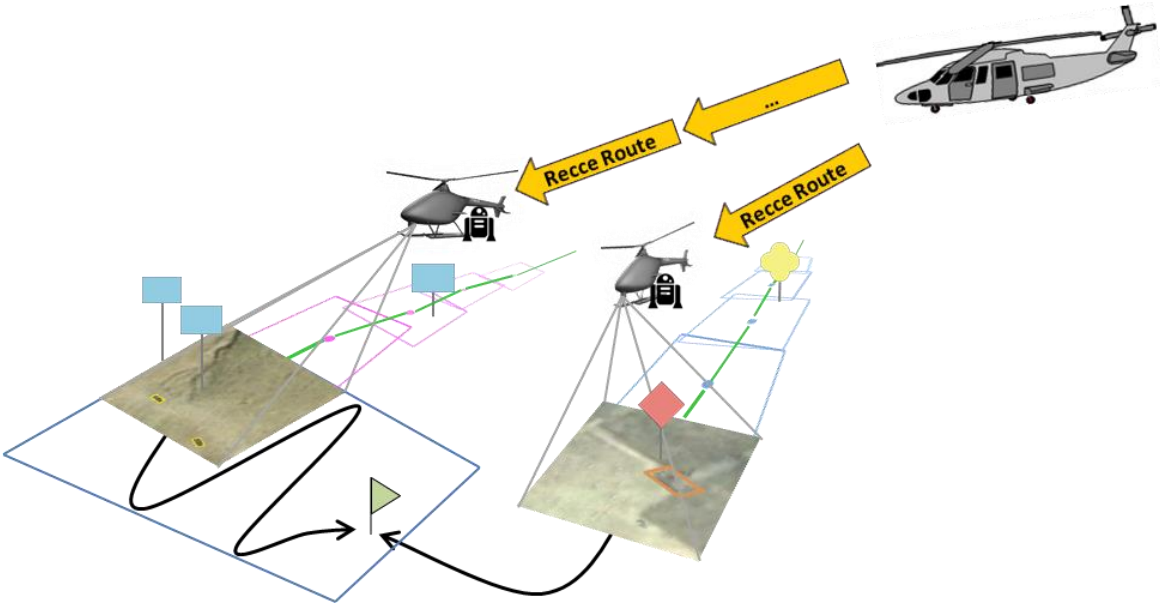
Universität der Bundeswehr München

Institut für Flugsysteme

Universität der Bundeswehr München
Fakultät für Luft- und Raumfahrttechnik
Institut für Flugsysteme

DISSERTATION



Adaptive Automationsmechanismen mit variablen Interaktions- und Präsentationsstrategien für Sensorsysteme auf unbemannten Aufklärungsflugplattformen

Christian Ruf

Adaptive Automationsmechanismen mit variablen Interaktions- und Präsentationsstrategien für Sensorsysteme auf unbemannten Aufklärungsflugplattformen

Dipl.-Ing. Univ. Christian Ruf

Vollständiger Abdruck der von der Fakultät für Luft- und Raumfahrttechnik
der Universität der Bundeswehr München zur Erlangung des akademischen Grades eines

Doktor-Ingenieurs (Dr.-Ing.)

genehmigten Dissertation.

Vorsitzender:	Univ.-Prof. Dr.-Ing. habil. Alexander Lion
1. Berichterstatter:	Univ.-Prof. Dr.-Ing. Peter Stütz
2. Berichterstatterin:	Univ.-Prof. Dr. Dipl.-Psych. Annette Kluge

Universität der Bundeswehr München

Institut für Flugsysteme IFS

Diese Dissertation wurde am 04.11.2021 bei der Universität der Bundeswehr München eingereicht und durch die Fakultät für Luft- und Raumfahrttechnik am 02.03.2022 angenommen.

Tag der mündlichen Prüfung: 29.04.2022

Danksagung

An dieser Stelle ergreife ich die Gelegenheit, meinen Dank für die mir entgegengebrachte Unterstützung und den starken Rückhalt während der Erstellung dieser Forschungsarbeit zum Ausdruck zu bringen.

An erster Stelle bedanke ich mich bei meinem Doktorvater Professor Peter Stütz für die Möglichkeit der Anfertigung dieser Arbeit am Institut für Flugsysteme und die fachliche Betreuung. Ebenso danke ich Frau Professorin Annette Kluge für die Übernahme des Korreferats.

Mein herzlicher Dank gilt meiner Familie, bei der ich immer wieder zur Ruhe kommen und neue Energie sammeln konnte. Oft waren es die Kleinen, die Großes bewirkt haben.

Ich danke meinen Projektkollegen für die gemeinsame Zeit und die erfolgreiche Zusammenarbeit, insbesondere Fabian Honecker.

Den Institutskollegen danke ich für die gemeinsamen Jahre, die Einblicke in spannende Themen und den Austausch. Ebenso den wissenschaftlichen Hilfskräften, Studentinnen und Studenten. Insbesondere bedanke ich mich bei Sophie von der Mülbe für die fachliche Inspiration und wertvollen Beiträge.

Kurzfassung

Diese Arbeit adressiert das Zusammenwirken von Operateuren und technischen Prozessen in Mensch-Maschine-Systemen, in welchen maschinell durchgeführte Prozesse potentiell fehlerbehaftet oder unvollständig sind. Im speziellen Anwendungsfeld des *Manned-Unmanned-Teaming* werden automatisierte, unbemannte Aufklärungsflugplattformen durch den Kommandanten eines Transporthelikopters zur Vorabaufklärung der Flugrouten hinsichtlich potentieller Bedrohungen bei der Missionsdurchführung mitgeführt. Aufgrund einer potentiellen Imperfektion der Aufklärungsergebnisse wird der Kommandant einer Mehrbelastung an Aufgaben und erhöhten Beanspruchung ausgesetzt. Als Ziel dieser Arbeit soll daher der sensorische Aufklärungsprozess auf eine Art und Weise automatisiert werden, welche Operateure bei der Degradierung der Zuverlässigkeit situativ und bedarfsgerecht involviert und diese so eine vertretbare Beanspruchung erfahren. Dabei stehen die Leistungsfähigkeit des neuen Automatisierungsansatzes, das Vertrauen der Operateure sowie deren Belastung und Beanspruchung im Mittelpunkt der Untersuchungen.

Im Rahmen der Arbeit wurden das Paradigma der *Variablen Automation* mit dem Integrationsschema der *Levels of Automation* ausgewählt und visuelle Präsentationsformen unsicherheitsbehafteter Aufklärungsdaten in insgesamt drei Automationsgraden konzipiert. Deren Gestaltung folgt Prinzipien der Arbeitswissenschaft und Kognitionspsychologie. Insbesondere werden Erkenntnisse der menschlichen visuellen Informationsaufnahme auf die Erfassung visuell dargestellter Aufklärungsdaten übertragen. Damit sollen ergonomisch günstige und schnell erfassbare Repräsentationsformen erzeugt werden, welche geringe Aufwendungen seitens der Operateure erfordern. Zur Adaption des Automatisierungslevels wurde im Lösungskonzept ein Maß der Verlässlichkeit der automatisierten Prozesse herangezogen, welches die Auswahl eines geeigneten Automationsgrades zur Laufzeit ermöglicht. Im Rahmen der Arbeit wurde ein solches Experimentalsystem umgesetzt und in einem Missionssimulator integriert.

Die experimentelle Untersuchung erfolgte anhand eines *Human-In-The-Loop*- Experiments, wobei Helikopterkommandanten das Experimentalsystem in simulierten Einsatzmissionen erprobten. Zur experimentellen Validierung wurden Probanden unterschiedliche visuelle Repräsentationsformen als Produkte der Automationsgrade auf den Displays im Cockpit präsentiert. Durch die Untersuchungen konnte demonstriert und bestätigt werden, dass unsicherheitsbehaftete Aufklärungsdaten prinzipiell durch die zielgerichtete Involvierung der Operateure zur Laufzeit kompensiert werden können. Das Gesamtsystem (Mensch-Maschine-Team) erzielte hohe Leistungsmaße sowie positive Effekte der Adaptivität, so wurde mehr als die 3-fache Menge der benötigten Flugpfadlänge des Helikopters erfolgreich abgesucht, der Helikopter operierte anteilig in über 90 % in aufgeklärtem Gebiet. Die Ausbeute vollständig aufgeklärter Objekte erfuhr durch das gezielte Einbringen kognitiver menschlicher Leistung eine deutliche Steigerung, für 92 % der Fälle unsicherer Detektionen konnte die Prozesskette durch das gezielte Abfragen von Identifizierungsleistung im mittleren Abstand von 2,3 Minuten erfolgreich vervollständigt und verifiziert werden. Insgesamt wurde das Vorgehen, Operateure situativ in den Auswertungsprozess mit einzubeziehen, als verträglicher Aufwand für den erfahrenen Mehrwert eingestuft. Die Probanden erfuhren während ihrer kurzzeitigen Involvierung eine geringe Anstrengung, mäßig bis hohe Anforderungen an Konzentration und hohe Anforderungen an Aufmerksamkeit. Das ausgeprägte Vertrauen in die Darstellungsmodalitäten schwankte zwischen 70 % und 95 % und folgt dem gegenläufigen Grad an Automatisierung, was einem kalibrierten Vertrauensverhältnis entspricht.

Abstract

This thesis addresses the interaction of operators and technical processes in human-machine systems, in which machine-performed processes are potentially error-prone or incomplete. In the specific application field of *Manned-Unmanned-Teaming*, automated unmanned aerial reconnaissance flight platforms are guided by the commander of a transport helicopter for reconnaissance of flight routes with respect to potential threats during mission execution. Due the potential imperfection of the reconnaissance results, the commander is confronted with an additional load of tasks and increased workload. As an objective of this thesis, the sensor-based reconnaissance process should therefore be automated in a way that involves operators in case of degrading reliability in a situational and as-needed manner, thus demanding for tolerable workload. The focus of the research is on the performance of the new automation approach, the confidence of the operators, and their task load and workload.

In this work, the paradigm of variable automation combined with the integration scheme called *Levels of Automation* was selected and several visual representations of potentially unreliable reconnaissance data were designed and integrated using three levels of automation. Their design follows principles of work science and cognitive psychology. Specifically, the concept transfers knowledge of human visual information acquisition to the acquisition of visually presented reconnaissance data. The aim is to create ergonomically friendly representations that can be perceived with minimum effort. To adapt the automation level, a measure of the reliability of the automated processes was used, which allows the selection of a suitable automation level at runtime. Such an experimental system was implemented and integrated into a mission simulator.

The experimental evaluation based on a human-in-the-loop experiment, where helicopter commanders field-tested the experimental system in simulated operational missions. For experimental validation, subjects were presented different visual representations as products of the automation levels on the cockpit displays. The investigations demonstrated and confirmed that unreliable reconnaissance data can be recovered by the purposeful involvement of the operators at runtime in principle. The overall system (man-machine team) achieved high performance measures as well as positive effects from its adaptiveness; for example, more than 3 times the required flight path length of the helicopter was successfully searched, and the helicopter operated more than 90 % over reconnoitered areas. The rate of completely identified objects increased significantly due to the systematic contribution of cognitive human performance; for 92 % of the cases of uncertain detections, the process chain was successfully completed and verified by the systematic demand of identification performance at a mean interval of 2.3 minutes. Overall, the procedure of situationally involving operators in the evaluation process was found to be tolerable effort for the experienced added value. Subjects experienced low effort, moderate to high demands on concentration, and high demands on attention during their momentary involvement. Pronounced confidence in the modes of data representation ranged from 70 % to 95 % and followed the opposite degree of automation, which corresponds to a calibrated trust relationship.

Abkürzungsverzeichnis

Abkürzung	englisch	deutsch
MUM-T	*Manned-Unmanned - Teaming*	bemannt-unbemannte Teambildung
UAV	*Unmanned / Unhabited Aerial Vehicle*	Unbemanntes Fluggerät
UAS	*Unmanned Aircraft System*	Unbemanntes Luftfahrtsystem
EO / IR	electro-Optic / infrared	elektrooptisch / infrarot
ATR	*Automatic Target Recognition*	Automatische Zielerkennung
LOA	*Levels of Automation*	Automations-/ Automatisierungsgrade
AMC	*Air Mission Commander*	Befehlshaber der Mission
PF	*Pilot Flying*	Luftfahrzeugführer
PIC	*Pilot in Command*	Kommandant
UV		Unabhängige Variable
AV		Abhängige Variable
IV		Intervenierende Variable
MV		Moderatorvariable

Inhalt

Danksagung i
Kurzfassung iii
Abstract v
Abkürzungsverzeichnis vii
Kapitel 1 Einleitung 1
1.1 Anwendungsdomäne *Manned-Unmanned-Teaming* 3
1.2 Einordnung der Arbeit 6
1.3 Problemstellung 7
1.3.1 Unsicherheiten bei der maschinellen Verarbeitung von Aufklärungsdaten 7
1.3.2 Abfederung von Unsicherheit 8
1.3.3 Darstellung visueller Aufklärungsdaten 8
1.3.4 Beanspruchung von Operateuren beim Aufklärungseinsatz 9
1.3.5 Zusammenfassung und Resümee 9
1.4 Ermittlung des Forschungsbedarfs 9
1.5 Forschungsfragestellungen 10
1.6 Inhaltsübersicht und Aufbau der Arbeit 11
Kapitel 2 Stand von Forschung und Technik 13
2.1 Maschinelle Bilddatenauswertung zur luftgestützten Objekterkennung 13
2.1.1 Grundprinzip als Prozesskette 13
2.1.2 Algorithmen zur luftgestützten Objekterkennung 15
2.1.3 Imperfektion und Zuverlässigkeit 16
2.1.4 Sensor- und Perzeptionsmanagement auf Sensorflugplattformen 20
2.1.5 Diskussion 22
2.2 Anbindung und Integration eines Operateurs an / in Datenauswerteprozesse 24
2.2.1 Abstrakt im Konzept technischer Datenfusion 24
2.2.2 Konkret in Mensch-Maschine-Systemen 25
2.2.3 Diskussion 35
2.3 Aufgabenallokation im Mensch-Maschine-System 37
2.3.1 Statische Funktionsallokation 37
2.3.2 Dynamische, variable Funktionsallokation 41
2.3.3 Diskussion 45
2.4 Automationsadaption und Aktivierungsstrategien 46
2.4.1 Instanz des Eingriffs 46
2.4.2 Aktivierungsstrategien 47
2.4.3 Diskussion 48
2.5 Eingriffspunkte zur Entlastung des Operateurs 48
2.5.1 Belastungs-Beanspruchungs-Konzept 49
2.5.2 Menschliche Informationsverarbeitung 50

2.5.3 Visuelle Perzeption und Kognition ... 53
2.5.4 Diskussion und Erarbeitung einer Entlastungsstrategie ... 55
2.6 *Human Factors* im Kontext automatisierter Prozesse ... 58
2.6.1 Effekte durch Systemverlässlichkeit (Trustworthiness) ... 59
2.6.2 Diskussion ... 60
2.7 Erkenntnisse und Abschlussdiskussion ... 61
2.7.1 Fazit und Lösungsanforderungen ... 62
Kapitel 3 Konzept und Umsetzung ... 65
3.1 Lösungsansatz ... 65
3.2 Implementierung im Rechner ... 67
3.3 Designphilosophie für die visuelle Datenrepräsentation ... 68
3.4 Gestaltung der Automationsgrade ... 69
3.5 Produkte der Automationsgrade und Einbezug des Operateurs ... 70
3.5.1 Automationsgrad „Video Assisted“ ... 70
3.5.2 Automationsgrad „Map-Assisted“ ... 72
3.5.3 Automationsgrad „Tactical Assisted“ ... 75
3.6 Wirkungsprinzip der Automationsgrade ... 76
3.7 Adaptierbarkeit durch funktionale Ebenen ... 77
3.8 Systeminitiierte Adaptivität ... 78
Kapitel 4 Experimentelle Evaluierung im Simulator ... 81
4.1 Operationalisierung ... 81
4.2 Vorabuntersuchungen zur Konzeptbestätigung ... 85
4.2.1 Notwendigkeit eines menschlichen Entscheiders ... 85
4.2.2 Tauglichkeit zur Reduktion der Operateur-Beanspruchung ... 88
4.3 MUM-T Missionssimulator als Experimentalumgebung ... 91
4.3.1 Cockpit und Displays ... 92
4.3.2 Sensorsimulation und UAV-Systeme ... 94
4.3.3 Szenariensimulation und MUM-T - Szenarien ... 94
4.4 Versuchskonzept ... 95
4.4.1 Operatives Arbeitssystem ... 95
4.4.2 Versuchsdesign ... 96
4.4.3 Trustworthiness als Unabhängige Experimentvariable ... 97
4.4.4 Evaluierungsmethodik der Abhängigen Experimentvariablen ... 100
4.4.5 Evaluierungsmethodik der Systemergonomie ... 100
4.4.6 Versuchsanordnung und -ablauf ... 101
4.5 Versuchspersonen ... 106
4.6 Ablauf der Experimentalkampagne ... 106
4.6.1 Training ... 107
4.6.2 Briefing ... 107
4.6.3 Durchführung der Experimentalflüge ... 108

4.6.4 Debriefing ... 108
4.7 Erfasste Daten ... 108
Kapitel 5 Evaluierung und Ergebnisse ... 111
5.1 Evaluierungs- und Visualisierungswerkzeuge ... 111
5.2 Bestätigung der Rahmenbedingungen ... 111
5.2.1 Realismus und Immersion ... 112
5.2.2 Vergleichbarkeit ... 112
5.3 Evaluierung der abhängigen Experimentvariablen ... 114
5.3.1 Objektive Evaluierung aus Messdaten ... 115
5.3.2 Subjektive Evaluierung mittels Fragebögen ... 123
5.4 Evaluierung der Systemergonomie ... 127
5.4.1 Visuelle Ergonomie der Ergebnisdarstellung ... 127
5.4.2 Ergonomie der Benutzerschnittstelle ... 128
5.4.3 Effekte der proaktiven Adaptivität ... 129
5.4.4 Adaptierbarkeit und Autorität ... 131
Kapitel 6 Zusammenfassung, Diskussion und Ausblick ... 133
6.1 Zusammenfassung und Diskussion der Ergebnisse ... 133
6.2 Beantwortung der Forschungsfragen ... 134
6.3 Kritik und Verbesserungspotentiale ... 136
6.3.1 Kritikpunkte ... 136
6.3.2 Verbesserungsmöglichkeiten ... 138
6.4 Fazit ... 138
6.5 Empfehlungen und Ausblick ... 139
6.5.1 Empfehlungen ... 139
6.5.2 Ausblick ... 140
Bibliographie ... 141
Eigene Veröffentlichungen ... 157
Anhang A: Modellierung von Operateur-Ressourcen und Interaktionen ... 159
Anhang B: Human Factors ... 161
Anhang C: System- und Softwaremodulschaubild ... 165
Anhang D: Missionsvignetten ... 167
Anhang E: Fragebögen ... 173
Anhang E1: Abschlussfragebogen Variable Automation ... 174
Anhang E2: Abschlussfragebogen User Interface ... 182
Anhang E3: Fragebogen nach jeder geflogenen Mission ... 186

Kapitel 1

Einleitung

Die Automatisierung technischer Prozesse verfolgt das Ziel, menschliche Bediener oder Operateure technischer Systeme oder Geräte zu entlasten, und das Leistungsvermögen oder den Fähigkeitsumfang in einer operationellen Anwendung zu steigern.

Im Bereich der bemannten Luftfahrt werden seit Jahrzehnten Bestrebungen unternommen, technische Systeme zu automatisieren und dabei betriebssicher und ergonomisch zu gestalten. Auch der unbemannten Luftfahrt kommt ein immer weiter steigendes ziviles und militärisches Interesse zuteil, wobei Automatisierung dort bereits menschliche Bediener oder Piloten unterstützt oder in Teilen ersetzt. So rückten in den letzten Jahren vermehrt unbemannte Luftfahrzeuge (umgangssprachlich: Drohnen) in den Fokus der Allgemeinheit, Medien und Politik [Lange, 2003].

Als UAV (engl.: *unmanned aerial vehicle*, kurz: UAV) wird ein wiederverwendbares, durch einen Menschen ferngesteuertes („*Man in the Loop*“) oder automatisiert betriebenes, unbemanntes Fluggerät bezeichnet („*Flugroboter*“) [Lange, 2003]. Diese verfügen häufig über technisch ausgereifte, leistungsfähige Flugsteuerungssysteme *(„Autopiloten“* bzw. „*flight control system*“) sowie navigatorische Fähigkeiten durch Flugmanagementsysteme, welche eine ausdauernde und weitestgehend eigenständige Durchführung von unbemannten Flügen erlauben. Meist erfordert dies nur ein minimales Zutun oder Eingreifen eines Piloten durch eine Fernsteuerung ([Valavanis, 2007], [Budiyono, 2007], [Colomina & Molina, 2014]).

Solche unbemannten Flugplattformen (UAVs) dienen meist als Transportvehikel einer Nutzlast, häufig Sensoren (wie beispielsweise bildgebende Kameras) zur Erfassung und Wahrnehmung der Umwelt. Dadurch können verschiedenartige Missionen durchgeführt werden, wobei sich der Einsatzbereich hauptsächlich auf zivile, behördliche und militärische Aufklärungs- und Überwachungsaufgaben erstreckt [Lange, 2003]. Das Einsatzspektrum solcher Missionen reicht von Anwendungen zur Überwachung des Straßenverkehrs ([Luo, Wu, Huang, & Zhang, 2011], [Kanistras, Martins, Rutherford, & Valavanis, 2013], [Kanistras, Martins, Rutherford, & Valvanis, 2015]) über die Suche Vermisster oder verunglückter Menschen (Vermisstensuche) in schwer zugänglichem Gelände ([Rudol & Doherty, 2008], [Bejiga, Zeggada, Nouffidj, & Melgani, 2017]) bis hin zu Fernerkundungs-, Sicherungs- oder Aufklärungsaufgaben ([Colomina & Molina, 2014], [Erdelj, Natalizio, Chowdhury, & Akyildiz, 2017]). Diese können aus der Vogelperspektive besonders effizient und schnell durchgeführt werden.

Komplexe Missionen, welche den zielgerichteten Einsatz von umweltwahrnehmender Sensorik (Missionssensoren[1]) auf dem UAV erfordern, werden häufig durch und mit der Unterstützung von menschlichen Operateuren (sog. *Payload*-Operateuren) durchgeführt. Die Automatisierung dieser Fähigkeit zur „eigenständigen Wahrnehmung“ von Objekten, Vorkommnissen oder Gegebenheiten

[1] Als Missionssensoren werden die als Nutzlast (Payload) mitgeführten Sensoren an Board eines UAVs bezeichnet, welche zur Durchführung einer spezifischen Mission erforderlich sind. Häufig kommen elektrooptische (EO), Infrarot- (IR) oder laufzeitbasierte Lichtpulsmessungen (LIDAR)-Sensoren zum Einsatz. Der Begriff grenzt interne Sensorik als Teil des UAVs (beispielsweise zur Stabilisierung der Plattform) von der Sensorik als (optionale) Nutzlast ab.

erfordert den Einsatz komplexer Algorithmen zur maschinellen Auswertung der Sensordaten aus den Missionssensoren [Nawrat & Kuś, 2013]. Im Gegensatz zur weitgehend ausgereiften Automatisierung der Flugführung und Navigation des Fluggeräts steht die zielgerichtete Einsatzautomatisierung des Sensierens und der Perzeption der Umwelt (insbesondere von Bodenobjekten) durch algorithmische Verfahren an Bord solcher unbemannter Sensorflugplattformen auf einem niedrigeren Entwicklungs- und Technologiestand. Nur für einzelne Anwendungsfelder, und oft unter eingeschränkten Betriebsbedingungen, konnten bisher teilweise automatisierte, durch Algorithmen realisierte Lösungen auf unbemannten Sensorflugplattformen demonstriert werden. Dazu zählen beispielsweise die Fahrzeugerkennung in Senkrechtansichten aus optisch gut aufgelösten Bilddaten ([Tuermer, Kurz, Reinartz, & Stilla, 2013]), sich bewegende Fahrzeuge ([Kaaniche, Champion, Pegard, & Vasseur, 2005], [Cao, Lan, Yan, & Li, 2011]) oder eine Fahrzeugerkennung ([Gleason, Nefian, Bouyssounousse, Fong, & Bebis, 2011], [Se, Shi, Liu, & Ghazel, 2015], [X. Chen & Meng, 2016], [Hajehasani, 2017]) durch ein UAV beziehungsweise die Objekt- oder Personenerkennung ([Oreifej, Mehran, & Shah, 2010]) mittels eines UAVs.

Alle algorithmischen Verfahren und Vorschläge eint die Tatsache, dass die vorgestellten Verfahren mit Unsicherheiten und Imperfektion behaftet sind (beispielhaft aufgeführt seien [Liu & Mattyus, 2015], [X. Chen & Meng, 2016]). Auch neuartigere und *State-of-The-Art* - Algorithmen zur Erkennung von Objekten (vornehmlich Fahrzeugen) sind bei der Anwendung mit einem persistenten Faktor an unvorhersehbarer Unsicherheit behaftet ([Koga, Miyazaki, & Shibasaki, 2018], [Yang, Liao, Li, Cao, & Rosenhahn, 2019], [Ammar, Koubaa, Ahmed, & Saad, 2019]). Diese basieren auf der Grundlage des maschinellen Lernens (*Machine Learning*), und werden in dieser Anwendung als sogenannte *Künstliche Neuronale Netze* zur Mustererkennung verwendet. Häufig werden diese als *Black-Box*-Verfahren bezeichnet, bei welchen die Gefahr besteht, dass der Entwickler Fehler in den zugrundeliegenden Lernprozesse einbringt, oder die Verfahren systematische Problematiken wie eine überzogene Generalisierungsfähigkeit oder Instabilitäten (Überreaktionen oder Fehlverhalten auf kleine Änderungen der Eingangsdaten) [Schwalbe & Schels, 2020] aufweisen können.

