabelle 42. Statistische Kennwerte ausgelöster Adaptierungsstrategien in Experiment 1

	<i>Median</i>	<i>M</i>	<i>SD</i>	<i>Min</i>	<i>Max</i>
Context-Sensitive Help					
Anzahl	5.00	5.63	3.20	2.00	17.00
Kumulierte Dauer (in s)	92.50	154.42	128.35	16.00	423.00
Durchschnittliche Dauer (in s)	18.208	31.28	30.79	3.20	125.67
Automation					
Anzahl	3.00	3.38	2.60	0.00	11.00
Kumulierte Dauer (in s)	4.00	7.08	7.64	0.00	27.00
Durchschnittliche Dauer (in s)	1.25	1.79	1.48	0.00	6.75
Scheduling					
Anzahl	7.00	7.38	4.49	1.00	20.00
Kumulierte Dauer (in s)	73.50	95.46	78.85	1.00	325.00
Durchschnittliche Dauer (in s)	9.49	13.35	8.91	1.00	36.00
Visual Cueing					
Anzahl	8.00	8.88	5.81	2.00	27.00
Kumulierte Dauer (in s)	22.00	30.71	24.69	3.00	84.00
Durchschnittliche Dauer (in s)	3.00	3.17	1.15	1.33	4.80
Decluttering					
Anzahl	17.50	18.08	7.57	6.00	39.00
Kumulierte Dauer (in s)	180.50	188.67	106.68	42.00	425.00
Durchschnittliche Dauer (in s)	8.33	10.47	4.73	5.59	22.85

Anmerkung: $N = 24$.

D.1.1 Wirkung auf Leistungseinbrüche (Hypothese H1)

Wie bereits in Abschnitt 5.1.5 beschrieben, führten Fehler in der Aufzeichnung der Aufgaben und Leistungseinbrüche dazu, dass die korrekten Daten für dieses Experiment teilweise aus den Rohdaten-Aufzeichnungen der iMotions-Software rekonstruiert werden mussten. Da die Rekonstruktion von Anzahl und kumulierter Dauer der Leistungseinbrüche nicht möglich war, konnte in Bezug auf die Leistungseinbrüche zunächst nur die Hypothese H1b zur durchschnittlichen Dauer von Leistungseinbrüchen untersucht werden. Deskriptive Statistiken und Ergebnisse dieser Vergleiche sind in einer Übersichtstabelle (Tabelle 43) aufgeführt.

Tabelle 43. Ergebnisse zur durchschnittlichen Dauer von Leistungseinbrüchen (Vergleich zwischen Adaptierungen und der Kontrollbedingung)

	Bekämpfen			Warnen		
	Median	M (SD)	p (r)	Median	M (SD)	p (r)
CSH	0	1.17 (3.16)	.684 (.06)	0.50	7.16 (13.50)	.023 (.33)
AUT	0	1.43 (2.99)	.799 (.04)	4.75	11.05 (16.43)	.431 (.17)
SCH	0	1.42 (3.07)	.889 (.02)	1.50	11.74 (18.89)	.311 (.21)
CUV	0	0.79 (2.80)	.345 (.14)	0.50	6.27 (9.59)	.019 (.34)
DEC	0	2.02 (3.37)	.398 (.12)	2.50	4.68 (6.11)	.012 (.36)
CTL	0	1.36 (4.27)	-	9.00	17.76 (20.66)	-

	Identifizieren			NRTT		
	Median	M (SD)	p (r)	Median	M (SD)	p (r)
CSH	22.40	30.46 (22.54)	.455 (.16)	38.50	57.97 (67.35)	.584 (.08)
AUT	17.93	24.25 (22.89)	.189 (.20)	40.00	55.99 (39.71)	.096 (.36)
SCH	18.63	23.60 (19.50)	.775 (.04)	30.75	43.38 (43.92)	.551 (.13)
CUV	19.40	24.46 (15.77)	.524 (.13)	35.00	55.28 (58.48)	.394 (.12)
DEC	15.25	20.68 (14.99)	.145 (.21)	31.67	60.30 (72.86)	.117 (.23)
CTL	20.27	27.29 (17.27)	-	30.00	41.46 (43.29)	-

Anmerkungen: CSH = Context-Sensitive Help, AUT = Automation, SCH = Scheduling, CUV = Visual Cueing, DEC = Decluttering. $N = 23$, außer Vergleich AUT-CTL ($n = 21$).

Durchschnittliche Dauer der Leistungseinbrüche bei Bekämpfungsaufgaben

Über alle Bedingungen hinweg wies die Mehrzahl der Probanden (63% in der Bedingung Decluttering; 88% in der Kontrollbedingung und in der Bedingung Visual Cueing) bei Bekämpfungsaufgaben keinen Leistungseinbruch auf, so dass der Median der durchschnittlichen Dauer der Leistungseinbrüche in allen Bedingungen bei 0.00 s lag. Wenn Leistungseinbrüche dennoch auftraten, dauerten sie im Mittel 1.36 s. Statistisch signifikant wurde kein Vergleich zwischen den Adaptierungsbedingungen und der Kontrollbedingung (alle p s > .344, alle $|r$ s < .14).

Durchschnittliche Dauer der Leistungseinbrüche bei Warnaufgaben

Anders als bei Bekämpfungsaufgaben wies bei Warnaufgaben mehr als die Hälfte der Probanden Leistungseinbrüche auf. Sowohl der Mittelwert als auch der Median sind in der Kontrollbedingung deutlich höher als in den Adaptierungsbedingungen. Der Mittelwert in der Kontrollbedingung überstieg die Mittelwerte der Adaptierungsbedingungen um mindestens

34%, der Median um mindestens 47% (Abbildung 64). Statistisch betrachtet konnten Leistungseinbrüche bei Context-Sensitive Help ($z = -2.28$, $p = .023$, $N = 24$, $r = -.33$), bei Decluttering ($z = -2.51$, $p = .012$, $N = 24$, $r = -.36$) sowie bei Visuelles Cueing ($z = -2.34$, $p = .019$, $N = 24$, $r = -.34$) marginal signifikant schneller beendet werden als in der Kontrollbedingung. Die Effektstärken weisen auf mittlere Effekte hin. Die Vergleiche zwischen den Adaptierungsbedingungen Automation und Scheduling mit der Kontrollbedingung wiesen bei Warnaufgaben deskriptiv ebenfalls eine kürzere Bearbeitungszeit auf, die Unterschiede waren jedoch statistisch nicht signifikant (Automation: $t(21) = 0.80$, $p = .431$, $r = .17$; Scheduling: $t(23) = 1.04$, $p = .311$, $r = .21$).

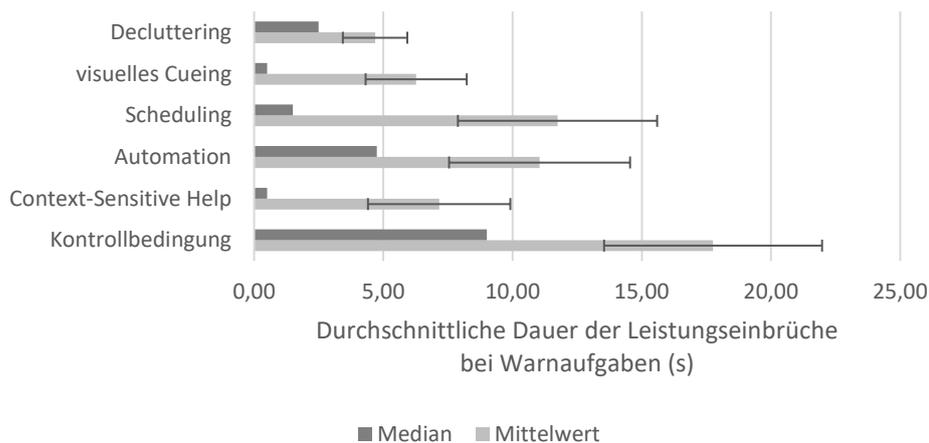


Abbildung 64. Mediane und Mittelwerte (mit Standardfehler) der durchschnittlichen Dauer von Leistungseinbrüchen bei Warnaufgaben pro Adaptierungsbedingung

Durchschnittliche Dauer der Leistungseinbrüche bei Identifizierungsaufgaben

Deskriptiv dauerten Leistungseinbrüche bei allen Adaptierungen außer Context-Sensitive Help sowohl in Bezug auf den Mittelwert als auch auf den Median kürzer an als in der Kontrollbedingung. Die durchschnittliche Dauer der Leistungseinbrüche bei Identifizierungsaufgaben zeigte statistisch jedoch keine signifikanten Unterschiede im Vergleich zwischen Kontroll- und Adaptierungsbedingungen (alle $ps > .144$, alle $|rs| < .21$).

Durchschnittliche Dauer der Leistungseinbrüche bei NRTT-Aufgaben

Leistungseinbrüche bei NRTT-Aufgaben konnten in der Kontrollbedingung im Durchschnitt schneller beendet werden als in den Adaptierungsbedingungen. Dies gilt sowohl in Bezug auf den Mittelwert als auch in Bezug auf den Median. Bezüglich der Automationsbedingung konnte ein statistischer Trend beobachtet werden: die Automation verlangsamte NRTT-Leistungseinbrüche im Vergleich zur Kontrollbedingung marginal signifikant ($t(20) = -1.75$, $p = .096$, $r = .36$). Die übrigen Unterschiede zwischen der Kontrollbedingung und den Adaptierungsbedingungen waren statistisch nicht signifikant (alle $ps > .116$, alle $|rs| < .23$).

D.1.2 Wirkung auf die Aufgabenbearbeitung (Hypothese H2)

Für die Untersuchung der Wirkung der Adaptierungen auf die Aufgabenbearbeitung (H2) wurde geprüft, ob die Anzahl, die durchschnittliche oder kumulierte Präsenzdauer der verschiedenen Aufgaben im Vergleich zur Kontrollbedingung verringert wurden. Deskriptive Statistiken und Ergebnisse dieser Vergleiche sind in einer Übersichtstabelle (Tabelle 44) dargestellt.