Besonders in Anwendungen, welche eine höchstmögliche Verfahrensgüte erfordern, können fehlerbehaftete und „konventionell" automatisierte Aufklärungslösungen nur beschränkte Beiträge leisten.

Das trifft im Kontext der Führung unbemannter Sensorflugplattformen zum Aufklärungseinsatz insbesondere zu bei:

- Der zeitgleichen Führung[2] von mehreren Aufklärungs-UAVs (**Multi-UAV-Anwendungen**)
- Der nebenläufigen Führung eines oder mehrerer Aufklärungs-UAVs (beispielsweise bei **MUM-T – Anwendungen,** siehe Kapitel 1.1)

und keiner durchgängigen Überwachungsmöglichkeit durch einen einzelnen Operateur oder Systembediener. Weitere Anwendungsfälle ergeben sich bei

- der Übersteigung verfügbarer Personal- und Operateur-Ressourcen (beispielsweise bei **Daueranwendungen** wie Beobachtungsaufgaben) oder
- **gefahrenbehafteten Anwendungen**, bei denen Konsequenzen fehlerhafter oder unvollständiger Objektentdeckungen Leib und Leben der Ergebnisempfänger gefährden können,

sofern ebenfalls keine lückenlose Überwachungsmöglichkeit durch einen Operateur erfolgt.

Die dabei mit oder von einem UAV automatisiert durchgeführte Aufgabe oder Aktion wird im weiteren Verlauf der Arbeit als *Aufklärungsaufgabe* verstanden und bezeichnet. Der dabei durchgeführte *Aufklärungsprozesses* weist eine Prozessgüte auf, wobei der Prozessgüte

[2] Der Begriff der Führung ist angelehnt an militärische Führungsparadigmen und meint die Führung des UAVs inklusive der Missionssensorsysteme [Uhrmann, 2013].

beziehungsweise der Verlässlichkeit maschinell ausgeführter Prozesse in dieser Arbeit eine zentrale Rolle zukommt.

Die Betrachtung der Aufgabenstellung findet dabei im Rahmen eines Anwendungsfelds statt, in welchem keine lückenlose Überwachung durch einen Operateur stattfinden kann. Die Anwendungsdomäne des sog. *Manned-Unmanned-Teamings* (MUM-T) wird im folgenden Unterkapitel veranschaulicht.

1.1 Anwendungsdomäne *Manned-Unmanned-Teaming*

Eine hochgradig technisierte, zukunftsorientierte Technologie, bei welcher Menschen und Maschinen zusammenwirken, stellt das sogenannte *Manned-Unmanned-Teaming* (MUM-T), dar. Dabei sollen durch das effektive und gewinnbringende Zusammenspiel von bemannten (beispielsweise Bodenfahrzeugen, Luftfahrzeugen) und unbemannten Entitäten (beispielsweise Robotern, UGVs[3], UAVs) operationelle Vorteile erzielt oder neuartige operationelle Fähigkeiten[4] ausgeprägt werden können. Als Vorteile solcher Konstellationen zählen hauptsächlich

- die Steigerung der Effizienz und der Ausdauer,
- eine Minimierung der Gefährdung von Menschen sowie
- eine synergetische Bildung neuen Fähigkeiten.

Häufig wird das *Teaming* von Helikoptern mit unbemannten Sensorflugplattformen (beispielhaft [Jameson et al., 2005], [Hicks, Durbin, & Sperling, 2009]) als das ursprüngliche *Manned-Unmanned- Teaming* verstanden und bezeichnet ([Whittle, 2015], [Iriarte, 2017]). Dabei wird für den militärischen Einsatzbereich seitens der Hersteller[5] angestrebt, die unbemannten Flugsysteme als „*Robot-Wingman*“ fungieren zu lassen, welche während den Einsätzen sogenannte „*D³ Aufgaben*“ (engl.: *dull, dirty, dangerous*) übernehmen; also stumpfsinnige, schmutzige oder gefährliche Aufgaben [Interview Europäische Sicherheit & Technik (ES&T), 2019]. Somit werden spezifische Vorteile unbemannter Flugplattformen ins Team eingebracht. Abbildung 1.1 zeigt beispielhaft ein solches operationalisiertes *Manned-Unmanned-Teaming* für militärische Einsätze.

Abbildung 1.1: *Manned-Unmanned Teaming* bei der U.S. Army: Boing Apache AH64E und UAV General Atomics Grey Eagle. Bildquellen: www.unmannedsystemstechnology.com (links), www.helis.com (rechts).

Eine besondere operationelle Fähigkeit stellt dabei die ergebnisorientierte Erfassung der Umwelt durch UAVs mit dem Ziel der aktiven Suche und militärischen Aufklärung von Bodenzielen dar. Diese sogenannten **ISR-Fähigkeiten**[6] bieten Möglichkeiten der strukturierten Feindaufklärung,

[3] Unmanned Ground Vehicle

[4] wie beispielsweise die Fähigkeit, entfernte Orte und Ziele durch die Aufklärungssensorik der UAVs einsehen zu können, noch bevor der Helikopter diese erreicht (*Eyes-On-Target*).

[5] Airbus Helicopters: https://www.airbus.com/helicopters.html

[6] ISR - Intelligence, Surveillance and Reconnaissance: “*is a grouping of information collection, processing, dissemination and communication assets designed, structured, linked and disciplined to provide … support to commanders in decision making.*” [Director of Army Doctrine, 2004]

Überwachung, gezielten Informationsauswertung und Bereitstellung von Daten an Informationsempfänger im Team.

Anwendungsfeld Militärische Transport-Helikoptermissionen

Der Transport von Personen und Material spielt in militärischen Missionen und insbesondere in luftgestützten Operationen eine tragende, zentrale Rolle. Besonders in dynamischen, zeitkritischen Einsätzen werden diese Transportaufgaben von (unbewaffneten) und vergleichsweise ungeschützten Transporthelikoptern durchgeführt, welche aufgrund ihrer Verwundbarkeit von Konsequenzen durch Gefährdungen in besonderer Schwere betroffen sind. Dabei muss mit schwer vorhersehbaren[7], bodengebundenen Bedrohungen entlang der Flugouten des Transporthelikopters gerechnet werden. Dies sind insbesondere gegnerische Personen und sowie Fahrzeuge, welche potentiell als Träger von Luftabwehreinrichtungen oder zum schnellen Verlegen von Akteuren dienen. Die Flugrouten des Transporthelikopters sollen durch vorausfliegende UAVs zeitnah und möglichst eigenständig aufgeklärt werden.

Teamkonfiguration

Im betrachteten Anwendungsfeld besteht das Team aus einem Transporthelikopter (*HC*) und mehreren abgesetzten, sensortragenden UAVs *(Multi-UAV, MUM-T*). Diese werden der Crew[8] des Helikopters unterstellt, wobei die UAVs durch den Kommandanten aus dem HC-Cockpit heraus geführt[9] werden (Abbildung 1.2).

Abbildung 1.2: Illustration des MUM-T-Schemas im MUM-T Missionssimulators des Instituts für Flugsysteme der Universität der Bundeswehr München.

Die UAVs sollen automatisiert missionsrelevante Aufklärungsergebnisse (Objektvorkommen auf den Flugrouten) sensorisch erfassen und auswerten. Die vorausgewerteten Daten sollen dann

[7] sogenannter *asymmetrischer Konflikt* (feindliche Kräfte verfügen über: hohe Flexibilität, oft unvorhersehbare räumliche Verteilung, (lokal überlegene) Organisationsfähigkeit, nicht eindeutige Erkennbarkeit sowie flexible Schlagkraft [Arquilla, 2011].

[8] bestehend aus Piloten/Luftfahrzeugführer (*PF – Pilot flying*) und Kommandant (*PIC – Pilot in Command*), linker Arbeitsplatz.

[9] mittels einer direkten Zugriffs- und Kommandierungsfähigkeit.

aufbereitet und der Crew des Helikopters visuell[10] auf digitalen Anzeigegeräten im Cockpit bereitgestellt werden.

Dabei wird das reguläre Aufgaben- und Betätigungsfeld des Kommandanten (Navigation, Kommunikation, Systemmanagement, Systemüberwachung, Missionsmanagement, Missionsüberwachung, Flug) um die Führung der UAVs und die Handhabung der Aufklärungsergebnisse erweitert (verdeutlicht Abbildung 1.3, Schleife „UAV“).

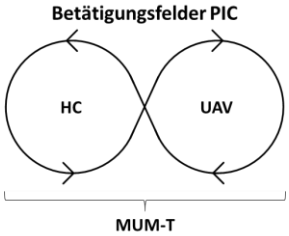


Abbildung 1.3: Um die Führung der UAVs erweitertes Betätigungsfeld des Kommandanten (PIC).

Er nimmt dadurch die Rolle eines *Air Mission Commanders (AMC)* ein, welcher die UAVs zielorientiert zu Aufklärungszwecken einsetzt und die Mission dynamisch unter Einbezug neu gewonnener Erkenntnisse aus der zeitnahen Vorabaufklärung taktisch organisiert und leitet.

Abbildung 1.4 zeigt das dabei zugrundeliegende Prinzip der direkten Führung der UAVs aus dem Helikopter sowie der direkten Rückführung von Aufklärungsdaten in das Cockpit des bemannten Transporthelikopters gemäß des Interoperabilitätsgrads[11] LOI3. Im MUM-T - Kontext wird der Kommandant des Transporthelikopters schematisch im weiteren als Operateur eines oder mehrerer UAVs betrachtet.

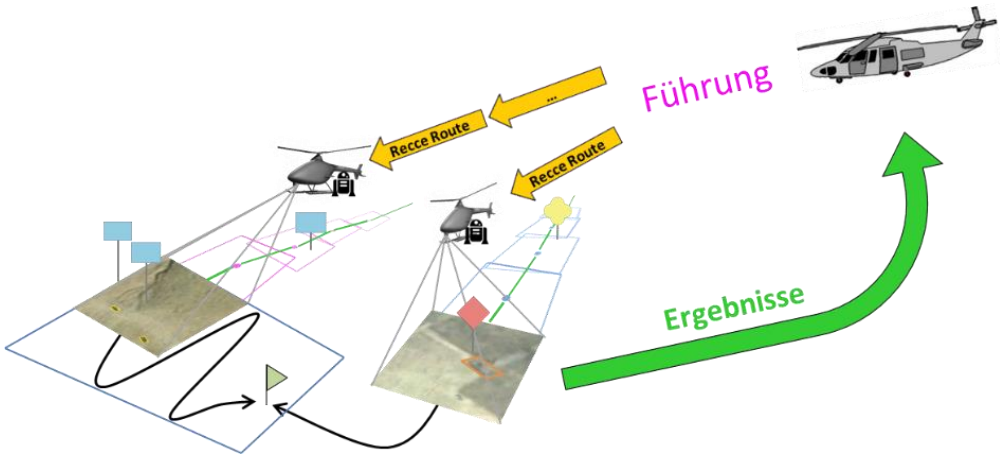


Abbildung 1.4: Direkte Rückführung von Aufklärungsergebnissen der UAVs ins Helikoptercockpit (grün), Führung der UAVS durch den Kommandanten des Helikopters (orange).

[10] Moderne Cockpitumgebung bieten Anzeigemöglichkeiten unter Benutzung bestehender Gerätschaften, während auditive oder haptische Kommunikationsformen in Cockpitumgebungen aufgrund von Geräuschen und Vibrationen weniger geeignet scheinen.

[11] Der *Interoperabilitätsgrad* (LOI, *Level of Interoperability*) ([NATO Standardization Agency, 2012a], ([Marques, 2015], Seite 3-5) bezeichnet die Bindungsebene des Helikopters mit dem unbemannten System. LOI3 bezeichnet die direkte Führung des UAVs sowie dessen Missionssensoren und enthält den Empfang der Sensordaten.

1.2 Einordnung der Arbeit

In speziellen Anwendungsfeldern werden besonders hohe Anforderungen an automatische Bildverarbeitungssysteme gestellt, im Besonderen durch eine höhere Schwierigkeit[12] der Aufklärungsaufgabe beziehungsweise durch die geforderte Zuverlässigkeit (einer unüberwachten Ausführung). Besonders in sicherheitskritischen Systemen, deren Anwendung im Fehlerfalle zum Verlust von Menschenleben führen würde, werden eine höchstmögliche Sicherheit und Zuverlässigkeit gefordert.

Häufig stoßen klassische Automatisierungsverfahren in datenverarbeitenden Systemen durch die eigenständige, rein maschinelle Abarbeitung unter den obengenannten Anforderungen an ihre Grenzen. Sie sind in diesen Anwendungsfeldern nicht durchgängig im Stande[13], komplexe Aufgaben[14] durch die Anwendung rein maschineller Prozesse eigenständig und mit der geforderten Ergebnisgüte und Zuverlässigkeit erfolgreich abzuarbeiten. Dazu zählen beispielsweise die Erkennung und Identifizierung bedrohlicher Objekte oder Situationen.

Sollen Systeme für gefahrenbehaftete Anwendungen realisiert werden, in denen imperfekte[15] Algorithmen eingesetzt werden müssen, sind weiterführende Konzepte zur Handhabung entstehender Unsicherheiten oder mangelnden algorithmischen Fähigkeiten nötig. Im Kontext der pauschalen Unsicherheitsbehaftung wurde bereits explizit untersucht, welcher Schwellwert der Verlässlichkeit pauschal als akzeptabel gilt (Kapitel 1.3). Im Kontext des Sensormanagements versteht sich der Ansatz des *Sensor- und Perzeptionsmanagements,* wie er am Institut für Flugsysteme der UniBwM ausgearbeitet wurde ([Russ et al., 2012], [Hellert, Smirnov, Russ, & Stuetz, 2012]) (s. Kapitel 2.1.4), als allgemeiner, generischer Ansatz zur Verwaltung geeigneter Ressourcen und Funktionalitäten zur Objektaufklärung durch den Einsatz algorithmischer Verfahren der maschinellen Sensordatenverarbeitung auf unbemannten Sensorflugplattformen. In diesem Kontext konnte bereits gezeigt werden, dass die Ergebnisgüte durch ein aktives Management der verfügbaren Algorithmen an Bord eines Fluggeräts (Automatisierte Auswahl von Algorithmen, [Hellert, 2019]) gesteigert werden kann. Bei Systemunsicherheiten besteht (neben der Optimierung der Systeme selbst, [Hellert, 2019]) eine weitere Möglichkeit darin, menschliche Kapazitäten[16] in den Verarbeitungsprozess mit einzubringen. Demgemäß kann im Kontext dieser Arbeit, der Operateur der unbemannten Sensorflugplattform bei auftretenden Unsicherheiten oder Unzulänglichkeiten der Algorithmen situativ mit in den Prozess der Datenauswertung und Ergebnisbestimmung strukturell einbezogen werden, umso bei Defiziten des maschinellen Systems Aufgaben übernehmen zu können.

Unter diesen Aspekten kommen weitreichende Fragestellungen der Mensch-Maschine-Interaktion zum Tragen. Daher erfolgt in dieser Arbeit eine Betrachtung der Problemstellung vorhandener Imperfektion von automatisierten Objekterkennungsverfahren aus den Blickwinkeln der Mensch-Maschine-Systeme, Systemergonomie und menschzentrierten Automation. Damit wird auf bestehenden Erkenntnissen der Akzeptanz der Verlässlichkeit von Aufklärungsdaten (Kapitel 1.3) sowie der rein maschinell durchgeführten Sensoreinsatzautomatisierung [Hellert, 2019] aufgebaut.

Die vorliegende Arbeit beschäftigt sich daher forschungsthematisch mit der variablen Automatisierung des Sensoreinsatzes unbemannter Sensorflugplattformen, bei welcher Mensch und Maschine eine gestellte Aufgabe (hier die *Aufklärungsaufgabe*) gemeinsam lösen. Dabei wird ein Ansatz vorgeschlagen und evaluiert, der

[12] Diese entsteht beispielsweise in einer unstrukturierten Umwelt oder durch äußere Umgebungseinflüsse.
[13] Gründe dafür sind beispielsweise nicht vorhandene Algorithmen, imperfekte Algorithmen, nicht ausgereifte oder realisierbare Fähigkeiten oder beschränkter Rechenkapazitäten auf der Flugplattform.
[14] Solche, die Fähigkeiten eines Systems an den Grenzen seines Fähigkeitsraumes oder außerhalb erfordert.
[15] mangels besserer Alternativen oder aufgrund potentieller Fehlerbehaftung.
[16] Zur Problemlösung, Entscheidungsfindung und zur Ergänzung des Aufklärungsprozesses durch kognitive Leistung.

- potentielle negative Konsequenzen (durch Imperfektion sowie mangelnde Fähigkeiten einer automatisierten Sensordatenverarbeitung) abfedert.
- dabei die Beanspruchung eines Operateurs beim Aufklärungseinsatz minimal hält.

Ein wichtiger Aspekt der vorliegenden Arbeit stellt die Präsentation von Aufklärungsdaten dar, welche durch automatisierte Datenverarbeitungssysteme eines UAVs bei Aufklärungsflügen erzeugt werden. Diese werden in aller Regel Operateuren der UAV-Systeme oder den Payload-Operateuren dargestellt, meist in visueller Darstellungsform.

1.3 Problemstellung

Nach der Einordnung der Arbeit erfolgt nun eine Analyse relevanter Domänen zur Eingrenzung des Problemraums. Dabei werden relevante Arbeiten aus den Kategorien

- Unsicherheitsbehaftung und Imperfektion maschineller Auswertungsprozesse,
- Abfederung der Unsicherheit,
- Darstellungsmodalitäten von Aufklärungsdaten sowie der
- Beanspruchung von Operateuren beim Aufklärungseinsatz

dargestellt und bewertet.

Abschließend leiten eine kurze Zusammenfassung der wesentlichen Fakten und ein Resümee zur Ermittlung des Forschungsbedarfs über.

1.3.1 Unsicherheiten bei der maschinellen Verarbeitung von Aufklärungsdaten

Bisherige Forschung hat sich in auffällig hohem Umfang im Rahmen der Thematik der Imperfektion und Fehlerbehaftung auf die Ermittlung und Quantifizierung einer Schwelle fokussiert, ab wann fehlerbehaftete, automatisierte Aufklärungsprozesse keinen Gewinn mehr darstellen und keinen Zugewinn mehr in ein Mensch-Maschine-System (Kapitel 2.2.2) eintragen können. Die meisten Untersuchungen erfolgten dabei an Konfigurationen, bei welchen ein Operateur ein einzelnes UAV (teils unter dem Einfluss anderer Aufgaben) zu Aufklärungszwecken einsetzt ([S. Dixon & Wickens, 2003], [S. R. Dixon, Wickens, & Chang, 2004]). Eine Studie betrachtete den Umgang eines Operators mit zwei UAVs [C. D. Wickens, Dixon, & Ambinder, 2006], mehrere UAVs sowie Bodenroboter wurden in [De Visser & Parasuraman, 2011] betrachtet. Die Zielstellung der Aufklärungsaufgabe waren dabei manuelle Suchaufgaben in rohen Sensordaten des UAVs oder Bodenkacheln (teils auch substituierten, künstlichen visuellen Ersatzaufgaben). Dabei wurden die Operateure durch eine unischere, automatische Signalentdeckungshilfe zur Detektion der Bodenziele mit inkonstanter Verlässlichkeit unterstützt.

Die Ermittlung der Schwelle wurde häufig damit verknüpft, ab wann die Leistung der Operateure einbricht oder welche Belastung diese erfahren haben, gegenüber der rein manueller Durchführung der Aufgaben ([S. Dixon & Wickens, 2003], [S. R. Dixon et al., 2004], [S. R. Dixon et al., 2004], [C. D. Wickens et al., 2006], [C. D. Wickens & Dixon, 2007], [De Visser & Parasuraman, 2011], [Hillesheim & Rusnock, 2016]). In [S. R. Dixon et al., 2004] werden mindestens 70 % Zuverlässigkeit bei einer automatisierten Signalentdeckung (Detektion) empfohlen, darunter sei diese zu unproduktiv und stelle zu hohe zusätzliche Anforderungen an den Operateur. Dieser hypothetische Wert von 70 % wurde in [S. Dixon & Wickens, 2003] bereits zuvor aus weiteren Studien rekonstruiert, die Rohwerte der dort zitierten Studien ergaben eine untere Schwelle der Zuverlässigkeit für angedachten Benefit um diesen Bereich. Für Werte unterhalb dieses „Übergangswertes“ wurde ein Einbruch der Leistung unterhalb derer des manuellen Betriebes verzeichnet, wobei eine maximale Anzahl von zwei UAVs durch einen dedizierten UAV-Operateur geführt wurden [C. D. Wickens et al., 2006].

In einem Literaturreview sowie einer Metastudie [C. D. Wickens & Dixon, 2007] wurde die Erkenntnis zusammengefasst, dass offensichtlich ein Schwellwert von 0.70 als Übergang zwischen

unzuverlässiger Automation und keinerlei Automation vorliegt, ab dem ein leistungssteigernder Effekt durch den Einsatz von Automation beobachtbar wird. Die Zuverlässigkeit wird jedoch als *"stark kontextabhängig"* beschrieben, wobei der Schwellwert von 70 % *"vor allem bei hoher Arbeitsbelastung"* zum Tragen kommt [C. D. Wickens & Dixon, 2007]. Als Essenz wurde des Weiteren formuliert, dass Automation und Operator prinzipiell als Team bei der Durchführung von Aufklärungsaufgaben zusammenarbeiten können, da sich deren Fähigkeiten überlappen und ergänzen [De Visser & Parasuraman, 2011]. Die Untersuchung lieferte zudem Erkenntnisse, dass auch Automation, welche mit „Imperfektion extremer Grade" behaftet ist, immer noch Vorteile in ein Mensch-Roboter-System einbringen kann. Ebenso wurde die Schwelle, welche ab 70 % Zuverlässigkeit eine Leistungssteigerung empfahl, erneut bestätigt [De Visser & Parasuraman, 2011].

Geht die Funktionsfähigkeit der Automation jedoch über die einer Signalentdeckungshilfe hinaus, insbesondere wenn Automation die Rolle eines vollwertigen Teammitglieds einnehmen soll, werden Werte der Zuverlässigkeit (*Reliability*) von 90 % oder höher empfohlen [Hillesheim & Rusnock, 2016].

1.3.2 Abfederung von Unsicherheit

Vorangegangene Studien empfahlen hinsichtlich einer Handlungsfähigkeit pauschal den Einsatz variabler Automation zur Abfederung von Unsicherheiten bei der Zieldetektion [De Visser & Parasuraman, 2011] oder pauschal die technische Verbesserung von algorithmischen Detektionsmechanismen [Rovira, McGarry, & Parasuraman, 2007], was in [Hellert, 2019] durch einen Pool an Verfahren zur Abdeckung eines breiteren Einsatzspektrums adressiert wurde.

1.3.3 Darstellung visueller Aufklärungsdaten

Hinsichtlich möglicher Datenvisualisierungsstrategien von Aufklärungsdaten einer unbemannten Sensorflugplattform wurden in vorangegangenen Arbeiten einerseits ein Echtzeit-Videostream aus einer Kamera mit senkrechter Bodenansicht sowie die eine Möglichkeit für den Operateur zur Inspektion der Ziele durch vergrößern angeboten. Die Führung des UAVs erfolge dabei über ein Kartendisplay ([S. R. Dixon et al., 2004], [C. D. Wickens et al., 2006]). In [De Visser & Parasuraman, 2011] wurden andererseits unbemannte Sensorplattformen zur Kartierung von Bodenflächen und einer manueller Suche nach Objekten in dieser Karte durch einen Operateur durchgeführt, ebenso hatte der Operateur Zugriff auf die Livebilder aller Plattformen. In [Kidwell, Calhoun, Ruff, & Parasuraman, 2012] wurde ein Operateur mit einer senkrechte Kartenansicht (nicht durch UAVs erzeugt) und darauf liegenden geometrischen Grundformen (Dreiecke, Rechte, Kreise, etc.) als Suchaufgabe konfrontiert.

Keiner der vorangegangenen Arbeiten zielte auf eine ergonomisch optimierte Wahrnehmbarkeit der visuell repräsentierten Daten. Alle vorangegangenen, themenverwandten Arbeiten ([S. Dixon & Wickens, 2003], [S. R. Dixon et al., 2004], [C. D. Wickens et al., 2006], [De Visser & Parasuraman, 2011], [Kidwell et al., 2012]) beinhalten keine weiteren Empfehlungen oder Problemlösungsstrategien, insbesondere zur Datenaufbereitung oder Datenvisualisierung.

Im Falle fehleranfälliger Automation wurde empfohlen, dem Benutzer Zugriff auf die Rohdaten der Alarmierungsdomäne zu gewähren und effektivere Detektionsmechanismen zu entwickeln [Rovira et al., 2007]. Deren Empfehlung bei vorhandener Unzuverlässigkeit eines Automationssystems lautet, auf die Darstellung von Rohdaten nicht zu verzichten, um dem Operateur durch die Ermöglichung des Zugriffs auf die Signale bzw. Rohdaten eine eigene Entscheidungsgrundlage bieten zu können [Rovira et al., 2007].

Hinsichtlich der Problemstellung der Belastung und Beanspruchung von Operateuren durch die Darstellung und Präsentation von Aufklärungsdaten eines UAVs enthielten themenverwandte Forschungen keine konkreten Anleitungen oder Problemlösungsstrategien, wie unsicherheitsbehaftete Daten dargestellt werden könnten ([S. Dixon & Wickens, 2003], [S. R. Dixon et al., 2004], [C. D. Wickens et al., 2006], [De Visser & Parasuraman, 2011], [Kidwell et al., 2012]). Die Studien verfolgten pauschal die Herausarbeitung und Quantifizierung des Einflusses der

Unsicherheit (Imperfektion und Fehlerbehaftung) auf die Arbeitsergebnisse und betrachteten ebenfalls keine Kausalität der Unsicherheit oder Mechanismen zu deren Kompensation (Handlungsfähigkeit).