Tabelle 44. Ergebnisse der Vergleiche von Anzahl, durchschnittlicher und kumulierter Präsenzdauer aller Teilaufgaben zwischen Adaptierungen und der Kontrollbedingung

	Anzahl			Durchschn. Präsenzdauer (s)			Kumulierte Präsenzdauer (s)		
	Median	M (SD)	p (r)	Median	M (SD)	p (r)	Median	M (SD)	p (r)
Bekämpfen									
CSH	9	9.29 (0.91)	.329 (.14)	2.05	2.41 (1.21)	.607 (.07)	19.0	22.67 (12.22)	.587 (.08)
AUT	9	9.09 (1.02)	.903 (.02)	2.04	2.76 (1.63)	.306 (.22)	18.0	24.77 (13.80)	.407 (.18)
SCH	9	9.38 (1.13)	.137 (.22)	2.10	2.73 (1.44)	.110 (.23)	20.5	25.71 (13.91)	.151 (.29)
CUV	9	9.38 (0.88)	.323 (.14)	2.00	2.34 (0.95)	.648 (.06)	20.0	21.88 (8.63)	.587 (.08)
DEC	9	9.29 (0.86)	.377 (.18)	3.50	3.49 (1.25)	.001 (.44)	31.5	32.33 (11.89)	.002 (.44)
CTL	9	9.04 (1.04)	–	1.90	2.38 (1.87)	–	18.0	21.54 (16.92)	–
Warnen									
CSH	11	11.00 (1.44)	.805 (.04)	5.96	7.53 (5.48)	.346 (.14)	70.5	80.29 (50.35)	.304 (.15)
AUT	11	10.59 (1.18)	.450 (.17)	8.19	8.94 (4.53)	.833 (.03)	86.0	93.73 (47.31)	.783 (.04)
SCH	11	11.00 (1.41)	.892 (.03)	6.54	9.30 (9.59)	.424 (.12)	69.5	98.08 (93.53)	.530 (.09)
CUV	12	11.46 (1.10)	.218 (.26)	6.20	7.07 (3.60)	.271 (.16)	65.5	80.58 (41.42)	.353 (.13)
DEC	11	11.21 (1.35)	.637 (.10)	7.45	7.56 (2.73)	.424 (.12)	84.0	84.08 (28.82)	.988 (<.01)
CTL	11	10.96 (1.52)	–	6.09	10.16 (9.10)	–	63.0	109.63 (107.49)	–
Identifizieren									
CSH	24	23.21 (3.37)	1.00 (<.01)	19.98	27.95 (21.25)	.753 (.04)	479.5	607.04 (396.20)	.689 (.06)
AUT	24	23.91 (1.77)	.485 (.15)	17.70	20.92 (13.85)	.172 (.29)	440.5	487.18 (267.46)	.615 (.07)
SCH	24	23.50 (1.69)	.723 (.05)	18.19	23.41 (16.68)	.710 (.05)	425.0	530.83 (299.92)	.775 (.04)
CUV	24	23.88 (1.73)	.624 (.07)	19.25	25.05 (15.23)	.977 (<.01)	463.5	596.71 (362.01)	.841 (.03)
DEC	25	24.00 (2.28)	.067 (.37)	18.96	22.84 (10.53)	.511 (.10)	474.0	534.21 (214.52)	.879 (.03)
CTL	24	23.21 (2.95)	–	20.46	25.13 (18.17)	–	445.0	542.42 (262.88)	–
NRTT-Aufgaben									
CSH	3	2.67 (0.56)	.739 (.05)	53.33	88.40 (85.27)	.903 (.02)	160.0	200.88 (101.70)	.761 (.04)
AUT	3	2.54 (0.78)	.564 (.09)	64.33	81.02 (42.79)	.048 (.31)	172.0	209.73 (113.35)	.221 (.27)
SCH	3	2.63 (0.58)	1.00 (<.01)	53.67	69.14 (44.41)	.584 (.08)	133.0	167.08 (76.00)	.479 (.15)
CUV	3	2.54 (0.78)	.564 (.08)	64.33	76.72 (57.42)	.605 (.08)	169.0	183,30 (94.31)	.843 (.03)
DEC	3	2.59 (0.79)	.739 (.05)	59.50	77.91 (41.57)	.198 (.20)	168.0	200.48 (96.21)	.313 (.15)
CTL	3	2.63 (0.71)	–	56.50	67.46 (39.43)	–	146.0	179.43 (101.70)	–

Anmerkungen: CSH = Context-Sensitive Help, AUT = Automation, SCH = Scheduling, CUV = Visual Cueing, DEC = Decluttering, CTL = Kontrollbedingung. N = 24, außer Vergleich AUT-CTL (n = 22).

Anzahl bearbeiteter Aufgaben (Hypothese H2a)

Bekämpfen. Über alle Bedingungen hinweg wurden im Mittel 9.24 Bekämpfungsaufgaben mit einem Minimum von 6 Aufgaben (Automation) und einem Maximum von 12 Aufgaben (Scheduling) bearbeitet. Im Mittel wurden in der Kontrollbedingung ($M = 9.04$, $SD = 1.04$) am wenigsten Bekämpfungsaufgaben bearbeitet, die Unterschiede in den Mittelwerten fielen jedoch gering aus. Die Anzahl bearbeiteter Bekämpfungsaufgaben in den Adaptierungsbedingungen unterschieden sich nicht signifikant von der Anzahl in der Kontrollbedingung (alle $ps > .136$, alle $|rs| < .22$).

Warnen. Über alle Bedingungen hinweg wurden im Durchschnitt 11.04 Warnaufgaben mit einem Minimum von 7 Aufgaben (Kontrollbedingung) und einem Maximum von 14 Aufgaben (Decluttering und Context-Sensitive Help) bearbeitet. Lediglich Automation wies im Mittel ($M = 10.59$, $SD = 1.18$) eine geringere Anzahl bearbeiteter Warnaufgaben auf als die

Kontrollbedingung ($M = 10.96$, $SD = 1.52$). Es gab jedoch keine statistisch signifikanten Unterschiede zwischen der Kontrollbedingung und den Adaptierungsbedingungen (alle $ps > .217$, alle $|r|s < .26$).

Identifizieren. Mit Ausnahme von Context Sensitive Help ($M = 23.21$, $SD = 3.37$) wiesen alle Adaptierungsbedingungen eine höhere Anzahl bearbeiteter Identifizierungsaufgaben auf als die Kontrollbedingung ($M = 23.21$, $SD = 2.95$). Alle berichteten Unterschiede in der Anzahl waren statistisch nicht signifikant (alle $ps > .066$, alle $|r|s < .38$). In der Decluttering-Bedingung wurden jedoch marginal signifikant mehr Identifizierungsaufgaben bearbeitet als in der Kontrollbedingung ($t(23) = -1.92$, $p = .067$, $r = .37$).

NRTT-Aufgaben. Im Durchschnitt wurden über alle Bedingungen hinweg 2.60 NRTT-Aufgaben mit einem Minimum von 0 (Decluttering, Automation, Visual Cueing, Kontrollbedingung) und einem Maximum von 3 Aufgaben (alle Bedingungen) bearbeitet. Bei dieser Teilaufgabe betrug die Spannweite der Mittelwerte lediglich 0.13 Aufgaben und die Mediane unterschieden sich nicht zwischen den Bedingungen. Die Unterschiede zwischen der Kontrollbedingung und den Adaptierungsbedingungen in der Anzahl bearbeiteter NRTT-Aufgaben waren statistisch ebenfalls nicht signifikant (alle $ps > .563$, alle $|r|s < .09$).

Durchschnittliche Dauer der Aufgaben (Hypothese H2b)

Bekämpfen. Bekämpfungsaufgaben waren im Mittel über alle Bedingungen hinweg für 2.69 s präsent. Lediglich der Mittelwert von Visual Cueing ($M = 2.34$, $SD = 0.95$) liegt leicht unter dem der Kontrollbedingung ($M = 2.38$, $SD = 1.87$). Statistisch signifikant war der Unterschied in der durchschnittlichen Präsenzdauer aber nur für den Vergleich zwischen Decluttering ($M = 3.49$, $SD = 1.25$) und der Kontrollbedingung ($z = -3.20$, $p = .001$, $N = 24$, $r = -.44$). Bekämpfungsaufgaben waren demnach bei Decluttering durchschnittlich länger präsent als in der Kontrollbedingung. Alle anderen Unterschiede waren statistisch nicht signifikant (alle $ps > .109$, alle $|r|s < .23$).

Warnen. Warnaufgaben waren im Durchschnitt über alle Bedingungen hinweg für 8.43 s mit einem Minimum von 2.00 s (Context-Sensitive Help) und einem Maximum von 43.40 s (Scheduling) präsent. Der Mittelwert der Kontrollbedingung ($M = 10.16$, $SD = 9.10$) war durchweg größer als die Mittelwerte der Adaptierungsbedingungen. Jedoch waren alle Unterschiede zwischen der Kontroll- und den Adaptierungsbedingungen statistisch nicht signifikant (alle $ps > .270$, alle $|r|s < .16$).

Identifizieren. Der Median der Präsenzdauer von Identifizierungsaufgaben fiel in allen Adaptierungsbedingungen niedriger aus als in der Kontrollbedingung. Auch die durchschnittliche Dauer war in den Adaptierungsbedingungen überwiegend geringer. Mit Context-Sensitive Help ($M = 27.95$, $SD = 21.25$) waren Identifizierungsaufgaben im Durchschnitt allerdings länger präsent als in der Kontrollbedingung ($M = 25.13$, $SD = 18.17$). Statistisch signifikant unterschied sich die durchschnittliche Präsenzdauer von Identifizierungsaufgaben in den Adaptierungsbedingungen jedoch nicht von denen in der Kontrollbedingung (alle $ps > .171$, alle $|r|s < .29$).

NRTT-Aufgaben. Die durchschnittliche Präsenzdauer von NRTT-Aufgaben betrug im Mittel über alle Bedingungen hinweg 76.78 s mit einem Minimum von 23.67 s (Kontrollbedingung) und einem Maximum von 343.00 s (Context-Sensitive Help). Die Unterschiede zwischen der Kontrollbedingung und den Adaptierungsbedingungen waren statistisch nicht signifikant (alle

$p_s > .047$, alle $|r|s < .32$). Mit der Automationsstrategie zeigte sich aber ein statistischer Trend zu einer längeren Präsenz von NRTT-Aufgaben ($z = -.198$, $p = .048$, $N = 24$, $r = -.31$).