1.3.4 Beanspruchung von Operateuren beim Aufklärungseinsatz

Eine vorangegangene, vielzitierte Studie untersuchte im Rahmen der Thematik der Belastung und Beanspruchung die erfahrene Belastung und Beanspruchung eines Operateurs bei Mehrfachaufgaben mit UAV-Einsatz zur Erfüllung synthetisierter oder substituierter Aufklärungs- oder Suchaufgaben mittels Fragebögen. Dabei lag der Fokus auf der dabei erfahrenen Belastung [H. A. Ruff, Narayanan, & Draper, 2002], nicht aber auf Mechanismen zur Verminderung oder Handhabung eventueller Unsicherheit.

1.3.5 Zusammenfassung und Resümee

In vorangegangenen Arbeiten wurde eine noch akzeptable Unsicherheitsbehaftung einer Signalentdeckungshilfe pauschal mit dem Wert 0.7 quantifiziert und durch eine Vielzahl an Arbeiten bestätigt. Diese ermittelte Schwelle von 70 % für die Detektionssicherheit wurde immer für eine rein parallele Mensch-Maschine Detektionsaufgabe angewendet, eine einzelne Detektionseinrichtung also immer gegen die Baseline Mensch in konkurrierender Anordnung gewichtet.

Aus den vorangegangenen Arbeiten konnte keine direkte Strategie zur ergonomischen Aufbereitung von Aufklärungsdaten erkannt und abgeleitet werden. Ebenso wurden keine Empfehlungen ausgesprochen, welche einen Bezug zu einer möglichen Minimierung der Beanspruchung des Operateurs beim Aufklärungseinsatz haben.

Ebenso erfolgten nur vage Empfehlung von Darstellungsmodalitäten visueller unsicherheitsbehafteter Aufklärungsdaten aus unbemannten Sensorflugplattformen, wie beispielsweise die Bereitstellung von Rohdaten.

Im Ganzen zeigten vorangegangenen Arbeiten ebenfalls keinerlei Empfehlungen oder Möglichkeiten zum Umgang mit unsicheren Aufklärungsdaten auf.

1.4 Ermittlung des Forschungsbedarfs

Im vorliegenden Anwendungsfeld des MUM-T wird der Kommandant als Operateur der UAVs mit neuen Aufgaben aus dem Bereich des UAV-Aufklärungseinsatzes belastet, durch welche mit einem potentiellen Anstieg seiner Beanspruchung gerechnet wird. Ihm obliegen insbesondere die Aufnahme und Auswertung sowie die Interpretation der Aufklärungsergebnisse. Sinkt dabei die Güte maschineller Unterstützungsfunktionen, kommen diese zum Erliegen oder sind (situativ) nicht vorhanden, muss der Operateur diese kompensieren, um die gesamt Prozessgüte erhalten zu können.

Die Problemstellung lässt sich also wie folgt beschreiben:

- Mit **Imperfektion**, **Fehlerbehaftung** sowie der Eigenschaft einer sich dynamisch ändernden Zuverlässigkeit von eigenständigen, automatisierten Aufklärungsprozessen (vgl. Kapitel 2.1.3) ist zu rechnen (Nicht-Determinismus). Eine reine konventionelle Automatisierungslösung alleine kann dieses Problem eigenständig nicht vermeiden.
- Eine schwindende oder degradierende Güte der maschinell ausgeführten Prozesse schlägt sich in einer verminderten Aufklärungsleistung nieder. Konventionellen Automatisierungslösungen fehlt die **Handlungsfähigkeit** im Falle einer verminderten Prozessgüte des Aufklärungsprozesses.

- Eine hohe **Belastung**[17] eines Operateurs durch Aufklärungstätigkeiten schlägt sich in seiner höheren **Beanspruchung** nieder; limitierte menschliche Ressourcen sowie dessen regulärer Aufgabenraum beschränken seine Belastbarkeit. Eine zu hohe Belastung kann zudem dessen Überbeanspruchung herbeiführen.

Vorausgegangene Arbeiten behandelten diese Problemkonstellation nicht. Keine der Untersuchungen in Kapitel 1.3 zeigt Lösungsansätze für die dort festgestellten Erkenntnisse auf. Aus diesem Grund liegt der Fokus der Arbeit auf der Gestaltung und des *Proof-of-Concepts* eines variablen Automatisierungssystems als Teil eines *Mensch-Maschine-Systems*. Dieses soll ermöglichen, situativ und initiativ auf auftretende Unsicherheit in der Datenauswertung zu reagieren.

Spezielles Augenmerk liegt dabei auf der Adressierung der Problematik der Unsicherheitsbehaftung automatisierter Aufklärungsfunktionen. Für diese sollen geeignete Interaktions- und Präsentationsstrategien zum automatisierten Einsatz der Missionssensoren auf MUM-T - Flugplattformen und der Darstellung unsicherheitsbehafteter Ergebnisse erarbeitet werden.

Dabei soll insbesondere untersucht und bestimmt werden

- welche Auswirkungen auf die Gesamtleistung des Mensch-Maschine-Systems auftreten
- welche Vertrauensbeziehung die Operateure zu den automatisierten Funktionen aufbauen und
- mit welcher Belastung und Beanspruchung Operateure beim Einsatz eines solchen Unterstützungssystems konfrontiert werden.

1.5 Forschungsfragestellungen

Aus der Ermittlung des Forschungsbedarfs können die folgenden konkreten wissenschaftlichen Forschungsfragestellungen kondensiert und abgeleitet werden, welche beim Einsatz eines adaptiven Mensch-Maschine-System zur sensorischen Aufklärung durch unbemannte Sensorflugplattformen an Operateure aufkommen:

Frage 1):

„Welchen Einfluss auf die Leistungsfähigkeit des Gesamtsystems hat ein mit adaptiver Automation ausgestattetes Mensch-Maschine-System zur sensorischen Aufklärung?“

Frage 2):

„Wie prägen sich das Vertrauen und die Akzeptanz der Operateure bei der Interaktion mit einem adaptiv automatisierten Mensch-Maschine-System aus und wie lässt sich dieses Vertrauen quantifizieren?“

Frage 3):

„Welche Beanspruchung in Form von Anstrengung, Konzentration und Aufmerksamkeit erfahren Operateure bei der Aufgabendurchführung in einem adaptiven Mensch-Maschine-System zur sensorischen Aufklärung?“

[17] durch eine Beteiligung bei der Ausführung oder die komplette Übernahme der Aufgaben.

Um diese Fragestellungen beantworten zu können, soll ein generalisierbares und skalierungsfähiges Sensoreinsatzautomatisierungsschema konzeptioniert und untersucht werden. Dabei sollen die Aspekte der Belastung des Operateurs, die Zuverlässigkeit von Automationsroutinen sowie die Anpassungsfähigkeit eines automatisierten Systems an äußere Umstände explizit berücksichtigt werden.

Im Rahmen einer Versuchskampagne mit Domänenexperten sollen anschließend Aussagen über die Wirksamkeit und die Effekte des Automatisierungsschemas zum variabel automatisierten Sensoreinsatz gewonnen werden.

Diese Arbeit soll vorangegangene Arbeiten zusätzlich um folgende Beiträge ergänzen:

- Überlegungen, wie Aufklärungsergebnisse unterschiedlicher Vorverarbeitungsgrade zu gestalten und zu erzeugen sind.
- Ein Konzept, wie die Ergebnisgüte mit gezielten Beiträgen des Operateurs situativ aufrechterhalten werden kann.
- Vorschläge, welche Vorverarbeitungsgrade in Abhängigkeit von der Verlässlichkeit der maschinellen Prozesse höchstmögliche Beiträge zur Minderung der Belastung eines Operateurs leisten können.

1.6 Inhaltsübersicht und Aufbau der Arbeit

In Kapitel 2 wird zunächst die Domäne der maschinelle Bilddatenauswertung zur luftgestützten Objekterkennung vorgestellt (Kapitel 2.1), wobei das konzeptionelle Grundprinzip erläutert, eine Auswahl an Algorithmen und deren Anwendung dargestellt sowie die Grundproblematik der Fehlerbehaftung der Verfahren herausgearbeitet und erläutert werden. In Kapitel 2.2 werden prinzipielle Möglichkeiten und Konzepte der Anbindung und Integration eines Operateurs an datenverarbeitende Systeme beleuchtet, dabei stehen besonders Mensch-Maschine-Systeme im Vordergrund, daraus wird ein Automatisierungsschema hinsichtlich der Relevanz für den Systementwurf selektiert. Kapitel 2.3 stellt den Themenbereich der Aufgabenteilung zwischen dem Menschen und der Maschine dar, danach wird ein für die vorliegende Anwendungsdomäne geeignetes Schema der Aufgabenzuweisung zur Anwendung im Automatisierungsansatz ausgewählt. Kapitel 2.4 zeigt generelle konzeptionelle Möglichkeiten der Aktivierung von Automationsfunktionalitäten auf, woraus eine geeignete Adaptionsstrategie abgeleitet wird. Um Erkenntnisse und Möglichkeiten zur Entlastung von Operateuren zu erlangen, werden in Kapitel 2.5 grundlegende Zusammenhänge der menschlichen Informationsverarbeitung anhand von Konzepten und Modellen aus der Literatur nachvollzogen, relevante Konzepte auf das Anwendungsfeld übertragen und eine geeignete Entlastungsstrategie ausgearbeitet. Bevor in Kapitel 2.6 aus der Forschung bekannte *Human Factors* (potentielle Effekte von Automatisierungslösungen auf Benutzer) zusammengetragen, auf Relevanz hin bewertet und wichtige Konzepte ausgewählt werden, wird das gesamte Kapitel in 2.7 mit einer Erkenntnisaufbereitung, Diskussion und Motivation einer Lösung abgeschlossen.

Kapitel 3 beginnt mit dem Vorschlag eines Lösungskonzepts als Grundlage der Automatisierungslösung (Kapitel 3.1) sowie der Darstellung deren Umsetzung im Rechner (Kapitel 3.2). In Kapitel 3.3 wird die zugrundeliegende Designphilosophie der Realisierung für die visuelle Datenrepräsentation aufgestellt. In Kapitel 3.4 wird das prinzipielle Gestaltungskonzept der Automationsgrade aufgezeigt, in Kapitel 3.5 erfolgt die Vorstellung der konkreten, ausgearbeiteten Umsetzung. Nachfolgend werden das angedachte Wirkprinzip der Automationsgrade hinsichtlich der Beanspruchung des Operateurs (Kapitel 3.6) und die Anpassungsfähigkeit der Automation als Teil der Lösung (Kapitel 3.7 und 3.8) dargestellt.

Kapitel 4 stellt die experimentelle Evaluierung der Automatisierungslösung im Simulator vor. Eingangs wird dabei die angewendete Operationalisierung (Kapitel 4.1) skizziert. Anschließend werden in Kapitel 4.2 relevante, experimentelle Vorabuntersuchungen zur Verifizierung der zuvor im Rahmen des Lösungskonzepts getroffenen Annahmen dargestellt. Kapitel 4.3 beschreibt die zur

Evaluierung aufgebaute und verwendete Experimentalumgebung, wonach in Kapitel 4.4 das Versuchskonzept und der Versuchsablauf erläutert werden. In Kapitel 4.5, 4.6 und 4.7 werden auf die Versuchsteilnehmer, den strukturellen Aufbau der Experimentalkampagne sowie die zur späteren Auswertung erfassten Daten eingegangen.

In Kapitel 5 erfolgt die Darstellung und Evaluierung der aus der Messkampagne gewonnenen Daten und Informationen. Dabei werden Erkenntnisse aus der vorgenommenen Operationalisierung gewonnen, anhand derer die Forschungsfragen beantwortet werden.

Kapitel 6 beginnt mit einer Zusammenfassung und Diskussion der Ergebnisse (Kapitel 6.1). Die Beantwortung der Forschungsfragen erfolgt schließlich in Kapitel 6.2. Der Lösungsansatz und das die experimentelle Evaluierung werden in Kapitel 6.3 einer kritischen Betrachtung unterzogen, dabei werden Verbesserungspotentiale aufgezeigt. In Kapitel 6.4 wird ein Fazit formuliert, wonach die Arbeit durch Kapitel 6.5 mit Empfehlungen und einem Ausblick abgeschlossen wird.

Kapitel 2

Stand von Forschung und Technik

Dieses Kapitel stellt für diese Arbeit relevante Aspekte und Konzepte aus der Literatur und Forschung vor. Dabei wird der Stand von Forschung und Technik jeweils für die Themengebiete der

- maschinellen Bilddatenauswertung,
- Anbindung von Operateuren an informationsverarbeitende Automatisierungslösungen,
- Aufteilung von Aufgaben auf die Akteure Mensch und Maschine,
- schematischen Adaptierung von Automationslösungen,
- Entlastungsmöglichkeiten von Operateuren sowie die
- Auswirkungen und Effekte von Automationssystemen auf Operateure

dargestellt und diskutiert.

2.1 Maschinelle Bilddatenauswertung zur luftgestützten Objekterkennung

2.1.1 Grundprinzip als Prozesskette

Für die vorliegende Anwendung (siehe Kapitel 1.1) sollen aus rohen Daten eines bildgebenden Missionssensors (optisches Kamerasystem) maschinell Objektinformationen durch geeignete Automationsroutinen extrahiert werden. Die prinzipiellen Verarbeitungsschritte, welche der Auswertungsprozess bei der Ergebnisextraktion aus rohen Signaldaten der Sensoren dabei durchläuft, werden prinzipiell in Abbildung 2.1 dargestellt.

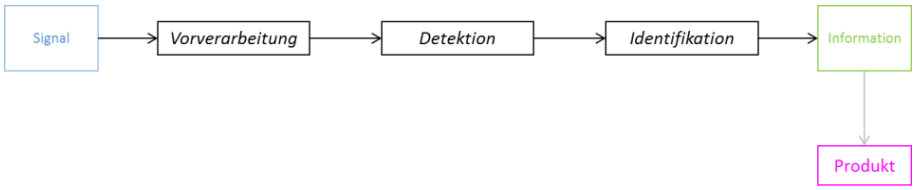


Abbildung 2.1: Prozesskette der maschinellen Bilddatenauswertung zur Objektextraktion (Prinzip).

Die Zielsetzung dabei ist, durch abstrahierende Prozessschritte aus Sensorrohdaten (blau) Information (grün) zu gewinnen, welche dann als Produkt der Verarbeitungskette (magentafarben) bezeichnet werden. Dazu werden in Verarbeitungsmodulen Funktionsblöcke aus den Bereichen der *Vorverarbeitung* von Daten, der *Detektion* (Erkennung) sowie der *Identifikation* (Klassifizierung) kategorisiert und in der skizzierten Reihenfolge verkettet. Das Prinzip findet Verwendung im *Sensor- und Perzeptionsmanagement (SPM)*, welches im nächsten Abschnitt vorgestellt wird.

Dabei bezeichnet die

- *Vorverarbeitung* der Daten eine Anwendung von Verfahren, welche die Ausführung nachfolgender Prozessschritte vereinfacht oder erst ermöglicht, wie beispielsweise die Bildstabilisierung, Entzerrung, Weißabgleich, Farbraumkonversationen oder Segmentierungsverfahren auf Signalebene beziehungsweise eine Kombination aus diesen.
- *Detektion* die reine (algorithmische) Erfassung bzw. Erkennung eines Objektvorkommens als Teil der Wahrnehmung durch die Perzeptionskette, beispielsweise die Erkennung von Fahrzeugen im Bild.
- *Identifikation* die Einordnung der Detektion in ein gewisses Klassenschema. Ein solches sieht die Zuordnung der Detektionen zu bestimmten Klassen vor; bei einer Anwendung zur Fahrzeugerkennung könnte dies beispielsweise der Fahrzeugtyp oder ein gesinnungsbeschreibendes Merkmal (Feind/Neutral) sein.

Die Objekterkennung und -identifizierung mittels technischer Systeme ist auch unter der Begrifflichkeit der *Automatic Target Recognition* (*ATR*) (zu Deutsch: automatischen Zielerfassung) bekannt. Dabei wird die Fähigkeit eines Systems, Ziele in sensorisch erfassten Daten wiederzuerkennen, als automatische Zielerfassung bezeichnet ([Dudgeon & Lacoss, 1993], [Schachter, 2020]).

Entlang der Prozesskette der maschinellen Bilddatenauswertung zur Objektextraktion (Abbildung 2.1) herrscht dabei kein gleicher Abstraktionsgrad der verarbeiteten Daten vor.

Am Anfang der Kette (**Vorverarbeitung**) liegt ein niedriger Abstraktionsgrad vor, die Verarbeitung wird durch eine hohe Datenbandbreite (Rohdaten) und vielen darauf ausgeführten, elementaren und mikroskopischen Operationen charakterisiert, welche meist losgelöst voneinander auf Signalebene (Pixelebene) erfolgen. Diese Ebene ist durch eine hohe Anzahl wiederkehrender Operationen einer niedrigen Verarbeitungsstufe charakterisiert. Robuste Umsetzungen solcher Operationen sind seit dem Aufkommen der rechnergestützten Bildauswertung bekannt und verfügbar, relativ einfach im Rechner zu implementieren und generell robust und performant maschinell ausführbar.

Mittig in der Perzeptionskette (**Detektion**) erfolgt die Auswertung prinzipiell durch die Anwendung spezialisierter Operationen und Kriterien zur Herstellung eines Objektbezugs. Die Detektion bezeichnet das Ansprechen eines algorithmischen Detektors auf einen positiven Abgleich gewisser mikroskopischer und makroskopischer Bildmerkmale im Bild. Dabei werden durch den Rechner algorithmisch Zusammenhänge in den Signalen rekonstruiert (Mustererkennung), welche so aus den Signaldaten vorher nicht explizit ablesbar sind. Aus den Signaldaten wird ein möglicher Objektbezug abgeleitet, der Abstraktionsgrad steigt an. Spezifische Anwendungen erfordern dabei Objektdetektoren mit speziellen Methoden und Verfahren für (siehe Kapitel 2.1.2).

Am Ende der Perzeptionskette (**Identifizierung**) erfolgt die Extraktion (abstrakter) Information. Dies erfordert ein hohes „Verständnis“ der Daten, also ein umfangreicheres Kontextwissen. Eine solche Einordnung von Gegebenheiten und das Fällen einer Entscheidung (Identifikationsprozess) wird durch ihre Komplexität und Diffizilität charakterisiert. In der Anwendung der Objekterkennung und Bedrohungserkennung (Identifizierung) ist zusätzlich sehr spezielles, dennoch umfassendes situatives Verständnis von Nöten. Aufgrund der mangelnden Generalisierungsfähigkeit maschineller Auswertung stellt die Objektidentifikation die größte Herausforderung der rein maschinellen Abarbeitung der Perzeptionskette dar. Dieser Prozess wird auch als IFF (*Identitification of friend and foe*) bezeichnet [Perlovsky, Chernick, & Schoendorf, 1995].

Abbildung 2.2 zeigt den prinzipiell aufsteigenden **Abstraktionsgrad** der Daten entlang der Prozesskette, welcher anfangs niedrig ist (Signalraum), gegen Ende der Kette aber stark ansteigt (Raum abstrakter oder semantischer Information) (Abbildung 2.2). Die Darstellung folgt dabei dem Schema der Perzeptionskette maschineller Bilddatenauswertung (Abbildung 2.1), bei welcher entlang der Perzeptionskette ein aufsteigender Automatisierungsgrad (siehe Kapitel 2.2.2.1) durch den zunehmenden Einsatz von Algorithmen vorherrscht.

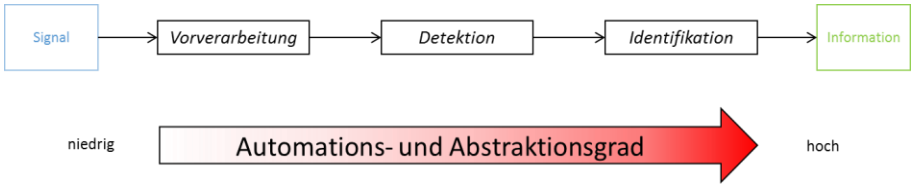


Abbildung 2.2: Erwarteter Verlauf des Automations- und Abstraktionsgrades entlang der Prozesskette.

2.1.2 Algorithmen zur luftgestützten Objekterkennung

In der Literatur und Forschung ist eine Vielzahl Algorithmen und Verfahren gelistet, mit welchen die Detektion von Objekten oder anderen Gegebenheiten, im speziellen aus Sensordaten unbemannter Flugsysteme (oder anderweitig erfassten Luftbildern), realisiert werden kann. Der Fokus liegt hier auf der Detektion von Personen und Fahrzeugen. Für eine umfassendere, detailliertere Auflistung erfolgt der Verweis auf externe und weitere Arbeiten (beispielsweise [Hajehasani, 2017], [Hellert & Stütz, 2018], [Stuetz, Ruf, & Schmitt, 2018], [Ruf, Zwick, Morawietz, & Stütz, 2019], [Hellert, 2019]).

Beispielhaft genannt werden hier Verfahren zur algorithmischen Fahrzeugdetektion basierend auf Kanten [Toth, G-Brzezinska, & Merry, 2003], beschreibenden Deskriptoren (*Features*) mit Merkmalbestimmung, maschinellem Lernen oder *Boosting* ([Nguyen, Grabner, Bischof, & Gruber, 2007], [Kozempel, Hausburg, & Reulke, 2011], [Gleason et al., 2011], [Tuermer et al., 2013], [Se et al., 2015] , [X. Chen & Meng, 2016], [Hajehasani, 2017]), Bewegung der Objekte ([Kaaniche et al., 2005], [Cao et al., 2011], [Se et al., 2015]) sowie modernen Verfahren der künstlichen Intelligenz, wie beispielsweise *Künstlichen Neuronalen Netzen* zur Bildauswertung ([X. Y. Chen, Xiang, Liu, & Pan, 2014], [Xu, Yu, Wang, Wu, & Ma, 2017], [Koga et al., 2018], [Yang et al., 2019], [Ammar et al., 2019], [Krump, Ruß, & Stütz, 2020]). Moderne Detektionsverfahren auf Luftbildern nutzen oder kombinieren auch algorithmische Verfahren zur pixelgenauen Segmentierung (sog. *semantische Segmentierung*) durch künstliche neuronale Netze zur Detektion und Klassifikation von Objekten (hauptsächlich Fahrzeugen) in Luftbildern ([Audebert, Le Saux, & Lefèvre, 2017], [S, Manohara Pai, Verma, & Pai, 2019], [Kovbasiuk, Kanevskyy, Chernyshuk, & Romanchuk, 2020]).

Abbildung 2.3 (linkes Bild) zeigt beispielhaft ein Ergebnis einer Fahrzeugerkennung aus Luftbildaufnahmen.

Verfahren zur algorithmischen Personenerkennung verwenden häufig formbasierte Deskriptoren (*Features*) mit Merkmalbestimmung und/ oder maschinellem Lernen ([Dalal & Triggs, 2005], [Beleznai & Bischof, 2009], [Oreifej et al., 2010], [Schmidt & Hinz, 2011], [Se et al., 2015]). Detektionen eines Verfahrens zur Personenerkennung in Luftbildern zeigt beispielhaft Abbildung 2.3 (rechtes Bild).

Abbildung 2.3: Luftbildgestützte algorithmische Fahrzeugerkennung (links) und Personenerkennung (rechts). Die Ergebnisse der Verfahren werden im Originalbild durch eine Umrandung annotiert. Bilder aus [Se et al., 2015].

Alle gesichteten Verfahren weisen hinsichtlich ihrer Erkennungsraten keine perfekten Resultate auf, sie sind durchgehend mit einem Faktor an Imperfektion und Unzuverlässigkeit behaftet, der sich durch eine verminderte Erkennungsleistung bemerkbar macht (beispielhaft aufgeführt seien [Liu & Mattyus, 2015], [X. Chen & Meng, 2016], [Koga et al., 2018], [Yang et al., 2019], [Ammar et al., 2019]).

2.1.3 Imperfektion und Zuverlässigkeit

Imperfekte Sensordatenauswertung von Kamerabildern resultiert in einer verminderten Zuverlässigkeit der Ergebnisse einer automatisierten Objektdetektion. Die Unsicherheitsbehaftung entsteht dabei durch

- *Limitierungen* der Verfahren
- die *Einsatzumgebung* und *Einsatzbedingungen*,
- die allgemeine *Komplexität* maschineller Objektwahrnehmung.

Die ersten beiden Klassen der Unsicherheitsbehaftung werden im Folgenden dargestellt.

2.1.3.1 Unsicherheiten durch intrinsische Limitierungen

Hinweis: Einige Inhalte und Grafiken dieses Abschnitts wurden bereits vorab in [Ruf et al., 2019] veröffentlicht.

Die in Kapitel 2.1.2 aufgezählten Verfahren und Algorithmen weisen systematische Limitierungen auf und sind Umgebungsbedingungen unterworfen, welche sich auf deren Einsatzfähigkeit und Zuverlässigkeit auswirken [Hellert, 2019]. Alle algorithmischen Verfahren und Vorschläge eint die Tatsache, dass die vorgestellten Verfahren mit Unsicherheiten und Imperfektion behaftet sind (beispielhaft aufgeführt seien [Liu & Mattyus, 2015], [Se et al., 2015], [X. Chen & Meng, 2016]). Auch neuartigere und *State-of-The-Art* - Algorithmen zur Erkennung von Objekten (vornehmlich Fahrzeugen) sind mit einem persistenten Faktor an unvorhersehbarer Unsicherheit behaftet ([Oreifej et al., 2010], [Tuermer et al., 2013], [Liu & Mattyus, 2015], [Se et al., 2015] , [X. Chen & Meng, 2016], [Hajehasani, 2017], [Koga et al., 2018], [Yang et al., 2019], [Ammar et al., 2019]). Dabei wird zusätzlich nur explizit die Detektion (also die Erkennung) von Objekten, nicht aber deren Identifizierung innerhalb einer Objektklasse betrachtet. Zur Darstellung der Gründe der Fehleranfälligkeit wurden zwei konkrete Parameterabhängigkeiten herausgearbeitet, dem die überwiegende Anzahl der Verfahren unterliegt. Als übereinstimmende, hauptsächliche Limitierungen konnten in den in Kapitel 2.1.2 genannten Verfahren

- der Ansichtswinkel der zu detektierenden Objekte sowie
- deren optische Auflösung im Bild

identifiziert werden. Die Abhängigkeit der Verfahrensgüte (also der Verlässlichkeit) dieser Verfahren wurde explizit in [Ruf et al., 2019] aufgezeigt.