Kumulierte Dauer der Aufgaben (Hypothese H2c)

Bekämpfen. Im Mittel wurden Bekämpfungsaufgaben in der Kontrollbedingung ($M = 21.54$, $SD = 16.92$) am schnellsten bearbeitet. Statistisch signifikant war jedoch nur der Vergleich zwischen der Kontrollbedingung und Decluttering ($M = 32.33$, $SD = 11.89$; $z = -3.04$, $p = .002$, $N = 24$, $r = -.44$). Bei Decluttering waren Bekämpfungsaufgaben also signifikant längere Zeit präsent als in der Kontrollbedingung. Alle anderen Unterschiede waren statistisch nicht signifikant (alle $p_s > .150$, alle $|r|s < .29$).

Warnen. Auffällig bei der Dauer von Warnaufgaben ist, dass der Median in der Kontrollbedingung im Vergleich zu den Adaptierungsbedingungen geringer ausfällt, während der Mittelwert in der Kontrollbedingung höher ausgeprägt ist als in den Adaptierungsbedingungen. Es gab jedoch keine signifikanten Unterschiede in der kumulierten Präsenzdauer von Warnaufgaben zwischen der Kontrollbedingung und den Adaptierungsbedingungen (alle $p_s > .303$, alle $|r|s < .15$).

Identifizieren. Bezüglich der kumulierten Präsenzdauer von Identifizierungsaufgaben gab es keine bedeutsamen Beobachtungen und auch keine signifikanten Unterschiede (alle $p_s > .614$, alle $|r|s < .08$).

NRTT-Aufgaben. Auch bei der Präsenzdauer von NRTT-Aufgaben gab es keine signifikanten Unterschiede zwischen den Adaptierungsbedingungen und der Kontrollbedingung (alle $p_s > .220$, alle $|r|s < .27$).

D.1.3 Wirkung auf den diagnostizierten Nutzerzustand (Hypothese H3)

Für die Untersuchung der Wirkung der Adaptierungen auf kritische Nutzerzustandsausprägungen (H3) wurde geprüft, ob die Anzahl, die durchschnittliche oder kumulierte Präsenzdauer diagnostizierter kritischer Zustandsausprägungen im Vergleich zur Kontrollbedingung verringert wurden. Die Ergebnisse dieser Vergleiche und deskriptiven Statistiken für Episoden kritischer Beanspruchung und falsch gerichteter Aufmerksamkeit sind in einer Übersichtstabelle (Tabelle 45) dargestellt.

Anzahl kritischer Zustandsepisoden (Hypothese H3a)

Beanspruchung. Kritisch hohe Beanspruchung wurde deskriptiv nur mit Context-Sensitive Help ($M = 8.25$, $SD = 3.76$) und Automation ($M = 8.91$, $SD = 3.54$) seltener diagnostiziert als in der Kontrollbedingung ($M = 9.04$, $SD = 4.24$). Jedoch war in keiner der Adaptierungsbedingungen die Anzahl der diagnostizierten kritischen Beanspruchungsepisoden im Vergleich zur Kontrollbedingung signifikant verringert (alle $p_s > .302$, alle $|r|s < .22$).

Aufmerksamkeit. Episoden mit falsch gerichteter Aufmerksamkeit traten mit Decluttering ($Median = 23.5$) signifikant häufiger auf als in der Kontrollbedingung ($Median = 19$, $M = 18.38$, $SD = 5.45$; $z = -3.23$, $p = .001$, $N = 24$, $r = -.47$). Ähnliche statistische Trends wurden für Context-Sensitive Help ($M = 21.54$, $SD = 6.55$; $t(23) = -2.08$, $p = .049$, $r = .40$) und Visual Cueing ($M = 21.67$, $SD = 6.97$; $t(23) = -2.04$, $p = .053$, $r = .39$) festgestellt. Die übrigen Vergleiche waren nicht statistisch signifikant (alle $p_s > .492$, $|r|s < .16$).

Tabelle 45. Ergebnisse der Vergleiche von Anzahl, durchschnittlicher und kumulierter Dauer von Episoden kritisch hoher Beanspruchung und falsch gerichteter Aufmerksamkeit zwischen Bedingungen mit Adaptierungen und der Kontrollbedingung

	Anzahl			Durchschn. Präsenzdauer (s)			Kumulierte Präsenzdauer (s)		
	Median	M (SD)	p (r)	Median	M (SD)	p (r)	Median	M (SD)	p (r)
Episoden kritisch hoher Beanspruchung									
CSH	7.0	8.25 (3.76)	.519 (.14)	22.73	35.25 (29.48)	.819 (.03)	264.0	231.25 (117.81)	.773 (.06)
AUT	8.5	8.91 (3.54)	.613 (.08)	20.71	26.71 (20.06)	.570 (.09)	203.5	212.00 (123.58)	.535 (.14)
SCH	11.0	10.04 (5.41)	.507 (.14)	17.20	25.92 (22.98)	.067 (.26)	216.5	206.54 (112.54)	.247 (.24)
CUV	10.5	10.29 (4.03)	.303 (.21)	16.61	22.66 (24.49)	.006 (.40)	187.5	193.83 (121.62)	.088 (.35)
DEC	9.5	9.38 (4.68)	.798 (.11)	21.19	49.71 (94.96)	.278 (.16)	210.5	228.17 (113.61)	.633 (.10)
CTL	8.5	9.04 (4.24)	–	25.26	37.06 (32.72)	–	224.5	240.17 (91.09)	–
Episoden falsch gerichteter Aufmerksamkeit									
CSH	20.0	21.54 (6.55)	.049 (.40)	9.35	11.63 (5.71)	.049 (.28)	199.5	236.05 (96.58)	.226 (.25)
AUT	17.0	17.50 (4.15)	.493 (.15)	12.65	15.08 (7.26)	.671 (.09)	239.5	258.00 (97.53)	.750 (.07)
SCH	17.5	18.92 (5.21)	.749 (.07)	12.22	13.50 (5.23)	.253 (.16)	246.5	248.13 (92.08)	.717 (.08)
CUV	21.0	21.67 (6.97)	.053 (.39)	10.39	10.92 (3.29)	.013 (.36)	199.0	227.79 (79.98)	.104 (.33)
DEC	23.5	23.63 (6.06)	.001 (.47)	9.44	10.67 (4.29)	<.001 (.52)	240.5	242.00 (83.70)	.404 (.17)
CTL	19.0	18.38 (5.45)	–	12.92	14.64 (6.73)	–	253.0	254.88 (94.70)	–

Anmerkungen: CSH = Context-Sensitive Help, AUT = Automation, SCH = Scheduling, CUV = Visual Cueing, DEC = Decluttering. N = 24, außer Vergleich AUT-CTL (n = 22).

Durchschnittliche Dauer kritischer Zustandsepisoden (Hypothese H3b)

Beanspruchung. Deskriptiv endeten kritische Beanspruchungsepisoden in den Adaptierungsbedingungen schneller als in der Kontrollbedingung: Nahezu alle Mediane und Mittelwerte der Adaptierungsbedingungen fielen kleiner aus als in der Kontrollbedingung ($M = 37.06$, $SD = 32.72$; $z = -2.77$, $p = .006$, $N = 24$, $r = -.40$). Lediglich bei Decluttering waren Probanden durchschnittlich länger beansprucht. Im Durchschnitt waren Episoden kritisch hoher Beanspruchung mit Visual Cueing ($M = 22.66$, $SD = 24.49$) signifikant kürzer. Scheduling zeigte einen statistischen Trend in die gleiche Richtung ($M = 25.92$, $SD = 22.98$); $z = -1.83$, $p = .067$, $N = 24$, $r = -.26$). Die übrigen Vergleiche waren jedoch statistisch nicht signifikant (alle $ps > .280$, alle $|rs| < .17$).

Aufmerksamkeit. Alle Mediane und Mittelwerte der Adaptierungsbedingungen waren kleiner als der Median der Kontrollbedingung ($Median = 12.92$). Statistisch signifikant kürzer waren Episoden falsch gerichteter Aufmerksamkeit allerdings nur mit Decluttering ($Median = 9.44$; $z = -3.57$, $p < .001$, $N = 24$, $r = -.52$). Darüber hinaus gab es jedoch marginal signifikante Unterschiede für Context-Sensitive Help ($Median = 9.35$; $z = -1.97$, $p = .049$, $N = 24$, $r = -.28$) und Visual Cueing ($Median = 10.39$; $z = -2.49$, $p = .013$, $N = 24$, $r = -.36$). Weitere Vergleiche waren statistisch nicht signifikant (alle $ps > .252$, alle $|rs| < .17$).

Kumulierte Dauer kritischer Zustandsepisoden (Hypothese H3c)

Beanspruchung. Deskriptiv war die kumulierte Dauer von Episoden mit kritischer hoher Beanspruchung mit allen Adaptierungen geringer als die Kontrollbedingung, aber keine Adaptierungsstrategie reduzierte diese signifikant (alle $ps > .087$, alle $|rs| < .36$). Der Vergleich zwischen Visual Cueing ($M = 193.83$, $SD = 121.62$) und der Kontrollbedingung ($M = 240.17$, $SD = 91.09$) war jedoch marginal signifikant ($t(23) = 1.78$, $p = .088$, $r = .35$) bei mittlerer

Effektstärke. Mit Visual Cueing waren die Episoden kritisch hoher Beanspruchung insgesamt tendenziell kürzer.

Aufmerksamkeit. Mit Ausnahme der Automationsstrategie ($M = 258.00$, $SD = 97.53$) trat in allen Adaptierungsbedingungen ein geringerer Anteil von falsch gerichteter Aufmerksamkeit auf als in der Kontrollbedingung ($M = 254.88$, $SD = 94.70$), die Unterschiede waren jedoch statistisch nicht signifikant (alle p s $> .103$, alle $|r$ s $< .34$).

D.1.4 Wirkung auf den subjektiven Nutzerzustand

Um die Wirkung der einzelnen Adaptierungsstrategien auf den subjektiven Nutzerzustand zu untersuchen, wurden die Bewertungen hinsichtlich Anstrengung und Erschöpfung in den Adaptierungsbedingungen im Vergleich zur Kontrollbedingung untersucht. Die Ergebnisse für diese Vergleiche sind in Tabelle 46 aufgeführt.

Bei Betrachten der subjektiv empfundenen Anstrengung unterschied sich keine Adaptierungsbedingung statistisch signifikant von der Kontrollbedingung. Trends hin zu weniger empfundener Anstrengung waren jedoch bei den Adaptierungsbedingungen Scheduling ($t(23) = 2.01$, $p = .057$, $r = .39$) und Visual Cueing ($z = -1.88$, $p = .060$, $r = .27$) erkennbar.