Abbildung 2.4 zeigt exemplarisch die Arbeitsbereiche der vertikalen Objektansichtswinkel, welche oben genannte Objektdetektoren abdecken.

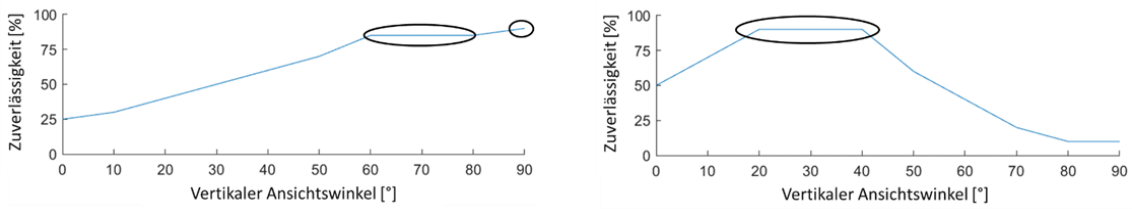


Abbildung 2.4: Interpolierte Zuverlässigkeit von Verfahren zur Fahrzeugerkennung (links) und Personenerkennung (rechts) in Abhängigkeit vom vertikalen Ansichtswinkel. Die Ellipsen markieren die Daten aus den zitierten vorangegangenen Arbeiten. Grafik aus [Ruf et al., 2019].

Dabei wird die interpolierte, rekonstruierte Zuverlässigkeit bestehender Detektionsalgorithmen zur Fahrzeug- und Personenerkennung in Abhängigkeit vom vertikalen Ansichtswinkel der Objekte grafisch aufgetragen. Dieser Zuverlässigkeitsgrad wurde in [Ruf et al., 2019] aus den Gütemaßen der Erkennungsraten der gesichteten Verfahren approximiert. Die markierten Bereiche (schwarze Ellipsen) zeigen dabei die anhand der Werte aus der Literatursichtung gestützten Bereiche. Ebenso fordern die Verfahren eine optische Mindestauflösung des Objekts im Bild, sie sind also nicht über einen weiten Bereich skalierungsinvariant. Für weiterführende Darstellungen wird auf weitere Quellen verwiesen ([Ruf et al., 2019], [Hellert, 2019]).

Beim Vergleich der Verläufe in Abbildung 2.4 wird ersichtlich, dass die charakterisierten Detektoren in jeweils anderen Betriebsbändern optimale Ergebnisse erzielen. Besonders Objekterkennungsverfahren zur Detektion und Objekten wie Fahrzeugen oder Personen unterliegen zudem einem situativ-kontextbezogenen Fehler (siehe Kapitel 2.1.3.3) und sind daher zur Laufzeit mit Unzuverlässigkeit und Imperfektion behaftet.

2.1.3.2 Unsicherheiten durch externe Einsatzbedingungen

Hinweis: Einige Inhalte, Grafiken und Satzteile dieses Abschnitts wurden bereits vorab in [Ruf, von der Mülbe, & Stuetz, 2017] veröffentlicht.

Wird ein bildgebendes Kamerasystem als Nutzlast von einem UAV transportiert, bewegt sich dieses in aller Regel in einer unstrukturierten und dynamischen Umwelt. Das spezifische Anwendungsfeld der Automatisierung der Aufklärungskomponenten unterliegt in einer solchen Umwelt zusätzlich weiteren domänenspezifischen Randbedingungen und Einschränkungen. Insbesondere automatisierte Objekterkennungsverfahren, welche durch Algorithmen realisiert werden, bergen das Risiko, in unstrukturierten Umgebungen und Situationen mit einer unbekannten Vielfältigkeit an Gegebenheiten mit einem fragilem Prozessverhalten mit schwankender Verlässlichkeit beaufschlagt zu sein [Ruf & Stütz, 2016]. Die Ursachen für solch für nichtdeterministisches Verhalten sind hohe Parametervarianzen in folgenden Umgebungen, zwischen denen Korrelationen bestehen können:

- *dynamische Umwelt* (veränderliche Licht- und Wetterverhältnisse),
- *dynamische Einsatzorte* (unterschiedliche Gelände- und Bodenbeschaffenheit, Vegetation),
- *perspektivische sensorische Erfassung* (Ansichtswinkel des Objekts, Boden- und Objektauflösung)
- *algorithmische Auswertung* (fehlerbehaftete Objekterkennung, imperfekte Algorithmen), insbesondere bei (teil-) verdeckten oder absichtlich getarnten Objekten.

Abbildung 2.5 verdeutlicht exemplarisch die Ursachen imperfekter Aufklärungsautomation.

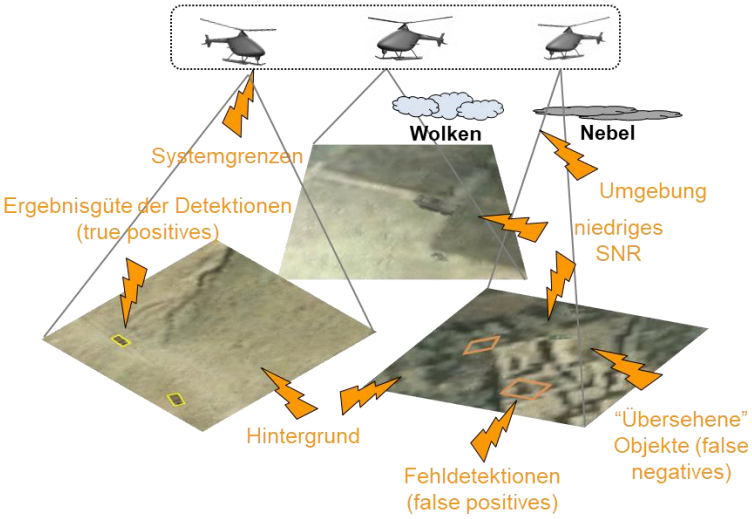


Abbildung 2.5: Ursachen imperfekter Aufklärungsautomation, Grafik aus [Ruf et al., 2017].

Dazu zählen hauptsächlich unbeeinflussbare Faktoren aus dem Bereich der Umwelt (*Umgebung*) wie beispielsweise das Wetter oder Lichtverhältnisse, die Oberflächenbeschaffenheit (Farbe und Struktur) des Geländes (*Hintergrund*), welche einen niedrigen optischen Kontrast (*niedriges Signal-zu Rauschverhältnis, SNR*) verursachen und zusätzlich ortsvariabel sein können. Die *Systemgrenzen* der technischen sensorischen Erfassung (beispielsweise Sensorauflösung, die Rauschbehaftung des Sensors oder die Abbildungstreue der Kameraoptik) beeinflussen ebenfalls die Güte der automatisierten Aufklärung. Diese Einflussgrößen bilden sich in der Ergebnisgüte der Detektionen sowie dem Auftreten von Fehldetektionen und vor allem des Risikos des „Übersehens“ von tatsächlich vorhandenen Objekten ab, insbesondere wenn aktive Tarnmaßnahmen derer ihre Entdeckung und Aufklärung erschweren.

In [Hellert, 2019] werden ergänzend als Einflussfaktoren auf die algorithmische Sensordatenverarbeitung in UAV-Anwendungen konkret geometrische Eigenschaften (Schräge Ansicht) der Luftbildaufnahme, atmosphärische Einflüsse (Wetter, Sonne, Reflektionen) sowie die Bodenbedeckung (Materialzusammensetzung der Bodenoberfläche) und Geländeform aufgezählt.

2.1.3.3 Zuverlässigkeit automatisierter Systeme

Im übergeordneten Kontext der Automatisierung und Automationstechnik (bezeichnet durch den Begriff *Automation*, 2.2.2.1) wird die Zuverlässigkeit eines technischen Systems auf abstrakter Ebene betrachtet. Die Vorteile, die ein Automationssystem erbringen kann, sind in weiten Teilen von dessen Zuverlässigkeit (in diesen Bereichen als *Reliability* bezeichnet) sowie dessen Handling von Fehlern abhängig.

In der Literatur erfolgt die Betrachtung der Zuverlässigkeit eines automatisierten Systems anhand dessen Fehlertypen oder mit der Anzahl auftretender Fehler ([Parasuraman & Riley, 1997], [Parasuraman, Sheridan, & Wickens, 2000], [Inagaki, 2003b]). Demnach dürfen eine Fehlfunktion oder der Ausfall eines Automationssystems grundsätzlich nie gänzlich ausgeschlossen werden. So schreibt [Inagaki, 2003b], dass es „*unrealistisch*“ sei anzunehmen, dass „*der Computer niemals ausfällt*“. Im Einzelnen zählt er als Gründe die Fehlfunktion von Hardware, Fehler in der Software und fehlerhafte Daten auf, die beispielsweise durch eine unvollständige Datenübertragung defektiv werden [Inagaki, 2003b]. Zudem ist nach [Parasuraman et al., 2000] die Zuverlässigkeit einer Automatisierungslösung nicht für alle Fälle ausschließlich probabilistisch definierbar, da Fehler nicht nur aufgrund statistischer Erwartungen des Ausfalls auftreten können. Ebenso müssen auch die Fehlfunktion oder Fehlverhalten in abweichenden Betriebssituationen und -umgebungen (wie in Kapitel 2.1.3.2 dargestellt) berücksichtigt werden, welche zur Designzeit nicht explizit berücksichtigt werden konnten [Parasuraman & Riley, 1997]. Dabei kann festgehalten werden, dass in der Literatur zwei wiederkehrende, grobe Fehlerklassen automatisierter Systeme beschrieben werden:

- *systematische, statistisch-probabilistische* sowie
- *situativ-kontextbezogene*

Fehler, welche beide zu einer verminderten Zuverlässigkeit führen.

Die Zuverlässigkeit eines Automationssystems als solche grenzt sich klar von der Messunsicherheit eventuell eingesetzter Sensoren als isoliert betrachtetet technische Vorrichtungen ab. Sensoren an sich sind nach ([Mitchell, 2012], Seite 22) generell mit Messfehlern behaftet, mit welchen die Erfassung einer realen physikalischen Größe unweigerlich beaufschlagt ist. Dazu zählen nach ([Mitchell, 2012], Seite 22) die drei Fehlerklassen der

- *zufälligen*
- *systematischen Fehler* sowie
- *Fehlmessungen*.

Die Fehlerarten von Sensoren tauchen in tieferliegenden Systemschichten auf, und Fehler können sich im Gesamtsystem propagieren. Diese Fehlerarten behaften die Systeme mit verschiedensten Sensoren mit „Messfehlern“ und Indeterminismus.

2.1.3.4 Quantifizierung der Verlässlichkeit

Im Bereich des *Reliability Engineerings*[18] und im abstrakteren, übergeordneten Automatisierungskontext bezeichnet per Definition der Begriff der *Reliability*[19] (Zuverlässigkeit) eines (gesamten) System „*die Wahrscheinlichkeit, dass*“ dieses „*seine beabsichtigte Funktion unter bestimmten Auslegungs- und Konstruktionsgrenzen erfüllt*“, und „ *... unter den Betriebsbedingungen ... einwandfrei funktioniert.*“ [Pham, 2006]. Quantitativ beschreibt die Zuverlässigkeit die Wahrscheinlichkeit, „*dass innerhalb eines bestimmten Zeitintervalls keine Betriebsunterbrechungen*“ (Fehler und Ausfälle) „*auftreten.*“ [Birolini, 2010].

Ein übliches Bewertungsschema für die Verlässlichkeit bzw. die Ergebnisgüte von Detektionsalgorithmen in der maschinellen Bilddatenauswertung erfolgt am Prinzip eines binären Klassifikators. Dabei sollen prinzipiell interessante Objekte durch den Einsatz von Algorithmen vom Hintergrund getrennt werden. Die Qualifizierung und Quantifizierung erfolgt dabei anhand der Maße der:

- *Korrektheit* (*correctness* (TP/TP+FP))
- der *Vollständigkeit* (*completeness* (TP/TP+FN)) sowie
- *Qualität* (*quality* (TP/TP+FP+FN)),

beispielhaft angewendet zur Ermittlung des Ansprechverhaltens eines Objektdetektors in [Tuermer et al., 2013]. Mitunter wird dieses Maß aber auch eingesetzt, um die Klassifikation einzelner Objekte oder Pixel zu einer Objektklasse in Datenreihen zur quantifizieren. Dabei bezeichnet TP die Summe der „*True Positives*“ (Korrekte Detektionen), FP bezeichnet die Summe der „*False positives*“ (Fehldetektionen) und FN bezeichnet die Summe aller „*False Negatives*“ (übersehene Objekte) der Meldeergebnisse des Detektors, schematisch dargestellt in Abbildung 2.6.

Abbildung 2.6: Beispielhafte Meldeergebnisse eines Objektdetektors, mit der Zuordnung als korrekte Detektionen (TP) in grün, der Fehldetektion (FP) in rot und dem Ausbleiben eines Meldeereignisses (FN) (keine Umrandung des Objekts, weißer Kreis).

Des Weiteren sind als Bewertungsmaße für die Qualität von Detektionsalgorithmen

- *Recall*- und *Precision*-Raten oder
- vorherige kombiniert als *F1-Maß* [Powers, 2011] sowie

[18] *Reliability Engineering* ist eine Unterdisziplin des *System Engineering* und befasst sich mit der Verlässlichkeit und Zuverlässigkeit technischer Systeme.

[19] Die DIN-Norm definiert die Zuverlässigkeit (Reliability) eines Systems: „Systeme gelten als zuverlässig, wenn eine geforderte Funktion unter gegebenen Arbeitsbedingungen während einer festgelegten Zeitdauer ausfallsfrei ausgeführt wird“ [DIN 40041, 1990].

- *ROC-Kurven*

gebräuchlich (beispielsweise verwendet in [Gleason et al., 2011]).

Trennt ein algorithmisches Verfahren über eine pixelgenaue Einteilung Objekte vom Hintergrund, kann dessen Zuverlässigkeit über die Genauigkeit dieser Abgrenzung erfolgen. Dabei kommt die Metrik der IoU (*Intersection of Union*) zur Anwendung, welche auf dem *Jaccard*- Koeffizienten ["Ähnlichkeits- und Distanzmaße," 2007] basiert und prinzipiell die Überlappung des Bildbereichs der Objektdetektion mit dem wahren Verfahrensergebnis (*Groundtruth*) formuliert und quantifiziert [Rezatofighi et al., 2019].

Im Kontext des *Sensor- und Perzeptionsmanagements* (SPM) (Kapitel 2.1.4) wird ein prozentualer Wert vorgeschlagen, mit welchem die Ergebnisse einer *Perzeptionskette* hinsichtlich deren Verlässlichkeit behaftet werden. Diese Ergebnisgüte wird als *Trustworthiness* bezeichnet und kann zur Laufzeit während des Einsatzes dynamisch ermittelt werden.

Tabelle 1 zeigt abschließend die in der Literatur verzeichneten Metriken und ihre Eigenschaften, welche für die Quantifizierung der Zuverlässigkeit von Verfahren maschineller Objekterkennung aus Luftbildaufnahmen gebräuchlich sind:

Metrik	***Groundtruth*[20] erforderlich**	**online-fähig**
Binärer Klassifikator (TP, FP, FN)	X	
Kombinierte Maße: F1, Recall & Precision, ROC-Kurven	X	
IoU (*Intersection of Union*)	X	
Leistungsindex *„Trustworthiness"* [Russ et al., 2012]		X

Tabelle 1: Metriken zur Quantifizierung der Verlässlichkeit einer maschinellen Objekterkennung.

Im Folgenden werden die Ansätze des Sensor- und Perzeptionsmanagements dargestellt, welches die Verwaltung und Organisation aller an den Aufklärungsprozessen beteiligter Hard- und Softwareressourcen einer sensortragenden Aufklärungsplattform zur Einsatzzeit durchführt.

2.1.4 Sensor- und Perzeptionsmanagement auf Sensorflugplattformen

Die übergeordnete Zielsetzung von Aufklärungsprozessen[21] besteht weitestgehend darin, durch Organisation mehrerer Sensorquellen und Methoden der Datenverarbeitung ein „*vereinheitlichtes Abbild der Umwelt*" zu erstellen, auch bezeichnet als „*environmental image*" ([Mitchell, 2012], Seite 6).

Das hierfür nötige Grundprinzip, welches verfügbare Ressourcen (Hard- und Software) eines einzelnen Systems (beispielsweise eines einzelnen unbemannten Luftfahrzeugs) zur Laufzeit verwaltet, wird allgemein als *Sensor Management*[22] bezeichnet. Ein solches Sensormanagement beschreibt dafür einen grundlegenden Ansatz, welcher eine dynamische Ressourcenallokation für

[20] Als Groundtruth wird das wahre Verfahrensergebnis bezeichnet.
[21] im Kontext der Multi-Sensor Datenfusion
[22] Sensor Management wird definiert als einen Prozess, „der darauf abzielt, die Verwendung einer Menge von Sensoren in einer dynamischen, unsicheren Umgebung zu verwalten oder zu koordinieren, um die Leistung des Systems zu verbessern". [Xiong & Svensson, 2002]

Systeme mit Sensorik und Sensordatenverarbeitung umfasst ([Hero, Castañón, Cochran, & Kastella, 2008], [Hero & Cochran, 2011], [Hellert, 2019]).

Am Institut für Flugsysteme wird das System des SPM (*Sensor- und Perzeptionsmanagement*) ([Russ et al., 2012], [Hellert et al., 2012], [Russ, Schmitt, Hellert, & Stuetz, 2013]) zur Anwendung auf unbemannten Sensorflugplattformen vorgeschlagen, um Ressourcen eines Aufklärungssystems (Hard- und Software) einer unbemannten Flugplattform zur organisieren (Abbildung 2.7).

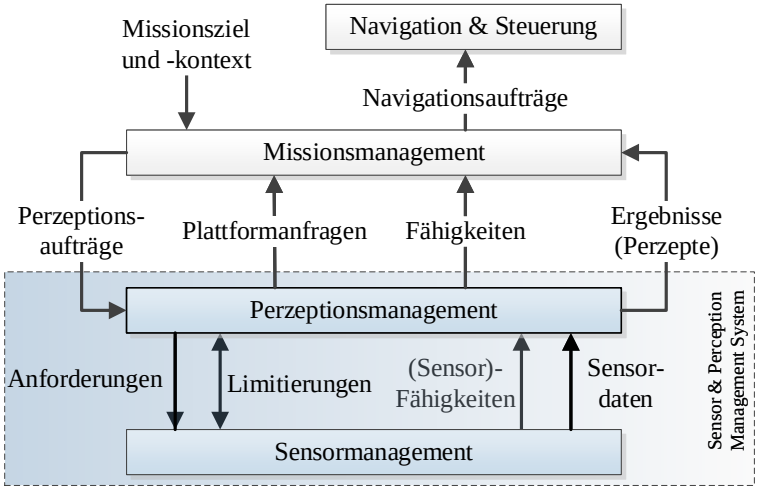


Abbildung 2.7: Systemkonzept des Sensor- und Perzeptionsmanagements nach ([Russ et al., 2012], [Hellert et al., 2012]). Grafik aus [Hellert, 2019].

Das Paradigma greift Prinzipen des Sensormanagements ([Hero et al., 2008], [Hero & Cochran, 2011]) auf und erweitert dieses, um einem der grundlegenden Probleme, nämlich der in Missionen dynamisch beschränkten und situativen Tauglichkeit der Ressourcen [Hero & Cochran, 2011], systematisch und aktiv zur Laufzeit begegnen zu können. Dazu finden in Systemschichten (dargestellt in Abbildung 2.7) sowohl ein Perzeptionsmanagement (Management von Algorithmen) als auch ein Sensormanagement statt, wobei beide Schichten im Sinne einer gemeinsamen, optimierten Verwendung aller Ressourcen (Algorithmen und Sensoren) interagieren. Das SPM wiederum interagiert im Sinne einer Missionsausführung mit einem Missionsmanagementsystem (obere Schicht), um einzelne Perzeptionsaufträge (beispielsweise *Aufklärungsaufgaben*) abzuarbeiten.

Das Paradigma strebt an, einem Operateur durch Automatisierungsmechanismen (welche auf Algorithmen zur Sensordatenauswertung basieren) umweltwahrnehmende (perzeptive) Fähigkeiten des UAVs zu Aufklärungszwecken in ISR[23]-Missionen und zur Missionserfüllung im Sinne der *auftragsbasierten Führung* ([Uhrmann, 2013], [Rudnick & Schulte, 2017]) bereitzustellen. Solche Fähigkeiten können beispielsweise die Suche von bodengebundenen Objekten wie Fahrzeugen oder Personen aus der Luft [Hellert, 2019], die Kartierung von Bodenflächen, die Suche nach möglichen Landezonen [Schmitt & Stuetz, 2018] oder automatische Überwachung von Gebieten sein.

Die prinzipielle Prozesskette der maschinellen Bilddatenauswertung zur Objektextraktion (Abbildung 2.1) wird dabei im Perzeptionsmanagement als sogenannte *„Perzeptionskette“* modelliert ([Russ et al., 2012], [Hellert et al., 2012]). Im Konzept assoziiert diese Kettenbildung einen Vertrauenswert (*„Trustworthiness“)* hinsichtlich der Ergebnisgüte der Produkte einer

[23] ISR - *Intelligence, Surveillance and Reconnaissance*, eine Variation der militärischen *ISTAR*-Fähigkeit (*Intelligence, surveillance, target acquisition, and reconnaissance*). Definiert nach [Director of Army Doctrine, 2004] die Fähigkeit: *“ISTAR is a grouping of information collection, processing, dissemination and communication assets designed, structured, linked and disciplined to provide situational awareness (SA), support to targeting and support to commanders in decision making.”*

Perzeptionskette, mit welcher der gesamte maschinelle Erkennungsprozess pauschal behaftet ist ([Russ et al., 2012], [Hellert et al., 2012], [Russ et al., 2013]).

2.1.5 Diskussion

Hinweis: Einige Satzbausteine dieses Abschnitts wurden bereits vorab in [Ruf et al., 2017] veröffentlicht.

Wie in Kapitel 2.1.2 dargestellt, sind Algorithmen zur Fahrzeug- und Personenerkennung zwar vorhanden, deren Ergebnisse aber in Anhängigkeit der Umgebung und Gegebenheiten des Einsatzes mit Imperfektion behaftet. Dabei muss angemerkt werden, dass eine komplett fehlerfreie maschinelle Wahrnehmung zur Erstellung eines realitätsbeschreibenden Abbildes der Umwelt derzeit nicht existiert.

Dabei widmet sich die Forschung derzeit verstärkt der Verbesserung der Aufklärungsleistung und der Etablierung neuer Verfahren. So spielen lernbasierte Verfahren mittels künstlicher neuronaler Netze sowie deren Anlernen zur Verbesserung der Verfahren eine zentrale Rolle [Zhu, Sun, Wen, Feng, & Hu, 2020]. Dabei liegt der wissenschaftliche Fokus auch auf der Nutzung von Simulationswelten, um die Verfahren mit großen Datensets anlernen und weiter verbessern zu können [Krump et al., 2020]. Ebenso widmet sich aktuelle Forschung auch der Anpassung der Verfahren an den Umgebungskontext, um die Robustheit der von Aufklärungsprozessen auf unbemannten Sensorflugplattformen maschinenseitig zu erhöhen, wobei sowohl Verfahren zur gezielten situativen Auswahl geeigneter Detektoren während des Einsatzes [Hellert, 2019] als auch zur optimierten Steuerung der Flugplattform selbst [Zwick, Koch, & Stütz, 2020] angewendet werden. Mit diesen aktiven Bestrebungen wird weiterhin versucht, die bestehende Unsicherheits- und Fehlerbehaftung der Algorithmen während Aufklärungsprozessen weiter zu vermindern.

In Kapitel 2.1.3 wurde konkret auf diese Unsicherheitsbehaftung algorithmischen Verfahren zur luftgestützten Objektaufklärung beim Aufklärungseinsatz detailliert eingegangen. Die Zuverlässigkeit technischer Prozesse ist allgemein ein wesentliches Kriterium für die Anwendung im Automationskontext, denn Vorteile durch Automation hinsichtlich der Belastung, Beanspruchung und des Situationsbewusstseins des Bedieners sind nur bei ausreichender Zuverlässigkeit zu erzielen [Parasuraman et al., 2000]. Die Verlässlichkeit der automatisierten Objekterkennung hat direkten Einfluss auf die Aufklärungsleistung, durch welche sich der potentielle Nutzen und die Performanz der Aufklärungskomponente ergibt.

Der konkrete, situative Zuverlässigkeitsgrad einer solchen teils nichtdeterministischen, teils probabilistisch-funktional geprägten Automatisierung der Aufklärungsfunktionalität durch Algorithmen liegt bestenfalls in Form eines qualitativen Maßes bzw. einer quantifizierbaren Verlässlichkeit vor. Als hauptsächliche Ursache der Unzuverlässigkeit konnten für den vorliegenden Anwendungsfall *situativ-kontextbezogene* Fehler durch externe Einsatzbedingungen sowie intrinsische Limitierungen der maschinellen Datenauswertung identifiziert werden.

Im Kontext automatisierter Sensordatenverarbeitung liefert das SPM dabei den Vorschlag, die Prozesskette der maschinellen Bilddatenauswertung (*Perzeptionskette*) sowie deren Kettenglieder mit einem Verlässlichkeitswert (*Result Trustworthiness*) hinsichtlich deren Prozessgüte zu behaften [Russ et al., 2013]. Dieses quantifizierende Maß kann, im Gegensatz zu Bewertungsschemata von Detektionsalgorithmen in der Bildverarbeitung (Kapitel 2.1.3.4), zur Laufzeit erfolgen. In [Hellert & Stütz, 2017] wurde eine Methodik zur Abschätzung der Performanz für Bildverarbeitungsalgorithmen, welche die Grundlage für automatisierte Objekterkennung in Bildmaterial bilden, vorgestellt.