Mittelwerte und Mediane für die subjektiv empfundene aufgabenbezogene Erschöpfung bewegten sich innerhalb einer sehr geringen Spannweite. Dementsprechend wurden die einzelnen Vergleiche allesamt statistisch nicht signifikant. Ein Trend hin zu geringerer empfundener aufgabenbezogener Erschöpfung als in der Kontrollbedingung zeigte sich jedoch bei Visual Cueing ($z = -2.27$, $p = .023$, $r = .33$).

Tabelle 46. Subjektive Bewertung der Adaptierungen hinsichtlich Anstrengung und Erschöpfung im Vergleich zur Kontrollbedingung

	<i>n</i>	Subjektive Anstrengung			Subjektive aufgabenbezogene Erschöpfung		
		<i>Median</i>	<i>M (SD)</i>	<i>p (r)</i>	<i>Median</i>	<i>M (SD)</i>	<i>p (r)</i>
CSH	24	9	8.46 (2.19)	.283 (.22)	7.5	7.21 (1.91)	.356 (.19)
AUT	22	9	8.55 (1.82)	.217 (.21)	8	7.86 (2.03)	.981 (<.01)
SCH	24	8	8.29 (2.18)	.057 (.39)	7	7.42 (2.50)	.386 (.13)
CUV	24	9	8.38 (2.14)	.060 (.27)	7	6.83 (2.24)	.023 (.33)
DEC	24	9	9.13 (1.87)	.645 (.10)	8	8.00 (2.15)	.707 (.05)
CTL	24	9	8.92 (1.95)	-	8	7.58 (2.21)	-

Anmerkungen: Bewertung der Nutzerzustandsausprägungen auf einer Skala von 1 bis 15. CSH = Context-Sensitive Help, AUT = Automation, SCH = Scheduling, CUV = Visual Cueing, DEC = Decluttering, CTL = Kontrollbedingung. $N = 24$, außer Vergleich AUT-CTL ($n = 22$).

D.1.5 Subjektive Beurteilung der Adaptierungsstrategien

Subjektive Nützlichkeit der Adaptierungsstrategien

Context-Sensitive Help, Visual Cueing und Decluttering wurden von einer Mehrheit (jeweils $>70\%$) der Probanden als etwas oder sehr hilfreich beschrieben (vgl. Abbildung 65).

Automation und Scheduling wurden überwiegend als weder hilfreich noch störend bewertet. Etwa jeder vierte Proband empfand Automation, Visual Cueing und Decluttering als störend.

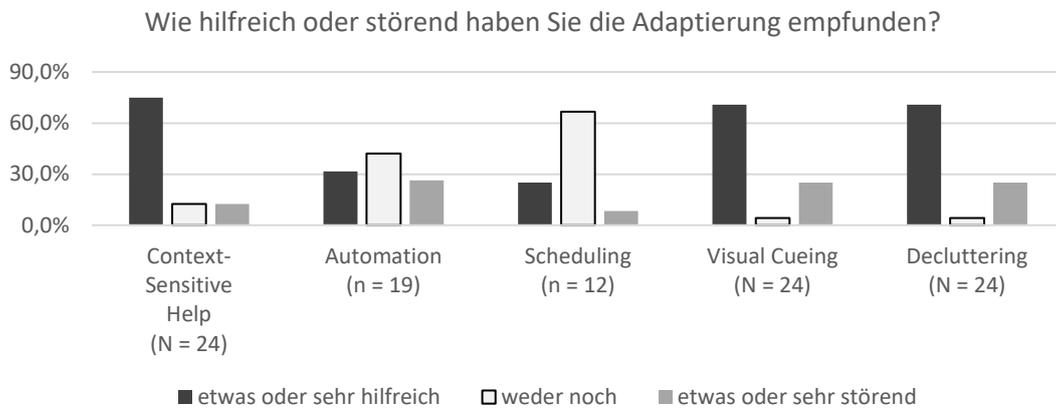


Abbildung 65. Subjektive Beurteilung der Nützlichkeit der Adaptierungen

Subjektiver Einfluss der Adaptierungsstrategien auf die Leistung

Context-Sensitive Help, Visual Cueing und Decluttering empfanden etwa vier von fünf Probanden als etwas oder sehr leistungssteigernd (vgl. Abbildung 66). Für Automation und Scheduling wurde von den meisten Probanden kein Einfluss auf die Leistung bemerkt. Dabei wurde Scheduling jedoch entweder positiv oder neutral bewertet, während knapp jeder fünfte Proband (21.1%) die Automationsstrategie als leistungsmindernd empfand.

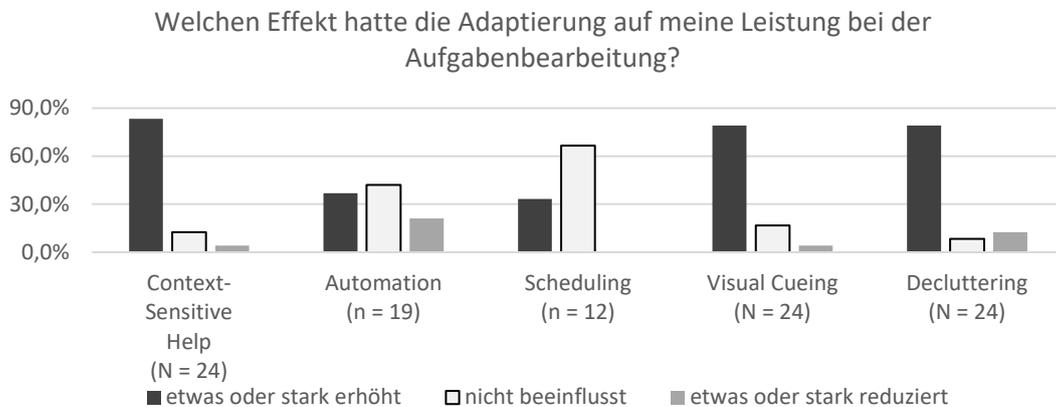


Abbildung 66. Subjektiver Einfluss der Adaptierungen auf die Leistung

Subjektiver Einfluss der Adaptierungsstrategien auf die Beanspruchung

Den Effekt auf die Beanspruchung bewerteten etwa zwei von drei Probanden für Context-Sensitive Help, Visual Cueing und Decluttering als positiv (vgl. Abbildung 67). Für Automation und Scheduling wurde von etwa zwei von drei Probanden kein Einfluss auf die Leistung bemerkt. Scheduling wurde dabei durchweg positiv oder neutral bewertet. Für die Automationsstrategie gaben jedoch nur 10.5% der Probanden eine Reduzierung der Beanspruchung an, während doppelt so viele (21.1%) empfanden, dass die Beanspruchung durch die Strategie gestiegen sei.

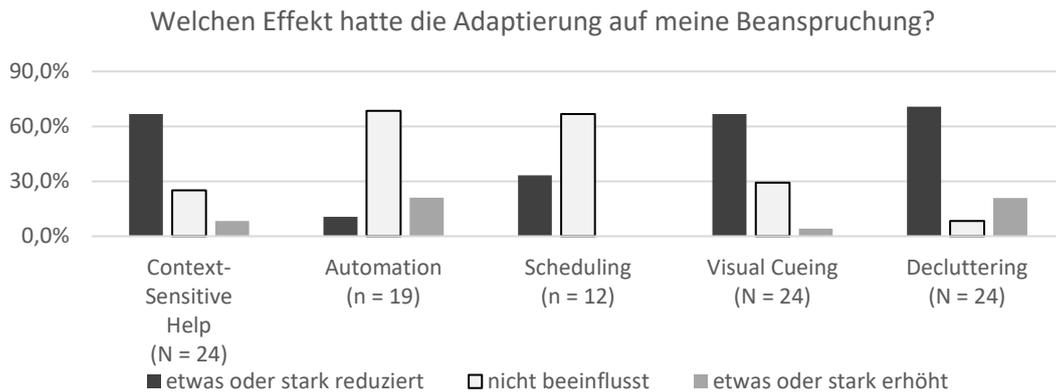


Abbildung 67. Subjektiver Einfluss der Adaptierungen auf die Beanspruchung

Subjektiver Einfluss der Adaptierungsstrategien auf die Aufmerksamkeit

Mit aktiver Context-Sensitive-Help-Strategie empfanden zwei Drittel der Probanden eine Verbesserung ihrer Aufmerksamkeit (vgl. Abbildung 68). Für Visual Cueing und Decluttering waren es sogar 79.2%. Bei Automation und Scheduling wurde von den meisten Probanden kein Einfluss auf die Aufmerksamkeit bemerkt. Scheduling wurde jedoch überwiegend neutral (83.3%) und im Übrigen positiv bewertet, während knapp jeder dritte Proband (31.6%) die Automationsstrategie als nachteilig für die Aufmerksamkeit empfand.

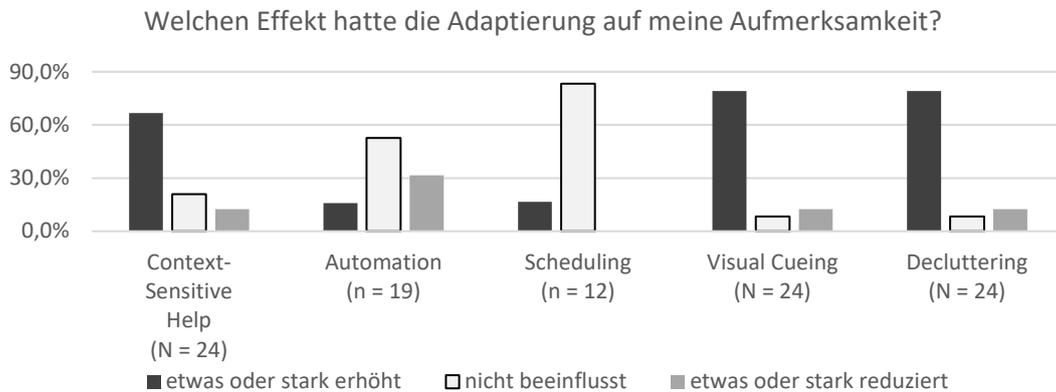


Abbildung 68. Subjektiver Einfluss der Adaptierungen auf die Aufmerksamkeit

D.2 Ergebnisse der Post-hoc-Untersuchungen

Eine gegenüber der Voruntersuchung um ca. 40% erhöhte Aufgabendichte sollte sicherstellen, dass nicht nur moderate, sondern hohe Beanspruchung induziert wurde. Um den tatsächlichen Effekt der erhöhten Aufgabendichte zu überprüfen, wird in Abschnitt D.2.1 die objektive Beanspruchung in den Kontrollbedingungen von Voruntersuchung und Experiment 1 verglichen. Abschnitt D.2.2 beschreibt eine Post-hoc-Analyse, welche die Analyse von Hypothese H1a substituiert.