Für die vorliegende Arbeit wird insbesondere der durch das SPM vorgeschlagene Vertrauenswert beziehungsweise die Verlässlichkeit („*Trustworthiness“)* maschineller Prozesse weiterverwendet und bei der Anwendung in unstrukturierten Umgebungen herangezogen.

Im Folgenden wird daher unter der Begrifflichkeit *Trustworthiness* pauschal die Zuverlässigkeit einer automatisierten, algorithmischen Objekterkennung verstanden.

Aus der Literatur geht als pauschale Empfehlung ein Wert von 70 % als Schwelle der Erkennungsleistung hervor, bis zu welchem automatisierten Prozesse einen Mehrwert gegenüber der manuellen Durchführung liefern sollen. Diese Empfehlung wird in jedoch nur als Vergleich herangezogen, da in der vorliegenden Arbeit keine Gegenüberstellung zu einer rein manuellen Durchführung von Aufklärungsaufgaben als Baseline vorgenommen wird.

Mit der Darstellung des Grundprinzips der Signalprozesskette aus Kapitel 2.1.1 und der Unsicherheitsbehaftung der einzelnen Prozessschritte wird ein absteigender Verlauf der Verlässlichkeit der maschinellen Prozesse entlang der gesamten *Perzeptionskette* erwartet, welcher gegenläufig zum Automations- und Abstraktionsgrad der Kette orientiert ist (Abbildung 2.8).

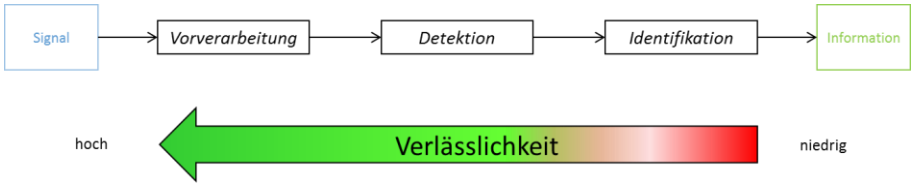


Abbildung 2.8: Erwarteter Verlauf des Grads der Verlässlichkeit entlang der Perzeptionskette bei maschineller Ausführung im Rechner.

Dabei sind maschinelle Operationen auf den niedrigen Verarbeitungsstufen, welche kein Verständnis über die Daten erfordern, robust und bieten eine hohe Verlässlichkeit. Operationen am oberen Ende der Verarbeitungskette hingegen erfordern ein abstraktes Verständnis und sind aufgrund der hohen Komplexität in der vorliegenden Anwendung mit einer niedrigeren Robustheit behaftet, was mit einer niedrigen Ergebnisgüte (Verlässlichkeit) einhergeht.

Das Risiko, dass die am oberen Ende der Verarbeitungskette verorteten, automatisierten Prozesse scheitern, ist stark erhöht.

Es liegt daher nahe, in den Fällen niedriger Systemverlässlichkeit den menschlichen Operateur hinzuzuziehen.

Aufbauend auf den Modellvorstellungen der Perzeptionskette sowie deren Unsicherheitsbehaftung sollen im weiteren Verlauf Möglichkeiten gesucht werden, wie Ressourcen menschlicher Operateure in den Auswertungsprozess einbezogen werden können. In seiner derzeitigen Entwicklungsstufe wirkt das SPM als Managementsystem zur Koordination rein technischer Ressourcen, die Betrachtung menschlicher Ressourcen erfolgt dabei nicht. Es wird weiterhin offengehalten, Aufklärungsprozesse durch eine menschliche Komponente zu unterstützen und zu vervollständigen. Dies trifft insbesondere auf die Identifikation und Klassifikation von Objekten zu [Hellert, 2019], aber auch für die Bewertung und Einordnung unsicherer Ergebnisse.

Zusammenfassend kann aus diesem Unterkapitel abgeleitet werden, dass ein vermehrter Einsatz von Automation entlang der Perzeptionskette das Risiko des Scheiterns und das Aufkommen von Unsicherheit potentiell begünstigt. Insbesondere die Automatisierung der höherwertigeren Fähigkeiten im „hinteren“ Teil der Kette birgt das Risiko, prinzipbedingt eine geringe Robustheit und damit geringe Verlässlichkeit in die Kette einzubringen. Diese Erkenntnisse treffen insbesondere auf die maschinelle Bilddatenauswertung zur luftgestützten Objekterkennung zu. Dabei hat sich abgezeichnet, dass die Sensordatenauswertung in der Literatur konzeptionell weitestgehend ohne jegliches Zutun eines menschlichen Unterstützers stattfindet. Ebenso fanden Mechanismen zur expliziten Wiederherstellung der Systemverlässlichkeit, insbesondere bei nicht robusten maschinellen Prozessen, in vorangegangenen Arbeiten keinerlei weitere Betrachtung. Im Folgenden werden daher Möglichkeiten und Konzepte hinsichtlich der Integration des Operateurs in maschinelle Datenauswerteprozesse und damit der Fusion technischer und menschlicher Fähigkeiten vorgestellt und analysiert.

2.2 Anbindung und Integration eines Operateurs an / in Datenauswerteprozesse

Für die Anbindung eines Operateurs an beziehungsweise dessen Integration in ein technisches System existieren in der Literatur zwei wesentliche Entwürfe. Zum einen wird ein Nutzer konzeptionell im *technisch* motivierten Kontext der Datenfusion betrachtet, während in der *arbeitswissenschaftlich* motivierten Herangehensweise anhand von Mensch-Maschine-Systemen verschiedene konkrete Automatisierungsansätze (teils mit Nutzerintegration) aufgezeigt werden.

Im Folgenden werden dazu in der Literatur bekannte Möglichkeiten detailliert dargestellt und im Fazit für ihre Tauglichkeit zur Integration eines Operateurs ins Perzeptionsmanagement unbemannter Aufklärungsplattformen eingeordnet.

2.2.1 Abstrakt im Konzept technischer Datenfusion

Eine generelle mögliche Integration der menschlichen Komponente wird im Großkonzept der Multi-Sensor-Datenfusion beim Prozessmodell und Nutzerintegrationsansatzes des DFIG-Modells (*Data Fusion Information Group Model* ([Llinas, Liggins, & Hall, 2000], [Blasch & Plano, 2005]) vorgeschlagen. Es bietet ein umfangreiches Modell zur automatisierten Datenverarbeitung und Fusion, wobei insbesondere dem Nutzer in dieser Entwicklungsstufe eine zentrale Rolle zugeteilt wird.

Dabei wird das Grundprinzip des Prozessmodells durch eine sogenannte abstrakte *Fusionspipeline*[24] gebildet, entlang derer algorithmische Datenverarbeitungs- und Datenfusionsschritte mit optionaler Einbindung menschlicher Ressourcen erfolgen [Blasch, 2006] (Abbildung 2.9).

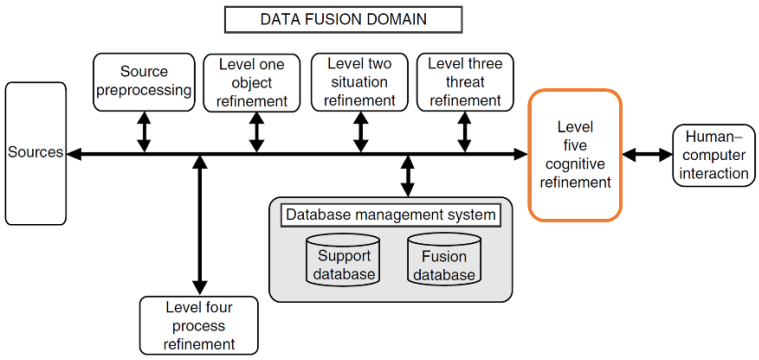


Abbildung 2.9: JDL-Levels entlang der Fusionspipeline mit Einbezug eines menschlichen Nutzers (orange) in den Fusionsansatz nach [Hall, Hall, & Tate, 2000], Grafik aus ([Llinas et al., 2000], Seite 678).

Das Konzept beinhaltet sechs Verarbeitungsstufen (basierend auf den *JDL*-Levels[25] [Mitchell, 2007]), welche Verarbeitungsoperationen auf unterschiedlichen Granularitäten und Abstraktionsstärken der Daten kategorisieren. In [Llinas et al., 2000] werden mehrere Kategorien von Fusionstechniken (Datenfusion, Sensorfusion, Informationsfusion[26], Anzeigefusion, Kognitive Fusion) benannt, welche entlang der Fusionspipeline in das Konzept eingebracht werden können. Das Modell sieht konzeptionell einen expliziten Einbezug des Nutzers vor (Level 5: *„Cognitive*

[24] Als Ziele des Fusionsprozesses werden die „*Erhöhung der Qualität*“, eine „*reduzierte Dimension/ Ordnung*“ sowie eine „*verminderte Unsicherheit*“ der Ergebnisse angestrebt [Llinas et al., 2000].

[25] Prozessmodell der *Joint Directors of Laboratories (JDL) Data Fusion Working Group*, [Mitchell, 2007]

[26] *Informationsfusion* wird in [Llinas et al., 2000] definiert als *„formale Berechnung, Technik und Prozess um Daten aus verschiedenen Quellen für eine Entscheidungsfindung zu kombinieren, integrieren und auszurichten“*. Sie umfasst explizit maschinelle und kognitive Fusionsfunktionalität.

Refinement"), wobei die Nutzerhandlungen oder -verfeinerungen als Übernahme von Verantwortlichkeiten angedacht sind, welche maschinelle Prozesse nicht zu leisten im Stande sind [Blasch, 2006]. Abbildung 2.9 zeigt die Berücksichtigung eines Nutzers im Fusionskontext, wobei „Verfeinerungen" durch den Nutzer auf der rechten Seite der Abbildung als „Kognitive Fusion" (*cognitive refinement*) dargestellt sind. Als Kognitive Fusion (*Cognitive Fusion*) wird verstanden, *„Informationen in das mentale Modell des Nutzers zu integrieren."* [Llinas et al., 2000], welche durch diesen weiter analysiert und interpretiert und gegebenenfalls wieder ins technische System eingetragen werden können.

Hinsichtlich des Auftretens des Nutzers im Konzept werden in [Llinas et al., 2000] fünf abstrakte und explizite Nutzerrollen vorgeschlagen, welche der menschliche Operateur im Fusionssystem annehmen kann. Die Taxonomie umfasst die Rollen des

- *Priorisierers*,
- *Sensors* (Wahrnehmers),
- *Bedieners*,
- *Controllers* und
- *Planers*,

wobei der Nutzer prädiktiv, reaktiv oder proaktiv agieren kann ([Llinas et al., 2000], Seite 512). Dazu werden in [Llinas et al., 2000] *Management-Moden* für den Nutzer *(„user management modes"*) beschreiben. Diese werden durch eine siebenstufige Skala definiert, welche von rein passiver bis maximal aktiver Nutzer- bzw. Systemfunktionalität reichen:

- bei Ausnahmen (*by exception*)
- durch Zustimmung (*by consent*)
- durch Übertragung
- durch Interaktion/Wechselwirkung (bevorzugt)
- assistierte Kontrolle

Als bevorzugten Modus schlagen [Llinas et al., 2000] für die Anwendung der komplexen Informationsfusion das interaktive, moderiert automatisierte „Management durch Interaktion" (*„management by Interaction"*) vor, was eine kompensatorisch und nicht-kompensatorische Strategie beinhalten kann.

Hinsichtlich einer Anbindung eines Operateurs an eine imperfekte Datenauswertungsfunktion konnte in [H. A. Ruff et al., 2002] gezeigt werden, dass Automation, welche einen menschlichen Entscheider benötigt, mit *management-by-consent* (Zustimmung) eine höhere Leistung erzielt als das mehr autonome *management-by-exception* (Behandlung von Ausnahme) und die nicht automatisierte, manuelle Durchführung.

2.2.2 Konkret in Mensch-Maschine-Systemen

Aus dem Betrachtungswinkel der Arbeitswissenschaft werden nun Möglichkeiten des Zusammenspiels zwischen einem Operateur und einem automatisierten System mit dem Hintergrund der Mensch-Maschine-Systemen dargestellt.

Das allgemeine Zusammenspiel von Menschen und Maschinen in einem umgebenden technischen System wird als *Mensch-Maschine-System* bezeichnet. Dieses *„Zusammenwirken"* im so entstehenden *„Gesamtsystem* soll nach [Johannsen, 1993] explizit *„zielgerichtet mit der Maschine"* erfolgen. Dadurch sollen in diesem bei der Erfüllung eines Arbeitsziels *„… bestimmte Arbeitsergebnisse … bestmöglich"* erreicht werden. In solch einem Verbund werden „*vor allem … komplexere technische Prozesse … häufig … durch Automatisierungseinrichtungen gefahren."* [Johannsen, 1993].

Führt also ein Operateur (mit der Unterstützung einer potentiellen Automatisierungseinrichtung) eine Aufgabe durch, wird dabei in der Literatur von einem *Arbeitsprozess* gesprochen. Ein solcher Arbeitsprozess bezeichnet nach [Onken & Schulte, 2010] den Ablauf des dynamischen Prozesses der Arbeit[27]. Dabei wird *„der Prozess der sinnvollen, zielorientierten Zusammenarbeit von Menschen (z.B. Bedienern) und Maschinen (z.B. unbemannte Vehikel (UVs) mit Automatisierung …“* [Schulte, Donath, & Lange, 2016] als *„Arbeitsprozess“* bezeichnet, dessen Produkt in diesem Zusammenhang (neben mechanischen Aufwendungen) auch „*ein Akt der Informationsverarbeitung und -übertragung*“ darstellen kann [Onken & Schulte, 2010].

In [Schulte et al., 2016] wird ein Arbeitsprozess innerhalb eines *Arbeitssystems*[28] auf die Zusammenarbeit von Mensch (*Worker*) und Maschine (*Tools*) verfeinert definiert. Abbildung 2.10 zeigt ein schematisches Entwurfsmuster (*Designpattern*[29]) zur Beschreibung eines Arbeitssystems nach [Schulte et al., 2016].

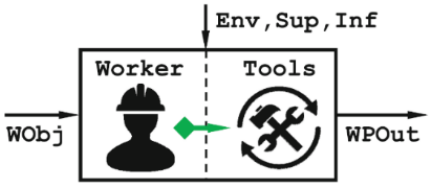


Abbildung 2.10: Arbeitssystem (Design Pattern) mit den Bestandteilen *Worker* und *Tools* in hierarchischer Beziehung (grün), Grafik aus [Schulte et al., 2016].

Im Arbeitssystem wird dabei die Erreichung eines gesteckten Arbeitsziels (**W**ork**Obj**ective) angestrebt, welches durch ein Arbeitsergebnis (**W**ork**P**rocess**Out**put) unter Umwelt,-Versorgungsbedingungen und/oder Informationsbereitstellung erreicht werden soll. Ein solches Arbeitssystem (bzw. Produktionssystem) umfasst nach [REFA Verband für Arbeitsgestaltung, Betriebsorganisation und Unternehmensentwicklung e. V., 2002] generell sieben grundlegende Elemente, zu denen die Arbeitsmittel, Arbeitsgegenstände, die Arbeitsaufgabe, Umwelteinflüsse sowie die Ein- und Ausgabekanäle und natürlich ein Mensch als Operateur zählen.

Zu den Arbeitsmitteln und Arbeitsgegenständen im Mensch-Maschine-System bzw. Arbeitssystem zählen (automatisierte) Prozesse oder (automatisierte) technische Einrichtungen oder Geräte, im Folgenden kurz als „*Automation*“ bezeichnet. In der Literatur der Arbeitswissenschaft sind Automatisierungsansätze bekannt, welche nach der Darstellung des Erkenntnisstandes zur Automation sowie deren Eigenschaften im Zusammenspiel mit einem Operateur nachfolgend dargestellt werden.

2.2.2.1 Automation in Mensch-Maschine-Systemen

Der Begriff der *Automation*[30] bezeichnet nach [DIN 19233] *„das Ausrüsten einer Einrichtung, so dass sie ganz oder teilweise ohne Mitwirkung des Menschen bestimmungsgemäß arbeitet.“*. Eine aktuelle Definition beschreibt Automatisierung als die *„Übertragung von Funktionen … vom Menschen auf künstliche Systeme“* [Voigt, 2018b]. In [Sheridan & Parasuraman, 2005] wird explizit herausgestellt, dass die Ausführung menschlicher mentaler (kognitiver) Arbeit durch Computer und

[27] Als *Arbeit* wird konzeptionell die *„zielgerichtete, … , planmäßige und bewusste, körperliche und geistige Tätigkeit*“ [Voigt, 2018a] eines Menschen verstanden, deren Rational die Erreichung eines (Arbeits-) Ziels unter der Aufwendung von Energie darstellt [Bubb, 2006].

[28] bezeichnet die Ausführung innerhalb eines physikalischen Systems als Arbeitsumgebung ([Onken & Schulte, 2010], [Schulte et al., 2016])

[29] Entwurfsmuster zur Modellierung von Arbeitssystemen mittels der Rollen *Worker* (Mensch) und *Tools* (Maschine) [Schulte et al., 2016]

[30] Für eine Abgrenzung des Begriffs der Automation (für maximal selbstregulierende Systeme) von dem der (in den Medien fälschlicherweise häufig als Synonym verwendeten) Begriff der *Autonomie* (für selbstverwaltende und evolutionsfähige Systeme) wird auf externe Definitionen verwiesen ([Steels, 1995], [Clough, 2002]).

deren Zusammenwirken mit Sensoren ebenfalls als Automation verstanden wird. Folglich wird solche Automation durch vier tragende Elemente beschrieben:

a) Aktive Umweltwahrnehmung durch die *„Erfassung von Umgebungsvariablen (durch künstliche Sensoren)“*
b) Maschinelle Datenauswertung durch Methoden der *„Datenverarbeitung und Entscheidungsfindung (durch Computer)“*
c) Umweltmanipulation durch *„mechanische Aktion (durch Motoren oder Vorrichtungen, die Kräfte auf die Umgebung ausüben) und/oder“*
d) Maschinelle Datenaufbereitung durch *„verarbeitende "Aktion auf Informationen"* und Kommunikation der verarbeiteten Informationen an Personen.

Dabei kann Automation den Menschen prinzipiell unterstützen oder Aufgaben des Menschen gar vollständig übernehmen [Sheridan & Parasuraman, 2005].

Die hauptsächlichen Ziele, welche allgemein durch das Design und den Einsatz von *„automatisierten Maschinen und Systemen“* erzielt werden können, sind:

- Eine Reduzierung des *„Arbeitsaufwands“*, der an den Menschen gestellt wird, um
- die *„Arbeitsbelastung“* des Menschen *„zu reduzieren“* ([Parasuraman & Riley, 1997], [Boehm-Davis, Curry, Wiener, & Harrison, 1983]).
- Die Erhöhung der *„Betriebs- oder Kontrollspanne“* eines einzelnen,
- die Ausführung von *„Funktionen …, welche über die normalen Fähigkeiten hinausgehen“*, um
- *„die Leistung“* des Operateurs *„über längere Zeiträume aufrechtzuerhalten“* und
- *„weniger alltägliche Aktivitäten durchzuführen“* zu können ([Boehm-Davis et al., 1983], [Parasuraman & Riley, 1997]).

Durch den Einsatz von Automation und das Zusammenspiel von Operateuren mit (hoch)-automatisierten Prozessen sind jedoch in der Literatur auch gegenteilige Effekte dokumentiert, zu diesen zählen:

- Die nicht immer ausschließliche Vereinfachung der Arbeit [Scerbo, 2008].
- Das Risiko des Auftretens oder die Begünstigung neuer Fehlerarten, insbesondere wenn die Zielvorstellungen von Mensch und Automationssystem nicht übereinstimmen ([Earl L. Wiener, 1989], [Parasuraman, Bahri, E. Deaton, G. Morrison, & Barnes, 1992], [N. B. Sarter & Woods, 1995], [Scerbo, 2008], [[Scerbo, 2008] nach [David D Woods, 1996]])
- Die *„Nichterfüllung des angedachten Benefits der Automation“* (beispielsweise im Falle von Ausfall oder unzulänglicher Unterstützungsleistung) mit dem Risiko der
- Mehrbeanspruchung des Operateurs *„als vor der Automatisierung“* ([Parasuraman et al., 1992], [Parasuraman & Riley, 1997]).
- Die unbewusste Schaffung *„unsicherer Arbeitsbedingungen“* [Parasuraman & Riley, 1997].
- Die Schaffung neuer, monotoner Aufgaben, welche negative Auswirkungen (*Human Factors*, Kapitel 2.6) auf den Operateur hervorrufen kann.

Im Rahmen der Forschungsaktivitäten in der Arbeitswissenschaft wurden insbesondere Designfehler beim Entwurfsprozess automatisierter Systeme als Ursache und auch als zukünftig potentielles Risiko operationeller Nachteile herausgearbeitet [C. E. Billings, 1997]. Vier (unerwünschte) Faktoren wurden als hauptsächlich probleminduzierende Eigenheiten identifiziert und in den Vordergrund gerückt:

- *Complexity* (Komplexität): Ein hoher Funktionsumfang, mehrere Funktionsmoden, Kontrollgrößen und Optionen, eine tiefe Spezialisierung einzelner Funktionen, eine (nicht immer offensichtliche) Kopplung von Systemen sowie viele mögliche Betriebsarten können die Komplexität beeinflussen. Diese Gegebenheit wird als auch modenreich (“*mode-rich*“) bezeichnet [N. B. Sarter & Woods, 1994].

- *Brittleness* (Brüchigkeit bzw. Sprödigkeit): Die Eigenschaft einer vollen, einwandfreien Funktionstüchtigkeit einer Funktionalität unter normalen Betriebsbedingungen, die jedoch am Rand des Funktionsumfangs (Betriebsenvelope) oder dessen Nähe nicht mehr sichergestellt werden kann, wird als *Brittleness* bezeichnet. Begründet wird dies durch die Vielzahl bzw. Gesamtheit an Betriebssituationen, welche ganzheitlich nicht zur Designzeit berücksichtigt werden können [C. E. Billings, 1997].
- *Opacity* (Undurchsichtigkeit, Intransparenz): Diese Eigenschaft ruft ein Unverständnis bzw. eine Unkenntnis seitens eines Benutzers sowohl über den aktuellen Betriebszustand und zum anderen die Absichten des automatisierten Systems hervor. Ursächlich dafür ist ein defizitäres mentales Modell (Kapitel 2.5) des Operateurs hinsichtlich der Automation bzw. deren Verhalten [C. E. Billings, 1997]. Ebenso kann diese Intransparenz durch mangelnde Kommunikation oder Koordination mit einem Operateur entstehen, was auch als *lack of transparency* bezeichnet wird [C. E. Billings, 1997]. Dabei liegt das Problem beim Design komplexer Systeme in der Abwägung, die richtige Art und Menge an Information[31] (offensichtlich nützliche, eindeutige Informationen) über einen Prozess darzustellen.
- *Literalism* (Wortwörtlichkeit, Buchstabenglaube): Diese Eigenschaft bezeichnet die schmalbandige, scharf abgegrenzte Funktionsfähigkeit von Automation (und Computern), welche auch als Buchstabenglaube oder „Engstirnigkeit“ („*narrow-mindedness*“ [C. E. Billings, 1997] nach S.W.A. Dekker, 1994) bezeichnet wird. Gemeint ist damit, dass maschinelle Funktionen ausschließlich fest programmierten Routinen exakt abarbeiten, dabei den Programmzeilen stur und sklavisch „auf das Wort“ (Wortwörtlichkeit) zu folgen. Automation kann dadurch (schon in bereits minimal abweichenden Situationen) begrenzt handlungs- und anpassungsfähig werden [C. E. Billings, 1997].

Bereits 1983 wurde *als Ironie der Automation* durch [Bainbridge, 1983] konstatiert und postuliert, dass besonders der Betrieb umfangreicher, fortgeschrittener und komplexer Systeme, welche eigentlich zur Entlastung oder gar Substitution des Menschen dienen sollen, grundsätzlich einen menschlichen, mitwirkenden oder am Arbeitsprozess beteiligten Operateur benötigen:

> *“… the irony that the more advanced a control system is, so the more crucial may be the contribution of the human operator.” [Bainbridge, 1983]*

Diese Bedenken bestehen bis heute und sind immer noch Gegenstand der Diskussion im Kontext von Automatisierungslösungen [Strauch, 2018].

Weitere Effekte und Auswirkungen der Automation bzw. deren Einsatzes auf den menschlichen Bediener, sogenannte *Human Factors* der Automation, werden in Kapitel 2.6 genauer dargestellt.

In der Literatur hat sich zudem als Schwerpunkt herauskristallisiert, dass Automation im Allgemeinen bisher offensichtlich lange ohne ausreichende Berücksichtigung der Bedürfnisse und Charakteristika des menschlichen Nutzers entwickelt wurde ([David D. Woods, 1988], [Parasuraman et al., 1992]) oder die Möglichkeit zur aktiven Einbringung dessen Fähigkeiten zur Lösung in Problemfällen vernachlässigt wurde. Dieses technisch-getriebene Vorgehen orientiert sich an realisierbaren Funktionen und technisch verfügbaren Möglichkeiten und wird als „*technologiezentrierte* Automation“ (*technology-centered automation*) bezeichnet [Parasuraman et al., 1992]. Dabei kann eine ungewollte Abgrenzung bzw. Abkopplung des Nutzers (*peripheralization* of the pilot, [S. Norman et al., 1988]) vom situativen und operativen Geschehen auftreten.