D.2.1 Vergleich der Beanspruchung zwischen Voruntersuchung und Experiment 1

Weil in den verschiedenen Testphasen der Voruntersuchung unterschiedliche Nutzerzustandsdimensionen induziert worden waren, wurde für den Vergleich nur die

Kontrollbedingung der Testphase BA herangezogen. In dieser Testphase sollten hohe Beanspruchung und falsch gerichtete Aufmerksamkeit gleichzeitig hervorgerufen werden, wodurch sie der Anforderungssituation von Experiment 1 am ähnlichsten war. Da die Kontrollbedingung nun 8 Minuten dauerte, in der Voruntersuchung aber nur 5 Minuten umfasste, wurden die prozentualen Zeitanteile bestimmt, in denen jeweils kritisch hohe Beanspruchung diagnostiziert wurde. Trotz unterschiedlicher Stichprobengrößen konnte ein t-Test für unabhängige Stichproben berechnet werden, da die Voraussetzungen erfüllt waren.

Mittelwerte und Mediane der prozentualen Anteile kritischer Zustandsausprägungen sind für beide Experimente in Abbildung 69 dargestellt. Mit durchschnittlich 50.0% war der Zeitanteil hoher Beanspruchung in Experiment 1 signifikant höher als die 32.0% in der Testphase BA der Voruntersuchung ($t(52) = -3.06, p < .01, r = .39$). Die Steigerung weist auf einen überproportionalen Anstieg der Beanspruchung hin, wenn die Aufgabendichte erhöht wird.

Der Vollständigkeit halber wurden auch die prozentualen Zeitanteile der falsch gerichteten Aufmerksamkeit in beiden Kontrollbedingungen verglichen. Der Anteil falsch gerichteter Aufmerksamkeit verringerte sich um 6%, es lag jedoch keine signifikante Veränderung vor. Insoweit wurde das Ziel, durch Erhöhung der Aufgabendichte die Beanspruchung zu steigern, erreicht, ohne auch die Aufmerksamkeit zu beeinflussen.

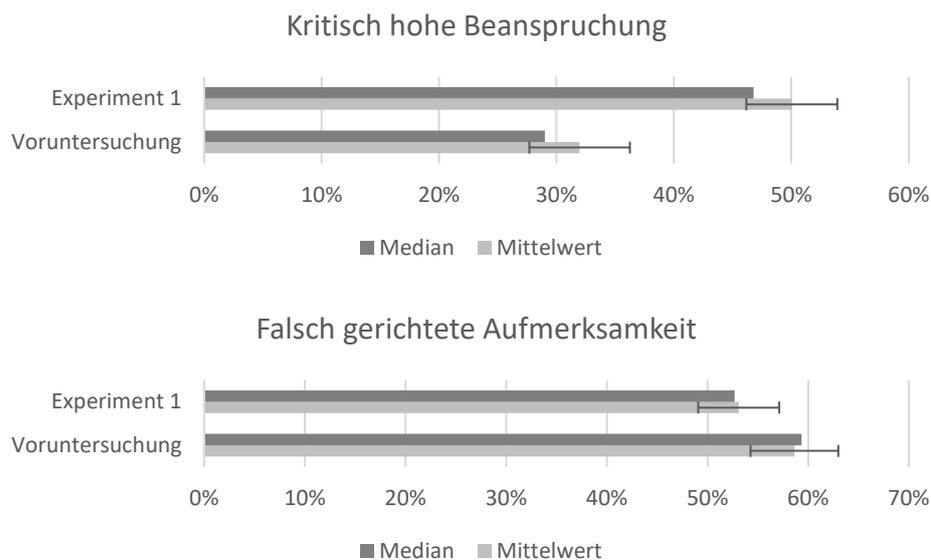


Abbildung 69. Mediane und Mittelwerte (mit Standardfehler) der prozentualen Anteile kritischer Nutzerzustandsausprägungen in Voruntersuchung und Experiment 1

D.2.2 Wirkung auf die Anzahl rechtzeitig bearbeiteter Aufgaben

Hypothese H1a konnte nicht untersucht werden, da ein Logging-Fehler vorlag und die nötigen Variablen auch nicht aus den Rohdaten rekonstruiert werden konnten (vgl. Abschnitt 5.1.5). Aus diesem Grund wurde eine Post-hoc-Analyse durchgeführt, bei der alternativ die Anzahl *rechtzeitig bearbeiteter* Aufgaben (d.h. die Anzahl der Aufgaben, die keinen Leistungseinbruch ausgelöst haben) untersucht wurde. Im Folgenden werden die Ergebnisse für die einzelnen Aufgaben berichtet, eine Ergebnisübersicht findet sich in Tabelle 47 am Ende dieses Abschnitts.

Anzahl rechtzeitig bearbeiteter Bekämpfungsaufgaben

Im Mittel wurden über alle Bedingungen hinweg 8.99 Bekämpfungsaufgaben pro Bedingung mit einem Minimum von 6 (Automation, Scheduling, Kontrollbedingung) und einem Maximum von 12 (Scheduling) rechtzeitig bearbeitet. Die Kontrollbedingung ($M = 8.83$, $SD = 1.27$) wies den geringsten Mittelwert rechtzeitig bearbeiteter Bekämpfungen auf, während diese Anzahl bei Visual Cueing ($M = 9.25$, $SD = 0.94$) am höchsten war. Statistisch waren die Unterschiede zwischen der Kontrollbedingung und den Adaptierungsbedingungen jedoch nicht signifikant (alle $ps > .237$, alle $|r|s < .21$).

Anzahl rechtzeitig bearbeiteter Warnaufgaben

Im Mittel wurden 10.13 Warnaufgaben pro Bedingung mit einem Minimum von 5.00 (Scheduling) und einem Maximum von 13.00 (Context-Sensitive Help, Scheduling, Visual Cueing, Decluttering, Kontrollbedingung) in der zulässigen Zeit bearbeitet. Der Median der Anzahl rechtzeitig bearbeiteter Warnaufgaben war in der Kontrollbedingung ($Median = 9.5$, $M = 9.71$, $SD = 2.31$) am geringsten, bei den Mittelwerten zeigte sich ein ähnliches Bild: lediglich mit Automation ($M = 9.64$, $SD = 1.59$) ist der Mittelwert noch geringer. Auch bei den Warnaufgaben wurden im Mittel mit Visual Cueing ($M = 10.71$, $SD = 1.23$) die meisten Aufgaben rechtzeitig bearbeitet. Hier war im Vergleich zur Kontrollbedingung ein statistischer Trend zu einer höheren Anzahl rechtzeitig bearbeiteter Warnaufgaben erkennbar ($t(23) = -1.85$, $p = .078$, $r = .36$). Die übrigen Vergleiche zwischen der Kontrollbedingung und den Adaptierungsbedingungen wurden statistisch nicht signifikant (alle $ps > .211$, alle $|r|s < .26$).

Anzahl rechtzeitig bearbeiteter Identifizierungsaufgaben

Im Mittel wurden insgesamt 18.18 Identifizierungsaufgaben pro Bedingung mit einem Minimum von 0.00 (Kontrollbedingung) und einem Maximum von 26.00 (Decluttering) rechtzeitig bearbeitet. Mit Automation ($M = 19.73$, $SD = 3.91$) wurden deskriptiv deutlich mehr Identifizierungsaufgaben rechtzeitig bearbeitet als in der Kontrollbedingung ($M = 17.71$, $SD = 5.69$), der Vergleich wurde aber nicht signifikant, obwohl er eine mittlere Effektstärke aufwies ($t(21) = -1.67$, $p = .109$, $r = .34$). Auch bei den übrigen Strategien wurden im Mittel mehr Identifizierungsaufgaben rechtzeitig bearbeitet. Nur mit Visual Cueing ($M = 17.33$, $SD = 4.20$) war die mittlere Anzahl deskriptiv geringer als in der Kontrollbedingung. Sämtliche Unterschiede zwischen der Kontrollbedingung und den Adaptierungsbedingungen waren jedoch statistisch nicht signifikant (alle $ps > .108$, alle $|r|s < .35$).

Anzahl rechtzeitig bearbeiteter NRTT-Aufgaben

Im Mittel wurden nur 0.33 NRTT-Aufgaben pro Bedingung mit einem Minimum von 0.00 (alle Bedingungen) und einem Maximum von 3.00 (Kontrollbedingung) rechtzeitig bearbeitet. Die Mehrheit der Probanden (67% bei Visual Cueing und Context-Sensitive Help, 88% bei Decluttering) bearbeitete sogar keine NRTT-Aufgabe in dem dafür vorgesehenen Zeitrahmen, was dazu führte, dass die Mediane aller Bedingungen bei 0 liegen. Mit Decluttering ($M = 0.17$, $SD = 0.48$) wurden marginal signifikant weniger NRTT-Aufgaben rechtzeitig bearbeitet als in der Kontrollbedingung ($M = 0.42$, $SD = 0.78$; $z = -1.67$, $p = .096$, $N = 24$, $r = -.24$).

Allerdings wurden die statistischen Vergleiche zwischen der Kontrollbedingung und den Adaptierungsbedingungen nicht signifikant (alle $ps > .300$, alle $|r|s < .16$).

Tabelle 47. Ergebnisse der Vergleiche von Anzahl, durchschnittlicher und kumulierter Präsenzdauer aller Teilaufgaben zwischen Adaptierungen und der Kontrollbedingung

	Anzahl Bekämpfen			Anzahl Warnen		
	<i>Median</i>	<i>M (SD)</i>	<i>p (r)</i>	<i>Median</i>	<i>M (SD)</i>	<i>p (r)</i>
CSH	9	9.13 (0.85)	.317 (.21)	10.5	10.25 (1.65)	.345 (.20)
AUT	9	8.82 (1.22)	.780 (.06)	10.0	9.64 (1.59)	.782 (.06)
SCH	9	9.04 (1.33)	.365 (.13)	10.0	10.00 (2.25)	.424 (.17)
CUV	9	9.25 (0.94)	.238 (.17)	10.5	10.71 (1.23)	.078 (.36)
DEC	9	8.88 (0.90)	.726 (.05)	10.5	10.50 (1.32)	.212 (.26)
CTL	9	8.83 (1.27)	-	9.5	9.71 (2.31)	-
	Anzahl Identifizieren			Anzahl NRTT		
	<i>Median</i>	<i>M (SD)</i>	<i>p (r)</i>	<i>Median</i>	<i>M (SD)</i>	<i>p (r)</i>
CSH	19	17.54 (5.90)	.890 (.02)	0	0.46 (0.72)	.803 (.04)
AUT	19	19.73 (3.91)	.109 (.34)	0	0.23 (0.53)	.301 (.16)
SCH	20.5	18.33 (4.44)	.769 (.04)	0	0.29 (0.55)	.317 (.14)
CUV	19	17.33 (4.20)	.246 (.17)	0	0.42 (0.65)	1.00 (<.01)
DEC	18	18.46 (4.75)	.476 (.15)	0	0.17 (0.48)	.096 (.24)
CTL	19	17.71 (5.69)	-	0	0.42 (0.78)	-

Anmerkungen: CSH = Context-Sensitive Help, AUT = Automation, SCH = Scheduling, CUV = Visual Cueing, DEC = Decluttering. $N = 24$, außer Vergleich AUT-CTL ($n = 22$).

Anhang E. Material zu Experiment 2

E.1 Instruktion

Das Deckblatt der Instruktionen sowie die Aufgabenbeschreibung wurden für Experiment 2 leicht angepasst (siehe unten). Die Erläuterungen zur Priorität der Aufgaben entsprach den vorangegangenen Untersuchungen (siehe Anhang A.5) und ist daher nicht erneut aufgeführt.

Liebe(r) Versuchsteilnehmer(in),

vielen Dank für Ihre Bereitschaft, an unserem Versuch teilzunehmen!

In diesem Experiment passen wir die Funktionsweise und das Verhalten des technischen Systems bedarfsgerecht an, um kritischen Nutzerzuständen entgegenzuwirken. Wir möchten untersuchen, ob die von uns entwickelten Methoden zur dynamischen Adaptierung der Interaktion in der Lage sind, den Nutzer bei der Bearbeitung der Aufgabe effektiv zu unterstützen.

Für die Diagnose kritischer Nutzerzustände verwenden wir in diesem Experiment als physiologische Sensoren einen Eye Tracker und einen Brustgurt. Mit dem Eye Tracker werden Blickbewegungen sowie die Pupillenweite erfasst. Mit dem Brustgurt werden verschiedene Vitalfunktionen, wie die Herzrate, die Atmungsrate, die Neigung des Oberkörpers und die Körpertemperatur aufgezeichnet, die als Indikatoren für Nutzerzustände herangezogen werden können. Das Bild der Webcam wird zur automatisierten Klassifikation von Emotionen in der Mimik genutzt diese fließen nicht in die Diagnose ein. Weiterhin werden Merkmale der Aufgabe (z.B. Anzahl und Art der zu bearbeitenden Aufgaben) und verhaltensbasierte Maße (Mausklicks, Dauer der Aufgabebearbeitung) von der Diagnosekomponente erfasst und ausgewertet.

Im Sinne eines adaptiven Systems werden bei Vorliegen bestimmter Parameter je nach Szenario verschiedene Adaptierungen dynamisch ausgelöst und unterstützen die Aufgabebearbeitung, wenn das System dies anhand der Diagnoseergebnisse für zielführend erachtet. Am Ende jedes Szenarios wird ein Fragebogen dargeboten.

Der Ablauf der Untersuchung gliedert sich folgendermaßen:

- Einweisung in die Aufgabe
- Fragebogen zur Person und zum momentanen Befinden
- Anpassen und Kalibrieren der physiologischen Sensoren
- Übungsszenario
- Versuchsdurchführung mit Bearbeitung von zwei Szenarien (insg. 48 Minuten zzgl. Fragebögen nach jedem Szenario)

Insgesamt wird die Untersuchungsdauer ca. 1 Stunden und 45 Minuten betragen.

Viel Spaß und viel Erfolg!

WICHTIG!

**Bitte andere Kollegen nicht über die Inhalte des Experiments informieren!
Für uns ist es wichtig, dass die Versuchsteilnehmer den Szenarioverlauf vorher nicht kennen.**

Danke!

Beschreibung der Experimentalaufgabe

Bei der Experimentalaufgabe übernehmen Sie die Rolle eines Marineoperators, der Luftkontakte („Tracks“) auf einem simulierten Radarbildschirm („Tactical Display Area“, kurz: TDA) überwacht. Die Aufgabe beinhaltet verschiedene Teilaufgaben, die im Folgenden kurz erläutert werden. Wie diese Aufgaben ausgeführt werden können, wird Ihnen während des Übungsszenarios gezeigt.

Für die Bearbeitung der Aufgaben steht unterschiedlich viel Zeit zur Verfügung.

Identifizierung (30 Sek.)

Noch nicht identifizierte Kontakte erscheinen als gelbe Symbole auf der TDA. Diese müssen anhand von ID-Kriterien (siehe 2. Blatt) als „friendly“ (freundlich), „hostile“ (feindlich), oder „neutral“ (zivil) identifiziert werden.

ACHTUNG: Ändern bereits identifizierte Kontakte ihr Verhalten, so dass dies eine Änderung ihrer Identität notwendig macht, müssen diese umidentifiziert werden.

Anlegen von NRT-Tracks (30 Sek.)

Von Zeit zu Zeit müssen sogenannte „Non-real-time tracks“ (NRTTs) manuell auf der TDA angelegt werden. Dies wird durch einen Briefumschlag im NRTT-Bildschirmsegment links unten sowie durch einen kleinen Briefumschlag am Cursor angezeigt. Bei Klick auf den Briefumschlag im NRTT-Segment erscheinen Informationen, die für das Anlegen des NRTT benötigt werden (Identität, Koordinaten, Geschwindigkeit, Höhe, Flugrichtung). Das Anlegen eines NRTT-Tracks wird im Rahmen eines Übungsszenarios erläutert. Die NRTT-Aufgaben müssen sequenziell bearbeitet werden, d.h. die obere Aufgabe muss als „erledigt“ markiert werden, bevor der nächste Umschlag geöffnet werden kann.

Warnung (20 Sek.)

Sobald feindliche („hostile“) Kontakte in die Identification Safety Range (ISR) des Eigenschiffs eindringen, müssen sie durch Drücken der entsprechenden Schaltfläche gewarnt werden. Die ISR ist auf der TDA durch einen blauen Kreis kenntlich gemacht.

Bekämpfung (10 Sek.)

Feindliche („hostile“) Kontakte, die trotz Warnung weiter auf das Eigenschiff zufliegen, müssen durch Drücken des „Fire“-Buttons bekämpft werden, sobald sie in die Weapon Range (WR) eindringen. Die Weapon Range ist auf der TDA durch einen roten Kreis um das Eigenschiff kenntlich gemacht.

Sollte der Kontakt trotz Bekämpfung bestehen bleiben, war die Bekämpfung erfolglos. In diesem Fall bitte den Track erneut identifizieren und den „Fire“-Button drücken.

E.2 Verständnisfragebogen

Alle Fragen wurden einzeln und elektronisch dargereicht. Die Eingabe wurde mittels einer „Weiter“-Schaltfläche bestätigt.

Bitte kreuzen Sie an, ob es sich um eine wahre oder falsche Aussage handelt:
 NRTT Aufgaben haben eine höhere Priorität als das Identifizieren von Objekten außerhalb der Identification Safety Range (ISR).

<input type="checkbox"/>	wahr
<input type="checkbox"/>	falsch

Bitte kreuzen Sie an, ob es sich um eine wahre oder falsche Aussage handelt:
 Ich kann mich immer auf die Unterstützung durch das System verlassen.

<input type="checkbox"/>	wahr
<input type="checkbox"/>	falsch

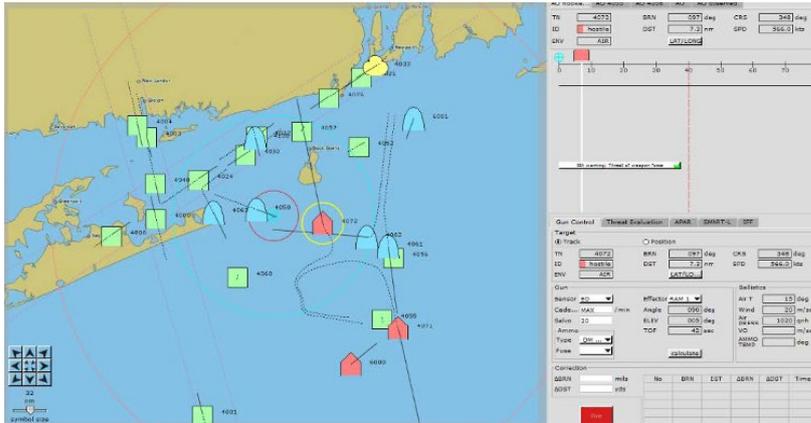
Bitte kreuzen Sie an, ob es sich um eine wahre oder falsche Aussage handelt:
 Alle Aufgaben müssen sofort bearbeitet werden.

<input type="checkbox"/>	wahr
<input type="checkbox"/>	falsch

Bitte wählen Sie die richtige Bearbeitungszeit aus, die für die jeweiligen Aufgaben zur Verfügung stehen.