Automatisierungsansätze, welche den Benutzer der Automation, im speziellen dessen Anforderungen, Fähigkeiten und Limitierungen besser und Automation anhand der Bedürfnisse des Nutzers gestalten, werden als „*menschzentrierte* Automation“ (*human-centered automation*)

[31] Der Effekt der Opacity kann beim Systemdesign absichtlich zur Vermeidung unstrukturierter Informationsfülle, Redundanz und möglicher Reizüberflutung genutzt werden, also die Informationsmenge auf ein nötiges Maß zu reduzieren [C. E. Billings, 1997].

([NASA, 1990], [W B Rouse, 1991], [C. E. Billings, 1997]) bezeichnet, wobei sich daneben auch der Begriff der „*nutzerzentrierten*“ (“*user-centered*”) Technologie etabliert hat [C. E. Billings, 1996]. Bei der menschzentrierten Automation wird angestrebt, dass „*Mensch und Maschine auf eine komfortablere und kooperative Weise zusammenarbeiten*“ [Inagaki, 2003a] nach ([C. E. Billings, 1997], [C. D. Wickens, Mavor, & Mcgee, 1998]), wobei dem Mensch jederzeit die “*finale Autorität über die Automation*” obliegt [C. E. Billings, 1997]. Nach [Borst, 2016] stellt diese Perspektive immer noch einen *„fundamental neuen Ansatz“* dar, wie Menschen *„automatisierte Systeme wahrnehmen und mit diesen zusammenarbeiten“*, und zwar auf pointiert auf folgende Art und Weise:

> *“Automation itself must become a member within the human-machine team.“*
> *[Borst, 2016]*

Ein „*klassisches Ziel*“, welches dabei durch *Human Factors Engineering*[32] erzielt werden soll, ist eine „*gute Anpassung des Arbeitsumfelds an die menschlichen Fähigkeiten*“ ([C. D. Wickens & Hollands, 2000] nach [Byrne & Parasuraman, 1996]).

Neben dem pauschalen Begriff der Automation sind in der Literatur Automatisierungsansätze bekannt, welche den Systementwurf entlang den Leitlinien menschzentrierter Automatisierung und anhand der tatsächlichen Bedürfnisse von Operateuren und deren expliziter Berücksichtigung empfehlen. Im folgenden Kapitel werden die aus der Literatur verfügbaren Automatisierungsansätze dargestellt.

2.2.2.2 Automatisierungsansätze

Die technischen Hilfsmittel (*Tools*), die als Werkzeuge zur Unterstützung des menschlichen Operateurs in ein Arbeitssystem integriert werden können, wurden bisher pauschal als Automation bezeichnet. Auf einer groben Charakterisierungsebene kann die Art der Automatisierung jedoch elementar unterschieden werden, da sich für verschiedene Automatisierungsansätze im Arbeitssystem unterschiedliche Formen der Interaktion eines Bedieners mit der Automation und unterschiedliche Wechselwirkungen der Automation mit dem Bediener als auch der Umwelt selbst ergeben.

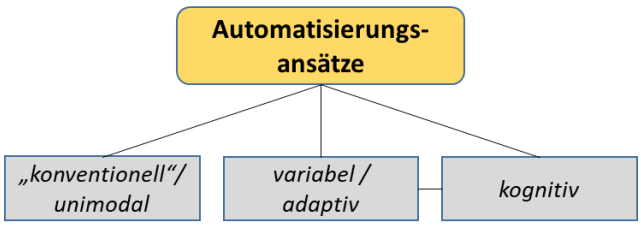


Abbildung 2.11: Aus der Literatur bekannte Automatisierungsansätze für Mensch-Maschine-Systeme.

Es existieren in der Literatur drei geläufige, aber grundlegend verschiedene Ansätze (Abbildung 2.11), die im Folgenden beleuchtet werden sollen. Die Ansätze unterscheiden sich dabei durch das ausgeprägte Kontrollverhältnis zwischen dem Operateur und der Automatisierungslösung.

Es muss angemerkt werden, dass die Abgrenzung der Automationsansätze in der Darstellung nicht immer eindeutig oder gar exklusiv ist und mehrdeutig sein kann. Die Grenzen zwischen

[32] Human Factors Engineering befasst sich mit der *„Rolle des Menschen in komplexen Systemen“*, bei der *„Gestaltung von Geräten und Einrichtungen für den menschlichen Gebrauch und der Entwicklung von Umgebungen für Komfort und Sicherheit“* [Salvendy, 2012], wobei besonderes Augenmerk auf dem *„Herstellen einer optimalen Beziehung zwischen dem Menschen und seiner Umgebung“* [Jankovich, 1973] liegt.

variabler/adaptiven und kognitiven Ansätzen sind fließend, teilweise überlappen die Eigenschaften und grundsätzlichen Prinzipien [Scerbo, 2008].

2.2.2.2.1 Traditioneller Ansatz

Traditionelle, „konventionelle“ Automation bezeichnet alle Arten von Automation, bei welcher einen Prozess in einem einzigen, vordefinierten Modus maschinell ausgeführt wird. Diese Art von Automation wird auch als konventionell, statisch, fest [Parasuraman et al., 1992] oder starr bezeichnet, da die Maschine zur Lösung eines Problems bzw. zur Erfüllung des Arbeitsziels festen, zur Designzeit vordefinierten Abläufen folgt und festgelegte Routinen ausführt. Der Operateur kann diese Art von Automation (meist) durch an- und abschalten aktivieren bzw. deaktivieren, wobei dann keine oder nur elementare Unterstützung erfolgt.

Kontrollverhältnis

Dabei befinden sich Automation und Operateur im Verhältnis der direkten Kontrolle (*Direct Control*) ([Sheridan & Verplank, 1978], [Sheridan, 2007]). Der Operateur bildet eine geschlossene Schleife beziehungsweise einen direkten Wirkungskreislauf mit dem kontrollierten Prozess (*Tools* bzw. Automation). Im Fall der direkten Kontrolle obliegt dem Operateur die eigenverantwortliche Führung des gesamten Prozesses. Erfolgt die Prozessführung durch einen Computer, übernimmt dieser die komplette Ausführung, koppelt aber den menschlichen Operateur weitestgehend vom Geschehen ab. Die Prozesskontrolle ist prinzipiell durch die limitierten Kapazitäten des Menschen oder den endlichen Funktionsraum des Computers beschränkt.

Eigenschaften der Automatisierung

Die Prozessautomatisierung kann hierbei mit einer beliebigen Automatisierungsstärke umgesetzt werden. Die mögliche Bandbreite reicht von minimaler Automation (wie beispielsweise manuell bedienbarer, elektrischer Fensterheber im Kraftfahrzeug) bis zur Hochautomation bzw. Vollautomation (wie beispielsweise vollautomatische Fertigungsprozesse in Industrieanlagen). Oft wird konventionelle Automation zur (robusten) Abarbeitung einer elementaren Teilfunktionalität eines Gesamtprozesses eingesetzt, beispielsweise bei der Führung Straßen- und von Luftfahrzeugen.

Hochautomation beziehungsweise Vollautomation benötigt nach [Parasuraman et al., 2000] robuste Mechanismen zum Aufspüren von Fehlern, eine „*äußerst zuverlässige Fehlerbehandlung*“ sowie die Handlungsfähigkeit und geeignete Lösungsmechanismen, um „*effektiv und schnell auf eine potenziell große Anzahl von anomalen Situationen“* eigenständig reagieren zu können [Parasuraman et al., 2000]. Soll die Automatisierung dabei ohne einen menschlichen Operateur auskommen, verschärft dies die Anforderungen an technische Systeme drastisch:

> *„Die Vollautomatisierung ohne menschliche Überwachung erfordert nicht nur die technische Fähigkeit, alle Arten bekannter Fehler zu bewältigen, sondern auch die Fähigkeit, unvorhergesehene Fehler und Ereignisse zu bewältigen.“* [Parasuraman et al., 2000].

Charakteristisch für die Art der konventionellen Automation ist, dass im Arbeitssystem in der Regel kein umfassender, aktiver Kontextbezug zur Umwelt hergestellt wird ([Onken & Schulte, 2010], Seite 80) und diese eher als gekapseltes *stand-alone*-System zur Anwendung gebracht wird [Putzer & Onken, 2003].

Aufgabenteilung

Hinsichtlich der Aufgabenteilung zwischen Mensch und Maschine wurde für diesen Ansatz durch [Greensteins & Lam, 1985] formuliert, dass „*im Wesentlichen … die Systemfunktion in ihre Bestandteile (Nebenfunktionen, Aufgaben und Teilaufgaben)*“ zerlegt werden und diesen Bestandteilen dann zugehörige „*Aufgaben entweder dem Menschen oder der Maschine … entsprechend einigen Verallgemeinerungen bezüglich der Fähigkeiten von Mensch und Maschine*“ zugeordnet werden. Für diese Art der Automatisierung ist die Aufgabenzuweisung statisch und zur

Designzeit vorbestimmt [Greensteins & Lam, 1985], ebenso wird die Betriebscharakteristik der Automation zur Designzeit vorbestimmt und auf genau diese Weise während des Betriebseinsatzes ausgeprägt [Sheridan & Parasuraman, 2005]. Durch die statische Aufgaben- bzw. Funktionsallokation muss dabei, auch bei einem insgesamt hohen Automatisierungsgrad (und damit vermeintlich hilfreicher und sicherer Automation) mit

- Problemen bei der Handhabung,
- einem Anpassungszwang des Nutzers an die Charakteristiken der Automation oder
- zeitlich bedingten Effekten auf Seiten des Benutzers (Einbruch der menschlichen Leistung über einen großen Zeitraum, Arbeit unter Zeitdruck)

gerechnet werden [Inagaki, 2003a].

Beispiele

Ein klassisches und weitverbreitetes, effektbezogenes Beispiel einer solchen traditionellen Automatisierungslösung im Alltag ist die Geschwindigkeitsregelanlage (GRA, engl.: *Cruise Control*) oder Tempomat [DaimlerAG, 1975] im Personenkraftfahrzeug, welche eine vom Fahrer vorgegebene Fahrtgeschwindigkeit des Personenkraftfahrzeug im Rahmen der Möglichkeiten aufrechterhält [*Robert Bosch GmbH, Kraftfahrtechnisches Taschenbuch*, 2018].

2.2.2.2.2 Adaptiver bzw. variabler Ansatz

Der Ansatz adaptiver Automation hat das Ziel, Defizite und Schwachpunkte traditioneller Automation zu kompensieren.

Kontrollverhältnis

Als Kontrollverhältnis wird ein hierarchisches Delegationsverhältnis (*Supervisory Control*) ausgeprägt ([Sheridan, 1976], [Sheridan & Verplank, 1978], [Sheridan, 1992], [Sheridan, 2002]). Der Benutzer interagiert dabei über einen zwischenliegenden Computer mit der Automation. In diesem Kontrollverhältnis treten zwei Kontrollschleifen auf, eine äußere (Mensch und zwischenliegender Computer) und eine innere (zwischenliegender Computer und rückgekoppelter, automatisierter Prozess), wie in Abbildung 2.12 dargestellt.

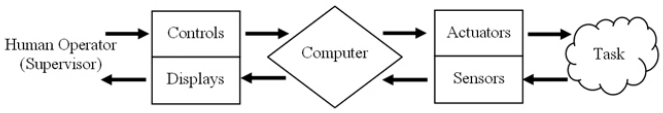


Abbildung 2.12: *Human Supervisory Control* nach [T. Sheridan, 1992], Grafik aus [Cummings et al., 2007].

Der zwischenliegende Computer schließt aktiv die Kontrollschleife mit der Automation und erhält die Ausführung der Prozesse aufrecht. Der Operateur nimmt bei der *Supervisory Control* die Rolle eines überwachenden Beobachters ein, und schließt die äußere Kontrollschleife.

Dabei wird angestrebt, den Operateur situativ zielgerichtet und lösungsorientiert in den automatisierten Prozessablauf einzubeziehen [Sheridan, 1992]. Dazu wird er in den Prozessablauf eingebunden („*in-the-loop*“ - gesetzt), üblicherweise auf dem höchsten Abstraktionslevel, wobei niedrige Funktionen (low-level) durch die Maschine ausgeführt werden [Sheridan, 2007]. Mensch und Maschine arbeiten in einem *Supervisory Control* - System zusammen, wobei der Mensch zum einen auf Ausgaben des Prozesses reagieren (Überwachung) und zum anderen steuernd auf den Prozess einwirken kann (Parametrisierung). Dieses Prinzip soll es ermöglichen, komplexe automatisierte Prozesse in schwierigen, unstrukturierten realen Umgebungen (in denen mit Problemen bei rein automatisierter Ausführung gerechnet wird) unter der überwachenden Mitwirkung eines Menschen ausführen zu können [Sheridan, 1992]. Dazu müssen jedoch mehrere

automatisierte, funktionale Möglichkeiten geschaffen werden, welche alternativ eingesetzt werden können.

Eigenschaften der Automatisierung

Der Begriff des *Automatisierungsgrades* bzw. der *Automatisierungsstufe* wird nach [DIN IEC 60050-351] beschrieben als *„der Anteil, den die automatisierten Funktionen an der Gesamtfunktion eines … Systems haben“*. Dabei kann *„bei einer schrittweisen Erhöhung des Einsatzes“* von Maschinen oder Computern *„von Automatisierungsstufen gesprochen werden*.“ [Voigt, 2018b].

Als *Variable* bzw. *Adaptive Automation* (auch *adaptive aiding* [William B. Rouse, 1988]) wird demnach ein automatisiertes System bezeichnet, das über mehrere Automationsgrade verfügt, zwischen denen gewechselt werden kann. Dabei ist nach [Sheridan & Parasuraman, 2005] *„der Grad oder die Art der Automation nicht fest und kann sich während des Betriebs des Systems ändern.“*. Somit kann nach [Scerbo, 2008] *„das Automationslevel oder die Anzahl der automatisierten Systeme in Echtzeit verändert bzw. angepasst“* werden. Als Grundlage der Variabilität und Adaptivität zählt laut [Oppermann, 1994] die charakteristische Eigenschaft der *Flexibilität*.

Dabei können die Systeme feiner charakterisiert werden:

Adaptierbare Systeme lassen sich konkret in

- *kontextadaptierbare* Systeme (Nutzer kann System an Umgebungsbedingungen anpassen) und
- *nutzeradaptierbare* (Nutzer kann System an eigene Nutzervorgaben oder -eigenschaften anpassen).

unterscheiden [Oppermann, 1994].

Adaptive Systeme können auf eigene Initiative hin ohne Zutun des Nutzers, beispielsweise anhand des

- aktuellen Kontexts [Parasuraman et al., 2000],
- des Aufgabenkontexts und/oder Operateur-Zustandes [Kaber, Wright, Prinzel, & Clamann, 2005]

einen geeigneten Automationsgrad auswählen, um den Betriebsmodus stärker an das situative Bedürfnis des Benutzers oder die Umgebung anzupassen [Parasuraman et al., 1992].

Der Grundgedanke eines flexiblen, adaptiven Systems besteht darin, dass *„sich das System an den Benutzer“* oder den Kontext *„anpassen sollte, anstatt der Benutzer an das System“* ([Oppermann, 1994], Seite 68). Zur Herstellung einer solchen Fähigkeit benennt Oppermann drei abstrakte Komponenten adaptiver Systeme: Eine *afferente* (hineinführende), eine *inferente* (verarbeitende) und einen *efferente* (herausführende) Komponente ([Oppermann, 1994], Seite 6), die wie folgt charakterisiert werden (Tabelle 2):

Afferente Komponente	Adaptive Systeme beobachten und zeichnen deren Umwelt zur Entscheidungsfindung auf.
Inferente Komponente	Adaptive Systeme analysieren Daten und leiten (modellbasierte) Entscheidungen über eine Adaption des Systems ab.
Efferente Komponente	Anpassung des Systemverhaltens aufgrund der Adaption, beispielsweise der Präsentation von Daten oder Änderung der Werkzeuge.

Tabelle 2: Abstrakte Komponenten der Adaptivität nach [Oppermann, 1994].

Des weiteren grenzt ([Oppermann, 1994], Seite 71) adaptiv automatisierte Unterstützungssysteme nach einem Klassifizierungsschema hinsichtlich deren Form der Hilfeleistung bzw. Unterstützung voneinander ab (Tabelle 3):

Passiv: Durch explizite Nutzeranforderung aufgerufen	**Aktiv:** System erkennt Handlungsbedarf und initiiert Unterstützung
Kontext-unabhängig: Selbe Systemantwort in allen Kontexten	**Kontext-sensitiv:** Spezieller (zeitlicher) Kontext der Hilfsanfrage wird bei Unterstützung explizit berücksichtigt
Nutzer-unabhängig: Selbe, nicht-individualisierte Unterstützungsleistung für alle Nutzer	**Nutzer-sensitiv:** Individualisierte Unterstützungsleistung, an Nutzerbedürfnisse und -erfahrungen angepasst

Tabelle 3: Klassifizierungsschema adaptiver Automation hinsichtlich deren Unterstützungsverhalten nach [Oppermann, 1994].

Aufgabenteilung

Die grundlegende Systematik des variablen beziehungsweise adaptiven Ansatzes innerhalb eines Mensch-Maschine-Systems zur Bereitstellung verschiedener Ausprägungen der Unterstützung ist eine *dynamische Aufgabenzuteilung oder Funktionsallokation* (näher beschrieben in Kapitel 2.3). [Kaber et al., 2005] bezeichnen „Adaptive Automation“ in diesem Kontext als die *„dynamische Allokation der Kontrolle über die Systemfunktionen an einen menschlichen Operateur und/oder Computer über die Zeit“* zum Zweck der *„Optimierung der gesamten Systemleistung“*. Nach [Sheridan & Parasuraman, 2005] ist die *„Arbeitsaufteilung zwischen Mensch und Maschine nicht festgelegt“*, sondern wird *„dynamisch, flexibel und kontextabhängig“* vollzogen. Laut [Inagaki, 2003b] werden dafür die Begriffe dynamischer und adaptiver Funktionsallokation oftmals synonym gebraucht und verstanden.

Vor- und Nachteile

Typische Vorteile gegenüber traditioneller, nicht-adaptiver Automation liegen dabei insbesondere bei

- der Anpassbarkeit der Automationsstärke eines solchen Systems an

  - die umgebende Umwelt [Inagaki, 2003a], um in unvorhersehbaren Betriebssituationen eine menschzentrierte und situationsgerechte Handlungsoption der Automation einbringen zu können.
  - den Belastungs- und Beanspruchungsgrad eines menschlichen Operateurs (([Parasuraman et al., 1992], Seite 15), [Inagaki, 2003a]).
- der Einbindung und gezielten Involvierung des Menschen in die Kontrollschleife (*On-the-loop*), um *Out-of-the-loop* – Effekte zu vermindern [Inagaki, 2003a].

Als bekannte Nachteile und Gefahrenpotentiale, welche durch dynamische Funktionsteilung auf den Menschen und die Maschine auftreten können, gilt die Entstehung von prinzipbedingten Konflikten bei den Absichten hinsichtlich der Zielerfüllung. [Inagaki, 2003b] unterscheidet zwei Arten der Differenzen:

- *Konfliktive Absichten*: Ähnliche, aber dennoch unterschiedliche Absichten, wie beispielsweise unterschiedlichen Parametrisierung oder nicht kongruente Zielvorstellung derselben Aktion.
- *Konträre Absichten*: Komplett gegensätzliche Absichten, beispielsweise zueinander widersprüchliche Aktionen, wie ein „Gegeneinander-Arbeiten“ oder ungleiche Priorisierung von Aktionen.

Diese sind besonders bei adaptiven Systemen relevant, da Automation und Operateur in derselben Situation unterschiedliche Zielvorstellungen haben können, die erfüllt werden sollen. Schlimmstenfalls würden Mensch und Maschine gegeneinander arbeiten, was die erhofften Vorteile komplett zunichtemachen könnte.

Beispiele

Adaptive oder variable Automatisierung findet in der Literatur, der Forschung und Technik beispielsweise Anwendung bei

- der Führung eines Unterwasserroboters in einer Telerobotik-Anwendung mit zehn Automationsgraden [Sheridan & Verplank, 1978]. Damit wurde die Anpassung an raue Umgebungsbedingungen sowie verschiedene Schwierigkeiten der Aufgaben ermöglicht.
- dem Abstandsregeltempomat (engl.: ACC – *Adaptive Cruise Control*) zur automatisierten Längsführung eines Kraftfahrzeugs im Straßenverkehr [Knoll, 2008], bei welchem situativ zwischen vier Regelfunktionen (Folge-, Beschleunigungs-, Brems- und Kurvenregler) umgeschaltet wird. Damit wird ein sicherer Abstand zu einem vorausfahrenden Fahrzeug eingehalten.
- dem assistierten Management komplexer und reichhaltiger Informationen in einem Helikoptercockpit für die Crew (RPA (*Rotorcraft Pilot´s Associate*, U.S. Army: [McBryan & Hall, 1994], [Hoffman, 1997], [C. Miller & Hannen, 1998], [C. A. Miller & Hannen, 1999], [C. Miller, Guerlain, & Hannen, 1999]). Dabei wurden Information gefiltert und situativ präsentiert.

Die aufgezeigten Beispiele der Adaptiven bzw. Variablen Automation verdeutlichen, dass diese dem Operateur (weitestgehend) in einem ein hierarchischen Delegationsverhältnis unterstellt ist. Ebenso wurde verdeutlicht, dass der Ansatz der Adaptiven Automation über ein weitreichendes Anwendungsspektrum Lösungsmöglichkeiten zu bieten im Stande ist unterschiedliche Strategien zur Anpassung des Automationsgrades angewendet werden können (detailliert beschrieben in Kapitel 2.4).

2.2.2.2.3 Kognitiver Ansatz (Assistenzverhältnis)

Der Begriff des Assistenzverhältnisses (*associate relationship*) bezeichnet nach [C. A. Miller & Riley, 1995] einen Ansatz beidseitiger Initiative (*mixed-initiative*) zur *„kollaborativen Problemlösung zwischen einem oder mehreren menschlichen Akteuren und einem untergeordneten, aber teilautonomen Computersystem“*, welches über einen hinreichenden Umfang (*„Tiefe und Bandbreite“*) an „*Fähigkeiten*“ und „*Intelligenz*“ verfügt, um im holistischen Kontext (auf der

übergeordneten Ebene des Arbeitssystems) *„einen vollständigen Bereich an Arbeitsaufgaben zu umfassen (full task domain).“*

[D. Woods, 1985] definiert allgemein rechnerbasierte, kognitive Systeme:

> *“A cognitive system is goal directed; it uses knowledge about itself and its environment to monitor, plan, and modify its actions in the pursuit of goals; it is both data- and concept-driven. People are obviously cognitive systems. ... Artificial cognitive systems (Ergänzung: are) systems that perform tasks normally associated with human cognition.”* [D. Woods, 1985]

Nach [D. Woods, 1985] soll dadurch die *„Unterstützung von menschlichen kognitiven Aktivitäten“* gezielt erfolgen. Bei der Gestaltung solcher technischer, automatisierten Systeme werden menschliche kognitive Prinzipen und Handlungsmodelle des Menschen als „künstliche Kognition“ [Onken & Schulte, 2010] auf den Rechner übertragen und der Maschine als Verhaltensmuster aufgeprägt, was als dann als „*kognitive Automation*“ verstanden wird [Onken & Schulte, 2010]. Höhere kognitive Fähigkeiten, die sonst dem Menschen vorbehalten sind, wie beispielsweise Umweltwahrnehmung, Schlussfolgern, Planen oder die Herstellung von Kontextbezügen, gelten als solche Kernfähigkeiten. Besonders in Kombination sollen diese eine signifikante Evolution klassischer Automation herbeiführen können [Schulte, 2012].

Dazu werden nach ([Onken & Schulte, 2010], [Schulte et al., 2016]) sogenannte *„kognitive Agenten“* in zwei Ausprägungen[33] ins Arbeitssystem eingebracht, die auf kognitiver Automation und kognitiven Architekturen basieren. Dabei sollen einerseits kognitive Agenten (*Tools*) weitestgehend eigenständig delegierte Aufgaben in hierarchischem Delegationsverhältnis arbeiten (*Supervisory Control*, [Sheridan, 2002]). Andererseits wird dem Operateur das technische System in einer kooperativen Anordnung zur Seite gestellt (auf der Seite der *Worker*). Dabei arbeitet ein Operateur mit Hilfe eines im *heterarchischem* Verhältnis stehenden kognitiven Agenten ein Arbeitsziel gemeinsam ab. Dieser Agent tritt als kooperatives *Entscheidungsunterstützungs-*, *Partner-* oder *Assistenzsystem* auf, im englischen als *Decision Support System*, *Assistant System* oder *Associate System* bezeichnet [Schulte & Donath, 2018]. Dabei werden drei grundlegende Arten kooperativer Assistenz unterschieden: *Associative Assistance, Alerting Assitance* sowie *Substituting Assistance* ([Onken & Schulte, 2010], Seite 143).

2.2.3 Diskussion

Für die Anbindung eines Operateurs an automatisierte Sensordatenauswertungssysteme unbemannter Aufklärungsflugplattformen sind Ansätze menschzentrierter Automation als Mensch-Maschine-System von besonderem Interesse.

In diesem Unterkapitel wurden schwerpunktmäßig die drei konkreten, aus der Literatur und Technik bekannten Automatisierungsansätze zur Anwendung in Mensch-Maschine-Systemen sowie deren grundlegende Kontrollschemata dargestellt. In Tabelle 4 werden die Ansätze kompakt gegenübergestellt.

[33] Die geschlossene Theoriebildung kognitiver Automation kann in ([Onken & Schulte, 2010], [Schulte & Donath, 2018]) vorgefunden werden.

Automatisierungs-ansatz	**Anpassungsfähigkeit an äußere Kontexte**	**Delegations-verhältnis**	**Holistischer Unterstützungs-anspruch**	**Typische Variablen zur Anpassung**
konventionell / starr	nein	direkt	nein	keine
variabel / adaptiv	ja	überwachend / hierarchisch	nein	Systemleistung, Messbare Größe der Umgebung
kognitiv	ja	hierarchisch / heterarchisch	ja	Beanspruchung oder mentaler Zustand des Operateurs

Tabelle 4: Automatisierungsansätze und deren elementare Eigenschaften.