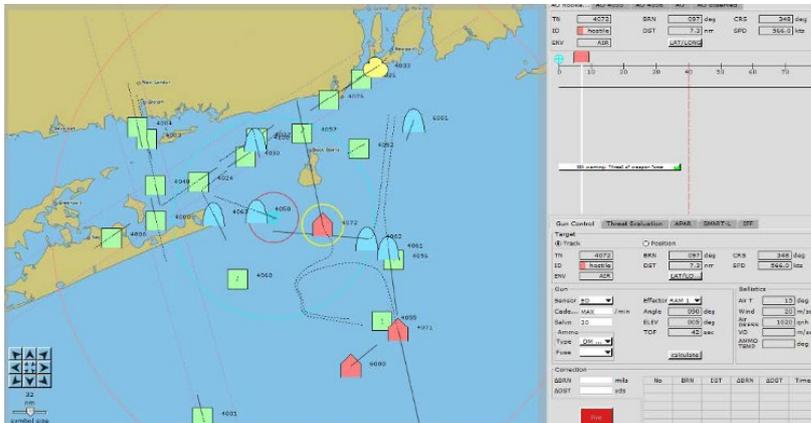
<input type="checkbox"/>	Bekämpfen: 5 Sekunden; Warnen: 10 Sekunden, Identifizieren: 30 Sekunden, NRTT: 30 Sekunden
<input type="checkbox"/>	Bekämpfen: 5 Sekunden; Warnen: 20 Sekunden, Identifizieren: 30 Sekunden, NRTT: 30 Sekunden
<input type="checkbox"/>	Bekämpfen: 10 Sekunden; Warnen: 20 Sekunden, Identifizieren: 30 Sekunden, NRTT: 30 Sekunden
<input type="checkbox"/>	Bekämpfen: 10 Sekunden; Warnen: 20 Sekunden, Identifizieren: 40 Sekunden, NRTT: 30 Sekunde

Welche Aufgabe hat der ausgewählte Kontakt im dargestellten Bild?



- Engage
- Warn
- Identifizieren innerhalb der ISR
- Identifizieren außerhalb der ISR
- Der ausgewählte Kontakt hat derzeit keine Aufgabe

Welche Aufgabe hat im dargestellten Bild momentan die höchste Priorität?



- Engage
- Warn
- Identifizieren innerhalb der ISR
- Identifizieren außerhalb der ISR
- Der ausgewählte Kontakt hat derzeit keine Aufgabe

E.3 Beschreibung der Adaptierungsstrategien

Die Beschreibung wurde vollständig vor Beginn des ersten Szenarios dargereicht.

Im Experiment werden visuelle und nicht visuelle Adaptierungsstrategien untersucht.

Die folgenden Adaptierungsstrategien können auftreten, falls das System diese als zielführend erachtet. Die Adaptierungsstrategien können gar nicht, einzeln oder gleichzeitig auftreten.

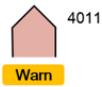
Automatisierte Identifizierung:

Bei hoher Beanspruchung übernimmt das System die Identifizierung bestimmter Tracks. Automatisiert identifizierte Tracks werden durch ein *Fragezeichen über der Tracknummer* gekennzeichnet. Der Nutzer sollte die Identität manuell bestätigen, sobald sein Beanspruchungsgrad es zulässt. Wurde die Identität bestätigt, verschwindet das Fragezeichen.



Hinweis auf die durchzuführende(n) Aufgabe(n):

Bei stockender Aufgabenbearbeitung weist ein oranger Balken unter dem Track auf den aktuell wichtigsten Arbeitsschritt hin. Ist die wichtigste Aufgabe das Anlegen eines NRTT, wird der Briefumschlag (auch am Cursor) orange hinterlegt.



Hinweis auf Aufgabe am Track



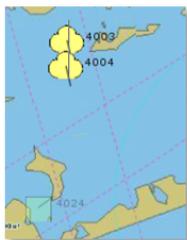
Hinweis auf NRTT am Cursor

Hinweis auf Aufgabe mit hoher Priorität:

Ein roter Pfeil führt vom Mauszeiger zur wichtigsten Aufgabe.

Ablenkung durch unwichtige Tracks verringern:

Die Auffälligkeit von Tracks ohne zu bearbeitende Aufgaben wird durch halbtransparente Darstellung reduziert.



Nicht visuelle Adaptierungsstrategien

Bei nicht visuellen Adaptierungsstrategien werden Aufgaben mit niedriger Priorität ggf. verzögert dargestellt.

E.4 Post-Test Fragebögen

Alle Fragen wurden einzeln elektronisch dargereicht. Zu jeder Frage gehörte ein Kommentarfeld für Anmerkungen. Die Eingabe wurde mittels einer „Weiter“-Schaltfläche bestätigt.

Training / Baseline:

Der Post-Test-Fragebogen zur Training/Baseline-Phase wurden unverändert von Experiment 1 übernommen (Anhang C.4).

Kontrollbedingung und Adaptierungsbedingung:

Wie sehr mussten Sie sich anstrengen, um die gestellten Aufgaben zu erfüllen?

sehr wenig			wenig			mittel			stark			sehr stark		

Wie bewerten Sie den Grad Ihrer Erschöpfung durch die Aufgabe?

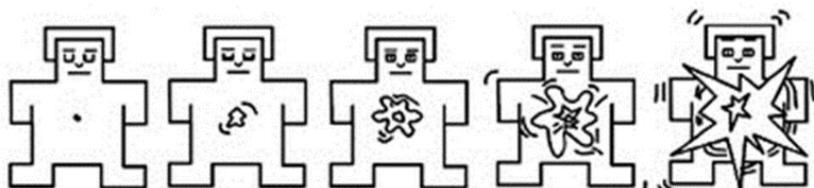
sehr gering			gering			mittel			hoch			sehr hoch		

Wie beurteilen Sie Ihren Gefühlszustand?



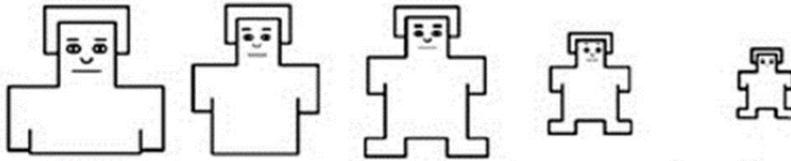
sehr schlecht			schlecht			mittel			gut			sehr gut		

Wie beurteilen Sie Ihren Erregungszustand?



sehr gering			gering			mittel			hoch			sehr hoch		

Wie beurteilen Sie Ihr Gefühl der Dominanz und Kontrolle?



sehr hoch			hoch			mittel			gering			sehr gering		

Wie hilfreich oder störend haben Sie die Adaptierungsstrategie empfunden?

sehr hilfreich			etwas hilfreich			weder hilfreich noch störend			etwas störend			sehr störend			Keine Adaptierung aufgetreten		

Welchen Effekt hatte die Adaptierungsstrategie auf meine Leistung bei der Aufgabenbearbeitung? Meine Leistung wurde durch die Adaptierung...

stark erhöht			etwas erhöht			nicht beeinflusst			etwas reduziert			stark reduziert			Keine Adaptierung aufgetreten		

Welchen Effekt hatte die Adaptierungsstrategie auf meine Beanspruchung? Meine Beanspruchung wurde durch die Adaptierung...

stark erhöht			etwas erhöht			nicht beeinflusst			etwas reduziert			stark reduziert			Keine Adaptierung aufgetreten		

Welchen Effekt hatte die Adaptierungsstrategie auf meine Aufmerksamkeit? Die Ausrichtung meiner Aufmerksamkeit wurde durch die Adaptierung...

stark erhöht			etwas erhöht			nicht beeinflusst			etwas reduziert			stark reduziert			Keine Adaptierung aufgetreten		

Haben Sie weitere Anmerkungen/Vorschläge/Ideen? Z. B. Wie die Adaptierung verbessert werden könnte _____

Anhang F. Ergebnisse zu Experiment 2

F.1 Ergebnisübersicht zur hypothesenprüfenden Untersuchung

Tabelle 48. Anzahl, durchschnittliche und kumulierte Dauer von Leistungseinbrüchen, Aufgabebearbeitung und Episoden kritischer Nutzerzustände über alle Teilaufgaben hinweg

	Anzahl			Durchschn. Präsenzdauer (s)			Kumulierte Präsenzdauer (s)		
	<i>Median</i>	<i>M (SD)</i>	<i>p (r)</i>	<i>Median</i>	<i>M (SD)</i>	<i>p (r)</i>	<i>Median</i>	<i>M (SD)</i>	<i>p (r)</i>
Leistungseinbrüche (H1; Abschnitt 6.2.1)									
Adapt.	24.0	26.50 (7.16)	.044	29.58	32.86 (28.66)	.535	754.5	846.94 (600.06)	.234 (.21)
Kontr.	28.0	35.06 (20.71)	(.49)	27.81	43.21 (41.28)	(.11)	704.0	2176.75 (3239.78)	
Aufgaben (H2; Abschnitt 6.2.2)									
Adapt.	142.5	138.44 (14.67)	.006	28.65	29.56 (15.36)	.717	2102.5	2246.06 (599.88)	.215 (.22)
Kontr.	125.5	118.31 (21.87)	(.63)	23.82	37.10 (29.72)	(.06)	1686.0	2746.94 (2707.85)	
Episoden kritisch hoher Beanspruchung (H3; Abschnitt 6.2.3)									
Adapt.	33.0	30.81 (11.67)	.117	17.81	16.23 (7.98)	.010	585.0	547.13 (314.41)	.008 (.62)
Kontr.	25.0	24.5 (9.35)	(.39)	24.93	56.05 (101.20)	(.46)	725.0	756.19 (352.70)	
Episoden falsch gerichteter Aufmerksamkeit (H3; Abschnitt 6.2.3)									
Adapt.	56.5	56.63 (11.95)	.755	10.24	11.22 (3.33)	.123	574.0	634.13 (215.32)	.064 (.46)
Kontr.	60.0	58.06 (16.81)	(.08)	12.23	14.14 (6.40)	(.39)	771.5	800.31 (321.36)	

Anmerkungen: Adapt. = Adaptierungsbedingung, Kontr. = Kontrollbedingung. $N = 16$.

F.2 Ergebnisübersicht zur Bearbeitung der Teilaufgaben

Bekämpfen

Tabelle 49. Ergebnisse zu bearbeiteter Anzahl und Präsenzdauer von Bekämpfungsaufgaben und assoziierten Leistungseinbrüchen

	Anzahl			Durchschn. Präsenzdauer (s)			Kumulierte Präsenzdauer (s)		
	Median	M (SD)	p (r)	Median	M (SD)	p (r)	Median	M (SD)	p (r)
Aufgaben									
Adapt.	28.5	28.50 (0.52)	.467 (.13)	1.93	2.05 (0.70)	.352 (.17)	55.0	58.31 (19.65)	.339 (.16)
Kontr.	28.0	28.25 (0.77)		1.66	2.04 (1.28)		48.0	57.63 (35.76)	
Leistungseinbrüche									
Adapt.	0	0.44 (0.73)	.084 (.31)	0	1.03 (1.83)	.042 (.36)	0	1.50 (2.99)	.063 (.33)
Kontr.	0	1.00 (1.55)		0	2.68 (3.94)		0	6.13 (10.26)	

Anmerkungen: Adapt. = Adaptierungsbedingung, Kontr. = Kontrollbedingung. N = 16.

Warnen

Tabelle 50. Ergebnisse zu bearbeiteter Anzahl und Präsenzdauer von Warnaufgaben und assoziierten Leistungseinbrüchen

	Anzahl			Durchschn. Präsenzdauer (s)			Kumulierte Präsenzdauer (s)		
	Median	M (SD)	p (r)	Median	M (SD)	p (r)	Median	M (SD)	p (r)
Aufgaben									
Adapt.	34.0	34.00 (0.52)	.414 (.14)	4.90	5.88 (2.53)	.109 (.28)	167.0	200.38 (85.96)	.109 (.28)
Kontr.	34.0	33.88 (0.62)		6.37	8.50 (6.86)		216.5	289.81 (235.87)	
Leistungseinbrüche									
Adapt.	2.0	2.56 (2.45)	.321 (.26)	5.25	5.80 (3.55)	.004 (.66)	7.0	19.81 (25.03)	.023 (.40)
Kontr.	3.0	3.56 (3.71)		13.42	16.02 (12.50)		49.0	93.5 (151.68)	

Anmerkungen: Adapt. = Adaptierungsbedingung, Kontr. = Kontrollbedingung. N = 16.

Identifizieren

Tabelle 51. Ergebnisse zu bearbeiteter Anzahl und Präsenzdauer von Identifizierungsaufgaben und assoziierten Leistungseinbrüchen

	Anzahl			Durchschn. Präsenzdauer (s)			Kumulierte Präsenzdauer (s)		
	Median	M (SD)	p (r)	Median	M (SD)	p (r)	Median	M (SD)	p (r)
Aufgaben									
Adapt.	73.5	68.38 (14.30)	.010 (.61)	16.88	16.93 (4.49)	.039 (.37)	1179.5	1186.94 (410.60)	.469 (.13)
Kontr.	57.0	50.31 (20.24)		18.50	39.14 (48.40)		993.5	1757.81 (2360.87)	
Leistungseinbrüche									
Adapt.	14.0	15.00 (5.49)	.014 (.43)	16.09	16.92 (5.40)	.006 (.48)	222.0	264.88 (175.19)	.007 (.48)
Kontr.	16.5	22.56 (16.04)		22.32	38.45 (42.94)		402.5	1471.50 (2733.72)	

Anmerkungen: Adapt. = Adaptierungsbedingung, Kontr. = Kontrollbedingung. N = 16.

NRTT-Aufgaben

Tabelle 52. Ergebnisse zu bearbeiteter Anzahl und Präsenzdauer von NRTT-Aufgaben und assoziierten Leistungseinbrüchen

	Anzahl			Durchschn. Präsenzdauer (s)			Kumulierte Präsenzdauer (s)		
	Median	M (SD)	p (r)	Median	M (SD)	p (r)	Median	M (SD)	p (r)
Aufgaben									
Adapt.	8.0	7.56 (1.75)	.010 (.46)	89.02	93.39 (61.59)	.959 (.01)	723.5	800.44 (569.46)	.134 (.27)
Kontr.	5.0	5.88 (1.75)		71.95	98.72 (82.65)		394.5	641.69 (636.04)	
Leistungseinbrüche									
Adapt.	9.0	8.50 (1.51)	.218 (.32)	51.18	61.46 (58.85)	.918 (.02)	491.0	560.75 (545.16)	.959 (.01)
Kontr.	8.5	7.94 (2.18)		41.79	68.09 (79.23)		326.5	605.63 (729.94)	

Anmerkungen: Adapt. = Adaptierungsbedingung, Kontr. = Kontrollbedingung. N = 16.

Fehler in der Identifizierungsaufgabe

Tabelle 53. Ergebnisse zu Anzahl und Präsenzdauer von Identifizierungsfehlern und assoziierten Leistungseinbrüchen

	Anzahl			Durchschn. Präsenzdauer (s)			Kumulierte Präsenzdauer (s)		
	Median	M (SD)	p (r)	Median	M (SD)	p (r)	Median	M (SD)	p (r)
Aufgaben									
Adapt.	4.0	4.50 (2.23)	.466 (.13)	9.5	8.16 (11.93)	.069 (.32)	3.08	41.13 (69.11)	.074 (.32)
Kontr.	3.5	3.81 (3.44)		372.5	149.78 (183.33)		93.13	917.06 (1156.76)	
Leistungseinbrüche									
Adapt.	0	0.50 (1.03)	.090 (.30)	0	5.58 (12.76)	.028 (.39)	0	14.00 (36.62)	.028 (.39)
Kontr.	0	1.63 (2.73)		0	265.53 (362.68)		0	773.63 (1094.78)	

Anmerkungen: Adapt. = Adaptierungsbedingung, Kontr. = Kontrollbedingung. N = 16.

Identifizierung von Fakern

Tabelle 54. Ergebnisse zu bearbeiteter Anzahl und Präsenzdauer von Fakern sowie assoziierten Leistungseinbrüchen

	Anzahl			Durchschn. Präsenzdauer (s)			Kumulierte Präsenzdauer (s)		
	Median	M (SD)	p (r)	Median	M (SD)	p (r)	Median	M (SD)	p (r)
Aufgaben									
Adapt.	5.0	5 (0.00)	.083 (.31)	35.4	34.28 (7.44)	.007 (.48)	177.0	171.35 (37.20)	.007 (.48)
Kontr.	5.0	4.81 (0.40)		-	44.6		60.24 (49.38)	-	
Leistungseinbrüche									
Adapt.	3.0	3.13 (1.26)	.468 (.19)	41.8	42.81 (6.28)	.001 (.75)	133.5	134.56 (58.88)	.025 (.54)
Kontr.	3.0	3.38 (1.02)		-	53.2		56.26 (13.32)	-	

Anmerkungen: Adapt. = Adaptierungsbedingung, Kontr. = Kontrollbedingung. N = 16.

F.3 Ergebnisse zum Vergleich von Szenario 1 und Szenario 2

Leistungseinbrüche

Insgesamt (d.h. über alle Teilaufgaben hinweg) zeigten sich bezüglich der Leistungseinbrüche keine Unterschiede in den Szenarien. Die Anzahl der Leistungseinbrüche unterschied sich nicht signifikant zwischen den Szenarien ($z = -1.22$, $p = .221$, $N = 16$, $r = -.22$). Ebenso gab es keinen Effekt des Szenarios auf die kumulierte ($z = -0.03$, $p = .979$, $N = 16$, $r = -.01$) oder die durchschnittliche ($z = -1.03$, $p = .301$, $N = 16$, $r = .18$) Dauer von Leistungseinbrüchen.

Auf Teilaufgabenebene gab es in Szenario 2 bei Warnaufgaben marginal signifikant mehr Leistungseinbrüche als in Szenario 1 ($t(15) = -1.94$, $p = .071$, $r = .45$). Ebenso gab es in Szenario 2 signifikant mehr Leistungseinbrüche bei NRTT-Aufgaben als in Szenario 1 ($z = 2.96$, $p = .003$, $N = 16$, $r = .52$). Diese wurden jedoch auch marginal signifikant schneller beendet als in Szenario 1 ($z = -1.76$, $p = .079$, $N = 16$, $r = .31$). Bei allen anderen Variablen zu Leistungseinbrüchen in Teilaufgaben (Anzahl, durchschnittliche und kumulierte Dauer) zeigten sich keine signifikanten Unterschiede zwischen den beiden Szenarien (alle $ps > .172$).

Prioritätsbasierte Auswertung der Aufgabenbearbeitung

In Bezug auf die Bearbeitung korrekt priorisierter Aufgaben gab es zwischen den Szenarien keine signifikanten Unterschiede. Weder haben Probanden in einem Szenario insgesamt mehr Aufgaben korrekt priorisiert bearbeitet als im anderen ($t(15) = -0.32$, $p = .752$, $r = .08$), noch waren korrekt priorisierte Aufgaben in einem Szenario durchschnittlich ($z = -0.88$, $p = .379$, $N = 16$, $r = .16$) oder kumuliert ($z = -1.24$, $p = .215$, $N = 16$, $r = .22$) weniger Zeit präsent als im anderen. Obwohl Szenario 2 eine NRTT-Aufgabe mehr enthielt, wurden dort nicht signifikant mehr NRTT-Aufgaben korrekt priorisiert bearbeitet ($t(15) = 0.09$, $p = .932$, $r = .02$) und NRTT-Aufgaben waren auch nicht signifikant länger präsent als in Szenario 1 (durchschnittlich: $z = -1.34$, $p = .179$, $N = 16$, $r = -.24$, kumuliert: $z = -1.6$, $p = .109$, $N = 16$, $r = -.28$).

Bei der Analyse der Teilaufgabenbearbeitung der übrigen Aufgabenarten ergaben sich jedoch einige Unterschiede zwischen den beiden Szenarien. Zum einen waren korrekt priorisierte Warnaufgaben in Szenario 2 durchschnittlich ($z = -2.07$, $p = .039$, $N = 16$, $r = -.37$) und kumuliert ($z = -2.07$, $p = .039$, $N = 16$, $r = -.37$) signifikant länger präsent als in Szenario 1. Zum anderen wurden in Szenario 2 signifikant mehr Bekämpfungsaufgaben korrekt priorisiert bearbeitet als in Szenario 1 ($z = -3.64$, $p < .001$, $N = 16$, $r = -.64$). Aufgrund der bereits beschriebenen Deckeneffekte bei hoch priorisierten Aufgaben führte die zusätzliche Bekämpfung vermutlich zu Signifikanz. In allen anderen in diesem Zusammenhang untersuchten Variablen gab es keine signifikanten Unterschiede (alle $ps > .101$).

Kritisch ausgeprägte Nutzerzustandsdimensionen

Zwischen den Szenarien zeigten sich für keine Nutzerzustandsdimension signifikante Unterschiede in der Anzahl (alle $ps > .402$), der durchschnittlichen Dauer (alle $ps > .108$) und der kumulierten Dauer (alle $ps > .646$) kritischer Zustandsepisoden.