Dabei weisen sowohl der variable als auch der kognitive Ansatz die Fähigkeit auf, eine Anpassungsfähigkeit an den äußeren Kontext bieten zu können. Während konventionelle Automation keinen oder nur einen sehr begrenzten Handlungsspielraum und Handlungsoptionen bei unvorhergesehen Ereignissen bietet, erhebt kognitive Automation den Anspruch, höhere kognitive Fähigkeiten, die sonst dem Menschen vorbehalten sind, ganzheitlich auf dem Rechner zu implementieren. Bei Assistenzsystemen beziehungsweise kognitiven Systemen wird der Definition nach ein holistischer Handlungs- und Fähigkeitsrahmen einer solchen Unterstützung gefordert.

Die Thematik der Verlässlichkeit technischer, automatisierter Prozesse findet weder im Kontext konventioneller Automatisierungslösungen noch kognitiver Automation und Assistenzsystemen explizite Berücksichtigung. Diese beiden Ansätze widmen diesem Aspekt keine Relevanz. Im Kontext kognitiver Automation werden schwerpunktmäßig der Mensch und dessen Limitierungen, Verhalten oder Fehleranfälligkeit bei der Durchführung komplexer Aufgaben in den Konzepten als Rational herangezogen. Die Zielsetzung solcher Ansätze liegt in der Vermeidung sog. *Human Factors* (siehe Kapitel 2.6), insbesondere der Vermeidung und Kompensation menschlicher Fehler (*Human Error*) oder der Minimierung der Beanspruchung des Operateurs in komplexen Einsatz- und Anwendungsszenarien. Daher kommt dieser Ansatz derzeit hauptsächlich in experimentellem Cockpit- oder Pilotenassistenzsystemen zur Anwendung.

Mit der in Kapitel 2.1 dargestellten potentiellen Unsicherheitsbehaftung wird für die vorliegende Anwendung die Eigenschaft der Anpassungsfähigkeit an äußere Kontexte zwingend erforderlich.

Für die vorliegende Arbeit hat sich das Paradigma *Adaptiver Automation* zur Realisierung der Anpassungsfähigkeit an äußere Gegebenheiten als geeigneter Ansatz herauskristallisiert, der im weiteren Verlauf zur Anwendung gebracht werden soll.

Dieses Paradigma bietet das Potential, beim Einbruch oder Versagen maschineller Fähigkeiten einem Operateur ein Angebot weniger umfangreich vorverarbeiteter Produkte durch einen niedrigeren Automatisierungsgrad anbieten zu können. Somit kann bei Limitierungen ein Zusammenbruch der Durchführung einer Aufgabe vermieden und ein Schema zum gezielten Einbezug des Operateurs erarbeitet werden. Die Realisierung der Charakteristika der Variabilität, Adaptivität und damit der *Flexibilität* können, im Kontrast zum traditionellen Automatisierungsansatz (Kapitel 2.2.2.2.1), durch mehrere funktionalen Moden oder Abstufungen der Automationsstärke in Automatisierungsgrade sowie davon potentiell abhängige, verschiedene Nutzerinteraktionsstrategien erfolgen.

Für diese Arbeit ist weiterhin das hierarchische Delegationsverhältnis (*Supervisory Control*) von großem Interesse, da damit eine maximale Arbeitserleichterung für den Operateur sowie eine wechselseitige Kommunikations- und Problemlösungsstrategie realisiert werden kann.

Hinsichtlich der konzeptionellen Anbindung eines Nutzers an Prozesse der Datenauswertung und -fusion wird das im Rahmen der technischen Datenfusion aufgezeigte Konzept der *kognitiven Fusion* aufgegriffen und umgesetzt, bei welcher das mentale Modell des Operateurs einen Auswertungsprozess prinzipiell unterstützen soll.

Dabei kommen insbesondere die Fragen auf, ob ein variabel automatisiertes System im Betrieb Vorteile erzielen kann und ins besonders, ob ein solches System Akzeptanz bei den Operateuren findet.

Die Automatisierungsansätze liefern jedoch auf der bisherigen Darstellungsebene noch keine oder kaum Aussagen zu den konkreten Möglichkeiten der Aufgabenaufteilung zwischen den Akteuren Mensch und Maschine für eine gemeinsame Aufgabenabarbeitung. Daher werden nachfolgend prinzipiell vorhandene Strategien zur (Auf)-Teilung einer Aufgabe auf den Menschen und die Maschine aus der Literatur aufbereitet.

2.3 Aufgabenallokation im Mensch-Maschine-System

Im Allgemeinen erfordert die gemeinsame Erfüllung eines Arbeitsziels die Abarbeitung eines gewissen Umfangs an notwendigen Aufgaben. Die dabei durchgeführten Funktionen[34] können zum einen durch den Menschen oder eine Maschine als Akteur ausgeführt werden. Die *Funktionsallokation* (bzw. *Aufgabenallokation*) bezeichnet die Designentscheidung, welche Funktionen beziehungsweise Aufgaben zur Laufzeit durch den Menschen, welche durch die Maschine oder gemeinsam ausgeführt werden, um das Arbeitsziel zu erreichen [Inagaki, 2003b].

Im Folgenden werden die beiden in der Literatur dokumentierten Möglichkeiten der statischen Akteur-Aufgaben-Zuständigkeit sowie der dynamischen, also zeitlich veränderlichen Akteur-Aufgaben-Zuweisung, dargestellt. Bei der statischen Aufteilung wird festgelegt, wer (welcher Akteur) was (welche Aufgabe) durchführt; bei der dynamischen Zuweisung zusätzlich, wann (zeitliche, situative Abhängigkeit) welcher Akteur welche Aufgabe durchführt (Abbildung 2.13).

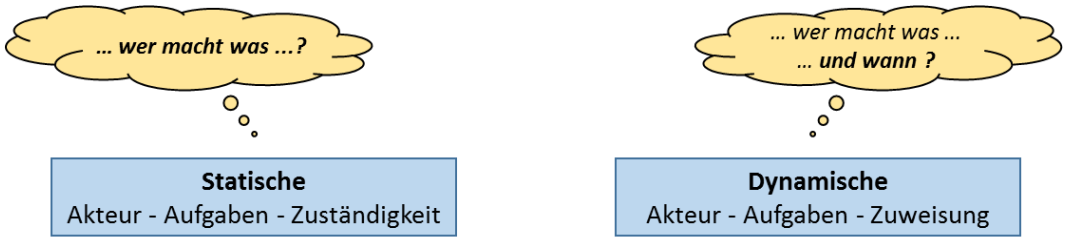


Abbildung 2.13: Unterscheidung zwischen statischer und dynamischer Funktionsallokation.

2.3.1 Statische Funktionsallokation

Nach [W B Rouse, 1991] werden drei Typen *traditioneller, statischer Strategien* der Funktionsallokation unterschieden. Die Ansätze der Aufteilung lassen sich durch folgende Antworten auf die Frage „Welcher Akteur führt welche Funktion aus?“ charakterisieren:

- Der befähigtere Akteur.
- Die Maschine führt alles aus was sie kann.
- Derjenige Akteur, welcher die geringsten Kosten verursacht.

[34] Während eine „Funktion“ ein „*allgemeines Mittel … zur Erfüllung einer Anforderung*“ bezeichnet, beschreibt der Begriff „*Aufgabe*“ auf der Verhaltensebene einen Verbund von „*(kognitiv-sensomotorisch unterscheidbaren) Aktivitäten, die von einer Person ausgeführt werden*“, um „*einen bestimmten Arbeitsaufwand … zu bewältigen.*“ [DeGreene, 1970].

Die Strategien werden als *comparison allocation*, *leftover allocation* sowie *economic allocation* bezeichnet.

2.3.1.1 Comparison Allocation

Im Falle des ergonomischen, kompensierenden Ansatzes der *comparison allocation*, einer auf dem Vergleich der Fähigkeiten sowie Stärken und Schwächen von Mensch und Maschine basierenden Zuweisung der Aufgabenanteile, wird die Funktion dem jeweilig besser befähigten Akteur zugewiesen. Bereits 1951 lieferte Fitts ursprünglich mit der sogenannte MABA-MABA-Liste („*men are better at" – „machines are better at"*) [Paul Morris Fitts, 2017], auch bekannt als HABA-MABA-Liste („*humans are better at" – „machines are better at"*) oder „*Fitts List*", eine solche Aufstellung, welche die jeweiligen Befähigungen der Akteure Mensch und Maschine aufzählt und vergleichend gegenüberstellt. Abbildung 2.14 zeigt die Illustrationen der Befähigungen, welche die MABA-MABA-Liste motivieren.

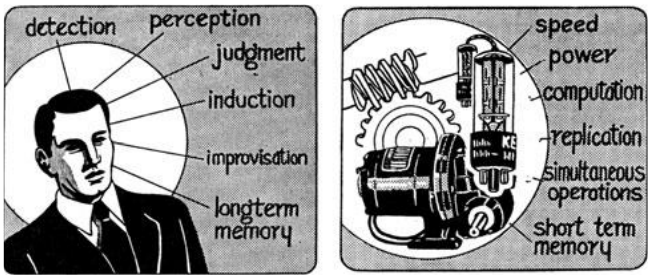


Abbildung 2.14: Illustrationen der Fitts Liste (Grafik aus [Paul Morris Fitts, 2017], Seite 7-8).

Dabei ordnete [Paul Morris Fitts, 2017], in der Absicht einer sinnigen Funktionsallokation, Menschen und Maschinen deren jeweilige Stärken zu (schematisch dargestellt in Abbildung 2.14).

Beim Menschen verortet wurden bereits dort unter anderem die Fähigkeiten des

- *„induktiven Schlussfolgerns"* sowie die
- *„Fähigkeit des Verständnisses von Mustern (Licht und Ton)"* mit der
- *„Fähigkeit des Wahrnehmens einer geringen Menge visueller oder akustischer Energie"*.

Der Maschine wurden damals unter anderem die

- *„Fähigkeit, sich wiederholende Routineaufgaben auszuführen"*, die
- *„Fähigkeit des deduktiven Schließens, inklusive deren berechnende Fähigkeit"*, sowie die
- *„Fähigkeit der Durchführung hochkomplexer (Rechen)Operationen, wie beispielsweise die gleichzeitige Ausführung paralleler Aktionen"*

zugeschrieben. Die MABA-MABA-Liste umfasst sechs menschliche und fünf maschinell überlegene Fähigkeiten (Abbildung 2.15):

Humans appear to surpass present-day machines with respect to the following:

1. Ability to detect small amounts of visual or acoustic energy.
2. Ability to perceive patterns of light or sound.
3. Ability to improvise and use flexible procedures.
4. Ability to store very large amounts of information for long periods and to recall relevant facts at the appropriate time.
5. Ability to reason inductively.
6. Ability to exercise judgment.

Present-day (in 1950s) machines appear to surpass humans with respect to the following:

1. Ability to respond quickly to control signals and to apply great forces smoothly and precisely.
2. Ability to perform repetitive, routine tasks.
3. Ability to store information briefly and then to erase it completely.
4. Ability to reason deductively, including computational ability.
5. Ability to handle highly complex operations, i.e., to do many different things at once.

Abbildung 2.16: MABA-MABA-Liste aus 1951 nach [Paul Morris Fitts, 2017] mit menschlich und maschinell überlegenen Fähigkeiten (Grafik aus [Inagaki, 2003b], Seite 2).

Trotz ihres Alters wird die Fitts-Liste neuzeitlich prinzipiell immer noch als „*Approximation der wichtigsten Regularien der Automation*“ verstanden, von Domänenexperten als „*…beispiellose intellektuelle Leistung…*“, „*…Pionierleistung…*“ [Winter & Dodou, 2011] und grundlegend gültig angesehen und besitzt nach deren Einschätzung grundsätzliche Relevanz. Jedoch haben sich der Zeitgeist, die technische Entwicklung (Einführung der Mikroprozessortechnologie) und damit die Möglichkeiten der maschinellen Automation seit 1951 deutlich weiterentwickelt. Ein Grund für die Argumentation in [Winter & Dodou, 2011] mag darin bestehen, dass sich die technischen Fähigkeiten (Maschinen) zwar weiterentwickelt, die Problemstellungen und Herausforderungen aber in ähnlichem Umfang an Schwierigkeit und Komplexität zugenommen haben. Jedoch finden sich auch reichlich kontroverse Betrachtungen und ebenfalls neuere, umfangreiche Kritik an der Fitts List in der Literatur ([Price, 1985], [Sharit, 1997], [Dekker & Woods, 2002], [Sheridan, 2002], [Inagaki, 2003b], [Sheridan & Parasuraman, 2005], [Parasuraman, Sheridan, & Wickens, 2008], [Parasuraman et al., 2008]). Dabei wird die Liste als „*ungültig*“, veraltet, unvollständig, irreführend, mit Fallstricken behaftet, „*übermäßig verallgemeinert*“ und „*nicht quantitativ*“ kritisiert; ebenso wird die Ansicht vertreten, die Liste an sich könne jedoch beibehalten werden, da Mensch und Maschine grundsätzlich komplementäre Eigenschaften haben, die Eigenschaftsliste daher eher ergänzend als gegenüberstellend verwendet werden sollte.

In [Kraiss & Schmidtke, 2001] findet sich eine neuere, aktualisierte Ausführung der MABA-MABA-Liste, welche sich an neuzeitlicher Technik und Technologie orientiert (Abbildung 2.17). Dabei wurden als aktuelle Grenzen der Automatisierung unter neuzeitlichem Technologiestand

- Beschränkungen der Umwelt- und Situationserfassung durch die Maschine
- nicht vorhandene Autonomie durch mangelnde Flexibilität
- Beschränkungen der Zuverlässigkeit (bezogen hauptsächlich auf komplexe Software)

herausgearbeitet (([Schlick, Bruder, & Luczak, 2010], Seite 1022) nach [Kraiss & Schmidtke, 2001]).

Vorzüge des Menschen	Vorzüge der Maschine
• Niedrige Wahrnehmungsschwelle und hohe Empfindlichkeit der Sinnesorgane für visuelle, akustische oder chemische Reize	• Empfindlichkeit für Reize außerhalb des Empfindlichkeitsbereichs menschlicher Sinnesorgane
• Erkennung visueller oder akustischer Muster	• Schnelle und präzise Durchführung komplexer Rechenoperationen
• Lange Speicherung großer Informationsmengen und zeitgerechter Abruf relevanter Informationen	• Speicherung und Abruf großer Datenmengen in kurzer Zeit
• Urteilsbildung bei unvollständiger Information	• Simultane Durchführung mehrerer Funktionen
• Induktive Situationsanalyse	• Deduktive Situationsanalyse
• Lern- und Anpassungsfähigkeit und Originalität	• Unermüdliche, kontinuierliche, schnelle und präzise Wiederholung von Aufgaben
• Reaktionsfähigkeit auf unerwartete und unvorhersehbare Ereignisse	• Kurze Reaktionszeit auf Steuerungs- und Regelungssignale
• Hohe motorische Präzision	• Vorsichtige und präzise Übertragung großer Kräfte
• Leistungserbringung auch bei Überlast	• Unempfindlichkeit gegenüber extremen Umwelteinflüssen

Abbildung 2.17: MABA-MABA-Liste nach [Kraiss & Schmidtke, 2001], Grafik aus ([Schlick et al., 2010], Seite 1022).

Eine solche komparative Strategie verwendet die Fähigkeiten der Akteure Mensch und Maschine als vergleichendes Maß und versucht, Arbeitsaufgaben fähigkeitsbasiert zu verteilen.

2.3.1.2 Leftover Allocation

Bei der Strategie der *leftover allocation* als technologiegetriebener Ansatz hingegen werden prinzipiell alle maschinell ausführbaren Funktionen automatisiert, indem sie auf die Maschine verlagert und durch diese ausgeführt werden. Funktionen, für die keine Automationstechnologie verfügbar ist, also nicht automatisierbare Funktionen, werden dem Menschen zugewiesen und müssen durch diesen manuell ausgeführt werden.

2.3.1.3 Economic Allocation

Bei der *economic allocation*, dem wirtschaftlich getriebenen Ansatz, steht die ökonomische Effizienz im Vordergrund und wird der Entlastung des Menschen übergeordnet. So wird die Allokationsentscheidung, im Falle von technisch verfügbarer Automationstechnologie, der Kostenbilanz unterstellt, ob die Anschaffung einer Automatisierungslösung und die automatisierte Ausführung die permanente menschliche Ausführung der Funktion finanziell unterbietet. Falls nicht, wird die Ausführung dieser Funktion dauerhaft dem Menschen zugeordnet und muss aus wirtschaftlichen Gründen durch diesen manuell durchgeführt werden.

2.3.1.4 Complementary Allocation

Ein Ansatz, welcher explizit die gegensätzlichen Eigenschaften von Mensch und Maschine berücksichtigt, ist die *complementary allocation* ([Jordan, 1963], [G Grote, Weik, Wäfler, & Zölch, 1995], [Gudela Grote, Ryser, Wafler, Windischer, & Weik, 2000]*)* wobei zur Erfüllung einer Aufgabe *„Mensch und Maschine als gegenseitige Ergänzung“* zueinander verstanden werden [Gudela Grote et al., 2000]. Auch [Sheridan, 2002] bekräftigte im Rahmen der Thematik der Funktionsallokation, dass Mensch und Maschine grundsätzlich komplementäre Eigenschaften haben.

Abbildung 2.18 zeigt zusammengefasst die in der Literatur bekannten Strategien der statischen Funktionsallokation.

Die Aufteilungen und Zuweisungen bei allen festen Allokationsstrategien sind statisch, zeitlich nicht veränderlich und legen lediglich fest, welcher Akteur welche Aktionen ausführt und wie er dabei grundsätzlich im System agiert. Dabei wird vorausgesetzt, dass die Teilung der Aufgabe zur Laufzeit immer gleichbleibt.

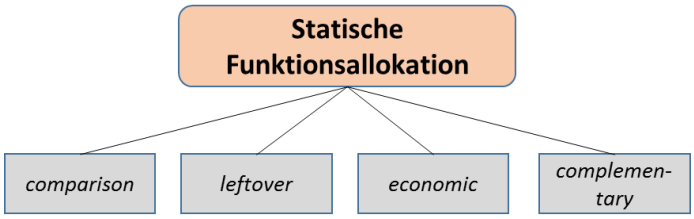


Abbildung 2.18: Strategien statischer Funktionsallokation.

2.3.2 Dynamische, variable Funktionsallokation

Bei der dynamischen Zuweisung und Ausführung einer Funktionalität wird festgelegt, welcher Akteur wie agiert und wann. Dafür muss Automation vorliegen, welche mehrere Arten der Ausführung, mehrere Unterstützungsformen des Operateurs oder mehrere automatisierte Funktionen umfasst, zwischen denen alternativ gewechselt bzw. welche getrennt voneinander ausführbar sind. Diese können dann anteilig zur Laufzeit allokiert werden, um Funktionen durch den Menschen oder die Maschine zu belegen.

2.3.2.1 Allokationsstrategien

Prinzipiell werden durch [W. B. Rouse & Rouse, 1983] drei Methoden (Moden) unterschieden, auf welche Art ein Operateur durch die Maschine unterstützt werden kann ([Scerbo, 1996], Seite 42). Dabei wird charakterisiert, wie die Aufteilung von Aufgaben (also die Ausführung der Funktion) konkret auf die Akteure Mensch und Maschine erfolgen kann. Durch ([W. B. Rouse & Rouse, 1983], Seite 15) werden die folgenden drei Möglichkeiten aufgezeigt:

(1) **Komplette Allokation** (*allocation*) einer Aufgabe (Task) durch alternative Zuweisung (mit alleiniger Zuständigkeit und Verantwortung der Akteure) (Abbildung 2.19), bei rein maschineller Durchführung als *Full-Task* Automation bezeichnet [Parasuraman et al., 1992].

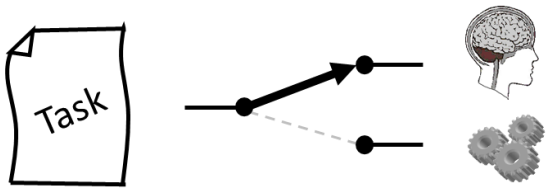


Abbildung 2.19: Allokation einer kompletten Aufgabe (Task) durch alternative Zuweisung auf entweder Mensch oder Maschine.

(2) **Aufteilung** (*partitioning*) einer Aufgabe (Task) in Aufgabenteile und komplementäre Zuweisung (mit geteilter Zuständigkeit und Verantwortung der Akteure) (Abbildung 2.20), in [Parasuraman et al., 1992] als *Part-Task* Automation bezeichnet.

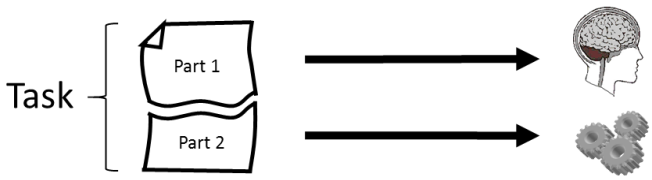


Abbildung 2.20 Allokation durch Aufteilung und komplementäre Zuweisung von Teilaufgaben.

(3) **Umwandlung** (*transformation*) einer Aufgabe A durch maschinelle Aufbereitung oder Simplifizierung (Vorbearbeitung, Vorverarbeitung) in leichtere Aufgabe B mit reduzierten Anforderungen für den Menschen (Abbildung 2.21), in [Parasuraman et al., 1992] als *Task Aiding* bezeichnet.

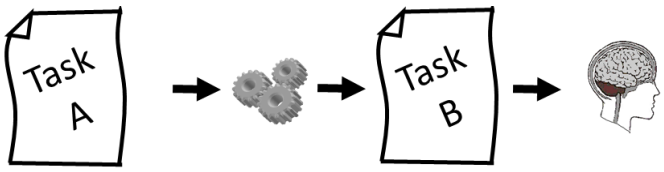


Abbildung 2.21: Transformation einer Aufgabe durch maschinelle Simplifizierung.

Erfolgt aus Transparenzgründen eine Kommunikation über die Aufgabenteilung mit dem Operateur, kann diese

- explizit (durch visuelle Benachrichtigung oder durch die Änderung des Benutzerinterfaces)
- implizit (für den Bediener transparent)

erfolgen [Parasuraman et al., 1992].

2.3.2.2 Kontrollmoden

In [Sheridan, 1992] erfolgt die Unterscheidung zwischen der „Gemeinsamen Kontrolle“ und der „Ausgehandelten Kontrolle“ bei der (maschinell unterstützten) Durchführung einer Funktion (*Sharing of Control*, *Trading of Control*).

Nach [Sheridan, 1992] bezeichnet die „**Gemeinsame Kontrolle**“ (*Sharing of Control*) die gemeinsame Bearbeitung einer Problemstellung durch den Menschen und die Maschine, um eine einzelne Funktionalität auszuführen und aufrechtzuerhalten [Sheridan, 1992]. Innerhalb derer werden nochmals drei Arten feiner unterschieden:

- **Erweiterung** (*extension*): Die Maschine unterstützt den Menschen und kann dessen Leistung bei der Ausführung der Fähigkeit erhöhen (beispielsweise eine adaptive Lenkung oder Bremsassistenten in Kraftfahrzeugen). Ebenso kann der Mensch die Fähigkeiten der Maschine erweitern (beispielsweise das „überwachende Übersteuern“ eines Autopiloten in Flugzeugen, in denen der Pilot zusätzliche, korrigierende Steuerkräfte einbringen kann).
- **Entlastung** (*relief*): Die Maschine unterstützt den Menschen, um dessen Belastung zu vermindern (beispielsweise ein Spurhalteassistent in Straßenfahrzeugen, bei denen die Querführung des Fahrzeugs durch ein unterstützendes Moment der Lenkbewegung erleichtert wird).
- **Aufteilung** (*partitioning*): Bei der Aufteilung wird eine benötigte Funktion in Subfunktionen unterteilt, so dass Mensch und Maschine sich gegenseitig ergänzende Teile davon ausführen (beispielsweise bei der Führung eines Straßenfahrzeugs, bei dem der Mensch die Querführung und die Maschine die Längsführung übernimmt).

Bei der „**Ausgehandelten Kontrolle**“ (*Trading of Control*) sind entweder der Mensch oder die Maschine für die Ausführung einer Funktion verantwortlich, was durch einen aktiven Agenten belegt und zeitlich verändert werden kann [Sheridan, 1992]. Dabei muss dynamisch festgelegt werden, wann die Kontrolle an welchen Akteur übergeben wird, und wer diese Entscheidung fällt.

2.3.2.3 Moden variabler Allokation

Als „*dualen Modus*“ bezeichnet Scerbo die einfachste Form von Automation, welche zwei Moden, nämlich den manuellen und automatischen Betrieb, vorsieht ([Scerbo, 1996], Seite 40). Dabei kommt die Methode der kompletten *Allokation* zum Tragen.

Nach ([Scerbo, 1996], Seite 42) können (insbesondere in komplexen Systemen) mehrere Moden oder Abstufungen der Automatisierungsstärke zum Einsatz kommen. Solche *„multiplen Moden*“ erhöhen das Funktionsspektrum und damit das Fähigkeitsspektrum von Automation. Prinzipiell kann die Automatisierungsstärke und damit die Anteile, welche die Maschine ausführt, entlang eines Kontinuums von „nichts“ (volle manuelle Ausführung durch den Menschen) bis „maximaler Automatisierung“ liegen ([Scerbo, 1996], Seite 42). Findet eine Abstufung in Moden/ diskreten Automationsstärken statt, wird dieser Ansatz auch als „*Automationsgrade*“ bezeichnet ([Scerbo, 1996], Seite 42).

Aus der Literatur ist das vielzitierte Integrationsschema der *„Levels of Automation“* (LOA) bekannt, welches die Festlegung der Funktionsallokation auf Mensch und Maschine in mehreren Ausprägungen durch sogenannte *Automationsgrade* vornimmt [Sheridan & Verplank, 1978]. Die Zuweisung der Funktionen bzw. die Zuständigkeit über diese wird zwar zur Designzeit für jede Abstufung festgelegt, jedoch sieht der Grundgedanke einen dynamischen Wechsel zwischen den Automationsgraden während des Betriebs vor. Das Integrationsschema beschreibt die Aufteilung von Interaktionen auf die Akteure Mensch und Maschine als Automationsgrade bzw. Automationsstufen und definiert, welcher Akteur welche Funktionen auszuführen hat. Dabei werden die Mensch-Maschine-Interaktionen, welche zur Erfüllung eines Ziels durch das Ausführen einer Funktion benötigt werden, auf einer Automationsskala diskret eingeteilt. Die höheren Automationsgrade beinhalten mehr Aufgabenausführung durch die Maschine und reduzieren die menschlichen Interaktionen und Aktionen bis zum höchsten Automationsgrad komplett. In [Sheridan, 1992] folgte eine verfeinerte Abwandlung der zehn Automationsgrade, wobei ein Level entweder das vorherige komplett einschließt oder in nächsten Automationsgrad eine einschränkende Alternative enthält. Abbildung 2.22 zeigt den oft zitierten und iterativ vereinfachten, verallgemeinerten Vorschlag von Sheridan, bei dem Automation durch acht Automatisierungsgrade abgestuft skaliert wird [Sheridan & Parasuraman, 2005].

A Scale of Degrees of Automation

1. The computer offers no assistance; the human must do it all.
2. The computer suggests alternative ways to do the task.
3. The computer selects one way to do the task and
4. executes that suggestion if the human approves, or
5. allows the human a restricted time to veto before automatic execution, or
6. executes the suggestion automatically, then necessarily informs the human, or
7. executes the suggestion automatically, then informs the human only if asked.
8. The computer selects the method, executes the task, and ignores the human.

Abbildung 2.22: Skalierte Automation mit acht diskreten Automationsgrade nach [Sheridan & Parasuraman, 2005], Abbildung aus ([Sheridan & Parasuraman, 2005], Seite 94).

Dabei wird das Prinzip deutlich, dass die Aufgaben im niedrigsten Automationsgrad komplett durch den Menschen ausgeführt werden, im höchsten Automationsgrad alle Aufgaben durch die Maschine übernommen und der Mensch vollständig passiv beziehungsweise zum reinen Überwacher der Automation wird.

In der Literatur werden zahlreiche, weitere Umsetzungen von Automationsgraden vorgeschlagen, mit unterschiedlicher Anzahl an Abstufungen, angepasst an unterschiedliche Kontexte oder mit einer anderen Berücksichtigung der Schwerpunkte bei der Abstufung. Die Vorschläge von Sheridan mit acht bzw. zehn Automationsgraden sind durch eine technologieorientierte, kontextbezogene Sichtweise der automatisierten Maschine und deren Fähigkeiten geprägt ([Sheridan, 1992], [Sheridan & Parasuraman, 2005], [Sheridan, 2007]). [Draper, 1995] schlug ebenfalls eine technisch motivierte, kontextbezogene Skala mit fünf Automationsgraden zur Anwendung in der Telerobotik vor, für die er Funktionen identifizierte, von denen immer fünf durch den Menschen und vier durch die Maschine ausgeführt werden. Die Einteilung erstreckt sich dabei von *Human Control* - rein menschlicher Kontrolle (Level 1) über manuelle assistierte Kontrolle (Level 2), *Shared Control* -

geteilte Kontrolle (Level 3), *Traded Control* – ausgehandelte Kontrolle (Level 4) bis hin zu *Strategic Control* – Strategischer Kontrolle (Level 5). [Cummings, Bruni, Mercier, & Mitchell, 2007] schlagen im Kontext von Führungs- und Kontrollaufgaben in (unbemannten) Luftfahrtanwendungen eine vereinfachte Skala mit sechs Automationsgraden vor [Cummings et al., 2007].

Im Gegensatz zu den technologieorientierten Vorschlägen motiviert [Endsley, 1987] den Unterstützungsgrad der menschlichen Entscheidungsfindung (*supplement of human decision making*) als Abstufung in fünf Automationsgraden nutzerorientiert und geprägt für die Unterstützung von kognitiven Aufgaben des Menschen. Der ebenfalls nutzerorientierte Vorschlag einer Taxonomie [Endsley & Kaber, 1999] (Abbildung 2.23) zur allgemeinen Anwendbarkeit auf kognitive und psychomotorische Aufgaben umfasst zehn Abstufungen und soll als weitestgehend generalisiert und für ein breites Spektrum an Anwendungsdomänen (Luftraumbeobachtung - ATC, Flugzeugführung, fortgeschrittene Produktionstechnik sowie Teleoperationen) einsetzbar sein.

Hierarchy of levels of automation applicable to dynamic-cognitive and psychomotor control task performance.

	Roles			
Level of automation	Monitoring	Generating	Selecting	Implementing
(1) Manual control (MC)	Human	Human	Human	Human
(2) Action support (AS)	Human/Computer	Human	Human	Human/Computer
(3) Batch processing (BP)	Human/Computer	Human	Human	Computer
(4) Shared control (SHC)	Human/Computer	Human/Computer	Human	Human/Computer
(5) Decision support (DS)	Human/Computer	Human/Computer	Human	Computer
(6) Blended decision making (BDM)	Human/Computer	Human/Computer	Human/Computer	Computer
(7) Rigid system (RS)	Human/Computer	Computer	Human	Computer
(8) Automated decision making (ADM)	Human/Computer	Human/Computer	Computer	Computer
(9) Supervisory control (SC)	Human/Computer	Computer	Computer	Computer
(10) Full automation (FA)	Computer	Computer	Computer	Computer

Abbildung 2.23: Zehn Automationsgraden für die Automatisierung kognitiver und psychomotorische Aufgaben nach [Endsley & Kaber, 1999] (Grafik aus [Endsley & Kaber, 1999], Seite 466)

Eine detailliertere Auflistung und Gegenüberstellung von Vorschlägen von Automationsgraden aus der Literatur kann in [Frohm, Lindström, Stahre, & Winroth, 2008] und besonders im Literaturreview von [Vagia, Transeth, & Fjerdingen, 2016], welches die Evolution der Automations- und Autonomiegrade seit 1950 aufzeigt, vorgefunden werden. Retrospektiv werden die Ursprünge des Konzepts mehrerer abgestufter Automationsgrade sowie die grundlegende Taxonomie, die Theorien und Modelle in [C. Wickens, 2017] beschrieben.

Das Schema skalierbarer Automation und mehrerer Automationsgrade stellt eine Anpassbarkeit der Automationsstärke und Variationsmöglichkeit zwischen den diskreten Levels dar und erlaubt, den Einsatz von Automation im Arbeitssystem dynamisch zu skalieren. Dabei werden Funktionen entweder auf den Menschen, die Maschine verteilt oder dynamisch auf beide Akteure aufgeteilt, die dann für die Durchführung verantwortlich sind. In den Darstellungen der Automationsgrade nach Sheridan (Abbildung 2.22) und Endsley (Abbildung 2.23) ist deutlich zu erkennen, wie sich zwischen den Levels die Rollenverteilung ändert und wie die Maschine (in den englischsprachigen Grafiken als „*computer*“ bezeichnet) mit steigendem Automationsgrad mehr Funktionen automatisiert ausführt. Die Aktivität des menschlichen Operateurs nimmt dabei prinzipiell über die ansteigenden Levels hinweg ab, bis zu einer minimal verbleibenden Aktivität oder bis zur kompletten Passivität. Das kann zum einen dazu genutzt werden, den Operateur bis zu einem Maximum zu entlasten, aber auch, um ihn bei moderater Automationsstärke gezielt in den Arbeitsprozess einzubinden und aktiv am Geschehen teilhaben zu lassen.

Das Schema der Automationsgrade ist im Sinne einer Umsetzung von Automation als Framework und explizit nicht als alleinige, umfassende Methodik einer Automatisierungslösung zu verstehen [Parasuraman et al., 2008], dabei beschreiben die Automationsgrade lediglich eine qualitative Möglichkeit (qualitatives Modell) für das Design, nicht aber ein Set an quantitativen Methoden [Parasuraman et al., 2000]. Außerdem gebe es nach ([Sheridan & Verplank, 1978], [Sheridan, 2002]) viele Möglichkeiten, ein Spektrum an Automation zu beschreiben.

Abbildung 2.24 stellt in einer Übersicht die aufgezeigten Strategien der dynamischen Funktionsallokation nach ([Sheridan & Verplank, 1978], [Sheridan, 1992]) dar.

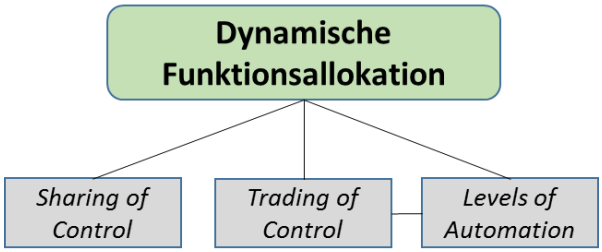


Abbildung 2.24: Strategien dynamischer Funktionsallokation nach ([Sheridan & Verplank, 1978], [Sheridan, 1992]).

Für eine umfassende und detaillierte Übersicht über Automationsgrade wird hier auf die spezifischen Literaturreviews ([Vagia et al., 2016], [C. Wickens, 2017]) verwiesen.

2.3.3 Diskussion

Zusammenfassend werden für dieses gesamte Unterkapitel der Aufgabenallokation die essentiellen Darstellungen abschließend in einer Grafik zusammengetragen. Abbildung 2.25 stellt die statische und dynamische Aufgabenzuweisung prinzipiell gegenüber.

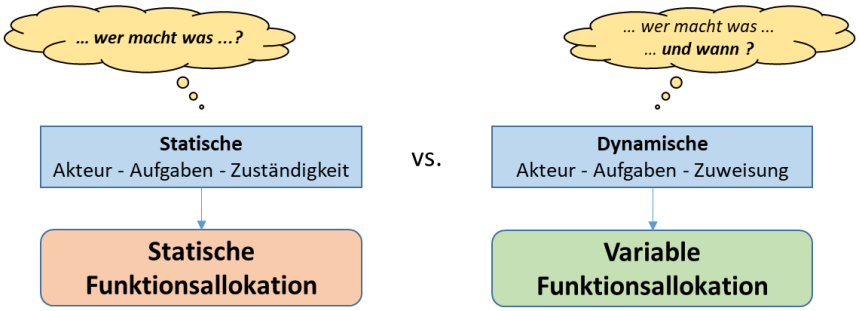


Abbildung 2.25: Gegenüberstellung statischer und variabler Funktionsallokation

Dabei hängt die tatsächlich anzuwendende Allokationsstrategie (Strategie zur Zuweisung der Aufgaben) stark von der Automatisierungstechnologie und den maschinellen Fähigkeiten ab.

Im Anwendungsfall dieser Arbeit wird mit einem zeitlich veränderlichen Muster der Funktionsbelegung gerechnet, daher wird ein dynamisches Allokationsschema ausgewählt.

Ebenso erfordert eine alternative Ausführung der Aufgabe oder eines Aufgabenteils durch den Menschen oder die Maschine bereits eine dynamische Funktionsallokation.

Die dynamische Akteur-Aufgaben-Zuweisung wird allgemein auch als *Variable Automation* bezeichnet und wurde in den Kapiteln 2.2 und insbesondere in Kapitel 2.2.2.2.2 als Automatisierungsansatz detailliert dargestellt.

Die in der Literatur vorgeschlagene Abstufung der Automationsstärke, welche durch die Einteilung in Automationsgrade erfolgt, bewegt sich in der Literatur typischerweise zwischen fünf und zehn Levels. Dieser Sachverhalt erfordert jedoch eine feingranulare Aufschlüsselung aller Aufgaben und Fähigkeiten und insbesondere der maschinellen Fähigkeiten, um eventuell ein vorgefertigtes Schema anwenden zu können. Die dort vorgeschlagenen Einteilungen und Abstufungen sind oder waren das Ergebnis aus domänenspezifischen Forschungsbereichen und sind daher nur begrenzt

direkt auf andere Anwendungen übertragbar. In der vorliegenden Arbeit soll daher eine individuelle Einteilung erfolgen, bei der sich die Anzahl an Abstufungen nicht zwingend mit den Vorschlägen aus der Literatur decken muss.

Wird also, wie im vorliegenden Anwendungsfall, eine dynamische Akteur-Aufgaben-Zuweisung benötigt, kann diese also durch das Paradigma der *Variablen Automation* mit anwendungsspezifischen Automationsgraden realisiert werden.

Von weiterem Interesse sind die übergeordneten Konzepte der *Full-Task Automation* und *Part-Task Automation* nach [Parasuraman et al., 1992], mit welchen Operateuren situativ eine angepasste und nachvollziehbare Unterstützungsleistung angeboten werden kann.

Allgemeine Strategien der Adaption der Automationsstärke durch die Wahl eines Automationslevels werden detailliert in Kapitel 2.4 beschrieben. Dabei werden verschiedene Möglichkeiten aufgezeigt, wer die Hoheit über den Wechsel der Automationsgrade in Systemen mit *Variabler Automation* hat und wie Wechsel zwischen den Automationsgraden konkret vollzogen werden können.

2.4 Automationsadaption und Aktivierungsstrategien

Für eine gewünschte Änderung des Kooperationsverhältnisses innerhalb einer dynamischen Funktionsallokation muss die Funktionsweise bzw. der Automationsgrad dynamisch-situativ verändert werden.

Nachfolgend wird eine Übersicht über mögliche Strategien der Änderung und Adaption des Automatisierungsgrads eines veränderbaren Systems (*Automation Invocation Strategies*) sowie deren Autorität durch kontrollierende Mechanismen gegeben. Diese werden in der Literatur auch als Auslöser bzw. *Trigger* bezeichnet. Dabei stehen die Fragestellungen im Vordergrund, durch wen, wie und wodurch der Prozess der Adaption der Automation vollzogen werden kann.

2.4.1 Instanz des Eingriffs

Im Falle von adaptiven Systemen stellt sich die Frage nach der Kontrollinstanz, also welcher Akteur als Kontrollinstanz die Hoheit über die Änderung des Automationsgrades innehält. Dabei wird nach ([Debernard, Vanderhaegen, & Millot, 1993], [Sheridan, 2007]) eine „*Allokationsautorität*“ beziehungsweise ein „*Allokationsagent*“ (im Sinn einer „*Zuteilungskontrolle*“ [Debernard et al., 1993]) benötigt. Abbildung 2.26 zeigt in schematischer Darstellung, wie prinzipiell der Regelkreis zur Erfüllung eines Arbeitsziels durch den Menschen oder die Maschine (maschineller Agent) geschlossen wird [Debernard et al., 1993].

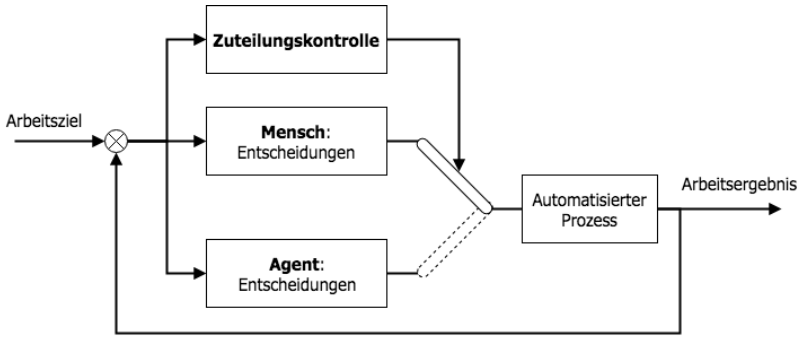


Abbildung 2.26: Externe Zuteilungskontrolle nach [Debernard et al., 1993]. Grafik aus [Schulte, Brand, Rudnick, Schmitt, & Donath, 2018].

Die Zuteilungskontrolle kann dabei explizit entweder durch den Operateur oder die Maschine bzw. das System selbst ([Debernard et al., 1993], [Scerbo, 1996], [Inagaki, 2003b]) erfolgen. Dabei wird

die Kontrolle eines gewissen Prozesses dem Menschen oder der Maschine dynamisch zugewiesen beziehungsweise die Wahl der Automatisierungsstufe oder des Automationsgrades dynamisch-situativ (variabel) bestimmt und festgesetzt ([Scerbo, 1996], [Inagaki, 2003b]).

Änderungen des Automationszustands können einerseits durch den Bediener (dieser kann System an eigene Bedürfnisse anpassen ([Oppermann, 1994], Seite 2)) oder andererseits durch das System selbst initiiert werden. Automationssysteme werden aufgrund dieser grundlegenden Ansätze als

- *adaptierbar*[35] (engl.: *adaptable*: Nutzer löst Änderungen aus) oder
- *adaptiv*[36] (engl: *adaptive*, *self-adapting*: Automationssystem triggert Änderungen initiativ)

bezeichnet (([Oppermann, 1994], Seite 16), [Scerbo, 2008]).

Zur dynamisch-situativen Auswahl des Automationsgrades werden konkrete Kriterien benötigt; ob Funktionen neu allokiert werden, wie und wann dies erfolgt [Inagaki, 2003b].

Im adaptierbaren System behält der Nutzer die alleinige Hoheit über das Initiieren der Änderung des Automationsgrades, die Automation ist dem Benutzer vollumfänglich hierarchisch unterstellt; im adaptiven System herrscht eine geteilte Hoheit für das Auslösen von Änderungen des Automationsgrades bei Mensch und Maschine [Scerbo, 2008].

Der dynamische Wechsel des Automationsgrades hat unterschiedliche Effekte auf die manuelle und automatisierte Durchführung von Aufgaben sowie die Akzeptanz der Nutzer, was durch einen experimentellen Nachweis für Variable Automation mit Haupt- und Nebenaufgaben gezeigt werden konnte [Kaber & Riley, 1999]. Dabei wurde herausgefunden, dass computerdiktierte Wechsel des Automationsgrades bevorzugt werden sollten, da bei laufender Automation sonst zusätzlicher Aufwand durch Vorschläge für Operateure gestellt wurde. ([Scerbo, 2008] nach [Kaber & Riley, 1999]). Eine neuere Studie konnte für den Wechsel zwischen vier Automationsgraden bei einer Überwachungsaufgabe mit UAVs in einer Vielfachaufgabensituation zeigen, dass eine präzisere Aufgabendurchführung bei der nutzerinitiierten Wechsel der Automationsgrade erfolgte [H. Ruff, Calhoun, Frost, Behymer, & Bartik, 2018]. Nutzer präferierten dort adaptierbare Automation gegenüber der rein adaptiven Strategie [H. Ruff et al., 2018].

2.4.2 Aktivierungsstrategien

Aktivierungsstrategien werden benötigt, um eine Automation (durch die Maschine initiiert) zur Laufzeit an den jeweilig umgebenden Kontext anzupassen. [Parasuraman et al., 1992], [Inagaki, 2003b] nennen drei prinzipielle Klassen der Anpassung von Automation:

- nach kritischen Ereignissen (*Critical-Event Strategies*)
- messwertbasiert (*Measurement-Based Strategies*)
- modellbasiert (*Modeling-Based Strategies*).

Dabei werden im Einzelnen die Kontexte der Kritikalität einer Situation, der Verlauf einer messbaren Kenngröße sowie die modellgestützte Operatorperformanz unterschieden.

[35] Adaptierbarkeit (*Adaptability*) : *„Aktive Systemänderungen durch den Nutzer“*. Auch bezeichnet als *User-Initiated Individualization* [Oppermann, 1994].

[36] Adaptivität (*Adaptivity*) bzw. Auto-Adaptivität (*Auto-Adaptivity*): *„Systemänderungen“* erfolgen *„durch das System“* selbst. Auch bezeichnet als *System-Initiated Individualization* [Oppermann, 1994].

Die drei Strategien werden im Folgenden beleuchtet und gegenübergestellt:

- **Critical-Event Strategies**: Treten im Mensch-Maschine-System spezifische (kritische) Ereignisse auf, erfolgt eine Adaption des Kooperationsverhältnisses durch eine Abwandlung der aktuell vorherrschenden Funktionsallokation. Dazu zählen beispielsweise Änderung in der umgebenden Umwelt, Abweichungen von einer erwarteten Systemleistung oder Sicherheitsanforderungen [Inagaki, 2003b]. Da im Falle des Ausbleibens dieser Ereignisse keine Anpassung erfolgt, gilt diese bereits als adaptiv. Nach [Parasuraman et al., 1992] werden drei Typen der Ausführung des Kontrollprozesses unterschieden:
    - *Emergency logic*: Die Ausführung des anpassenden Kontrollprozesses erfolgt ohne menschliche Initiierung oder Intervention.
    - *Executive logic*: Der anpassende Kontrollprozess wird vorbereitet und für die Ausführung aktiviert, die finale Ausführung erfordert die Zustimmung des Menschen.
    - *Automated display logic*: Alle unkritischen Befunde auf der Anzeigeebene werden für das entsprechende Ereignis durch Kontrollprozesse adaptiert, damit der Mensch sich auf die wichtigsten Aufgaben des Ereignisses konzentrieren kann.
- **Measurement-Based Strategies**: Initial 1977 durch Rouse vorgeschlagen, kann laut [Parasuraman et al., 1992] die Belastung- und Beanspruchungssituation des Menschen von Moment zu Moment durch dynamische Funktionsallokation um ein optimales Level herum moderiert werden. Dabei können beispielsweise psychophysiologische Kennzahlen und Messgrößen [Inagaki, 2003b] oder die Gehirnaktivität [Parasuraman et al., 1992], herangezogen werden.
- **Modeling-Based Strategies**: Die Adaption der Automation kann anhand der erbrachten Leistung des Menschen modellbasiert vollzogen werden, oder anhand von Intentionsmodellen oder Ressourcenmodellen ([C. D. Wickens, 1989], [C. D. Wickens, 2004], [C. D. Wickens, 2002]) des Menschen. Der Zustand des Menschen wird dabei mittels geeigneter Modelle rekonstruiert, anhand dessen in einem geschlossenen Kreis die Anpassung der Automation an den Menschen erfolgt [Parasuraman et al., 1992].

2.4.3 Diskussion

Adaptive Automation soll als Automatisierungsansatz der Sensordatenauswertung zur Adaption der Automation an äußere Umstände dienen. Im vorliegenden Klassifikationsschema der Aktivierungsstrategien kann die angestrebte Anpassung aufgrund der *Trustworthiness* der Aufklärungsergebnisse der Klasse der *Critical-Event Strategies* zugeordnet werden.

Eine Adaption des dynamischen Mensch-Maschine-Kooperationsverhältnisses mittels einer alternativen, für das Ergebnis des automatisierten Prozesses situativ günstigeren Funktionsallokation, kann durch das technische System selbst initiiert werden. (*Emergency logic*).

Im Rahmen dieser Arbeit kann hiermit beim Auftreten eins kritischen Ereignisses ein Wechsel des Automationsgrades durch das System selbst erfolgen.

Aus vorangegangenen Studien konnte entnommen werden, dass zugunsten der Vermeidung von Zusatzaufwendungen seitens des Operateurs eine systemseitige Anpassung des Automationsgrades sinnvoll erscheint. Aufgrund der erwarteten Komplexität beim Aufklärungseinsatz von MUM-T-Plattformen wird jedoch mit dem Operateur als finaler Hoheit gerechnet, weshalb zusätzlich eine adaptierbare Lösung angestrebt wird.

2.5 Eingriffspunkte zur Entlastung des Operateurs

Im vorherigen Kapitel wurden Gestaltungsprinzipien von Automation und Automatisierungsansätze, im speziellen von variabler und adaptiver Automation, aufgezeigt und diskutiert. Im weiteren Vorgehen soll nun die eine mögliche Entlastung des Operateurs durch eine Aufgabenteilung mittels variabler Automation eingeschätzt werden. Für die menschseitige

Betrachtung des Operateurs im Umgang mit einer potentiellen Automatisierungslösung zur Objektaufklärung werden daher Angriffspunkte für eine mögliche Entlastung des Menschen benötigt. Dafür müssen zunächst geeignete Wirkprinzipien ausgemacht werden, welche eine Automatisierungslösung mit visueller Ergebnisdarstellung aufgreifen kann.

Im Folgenden werden aus Literatur und Forschung daher selektiv relevante Konzepte ausgewählt und vorgestellt, welche in Zusammenhang mit der Automatisierungslösung gebracht werden.

2.5.1 Belastungs-Beanspruchungs-Konzept

Das theoretische, anschauliche *Belastungs-Beanspruchungs-Konzept* ([Rohmert, 1983a], [Rohmert, 1983b], [Rohmert, 1984]) stellt einen kausalen Zusammenhang zwischen der Belastung des Menschen (mit seinen individuellen Eigenschaften), beispielsweise durch Aufgaben, und der dabei erfahrenen Beanspruchung dar (Abbildung 2.27).

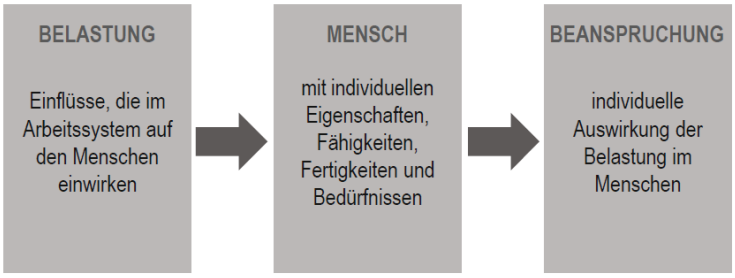


Abbildung 2.27: Kausalität im Belastungs-Beanspruchungs-Konzept nach [Rohmert, 1984], Grafik aus ([Schlick et al., 2010], S. 39).

Die einzelnen Begrifflichkeiten werden im Folgenden detaillierter beleuchtet.

2.5.1.1 Belastung

Als *Taskload* (oder auch *input load*, *task demands*, *stressors* [Schlick, Bruder, & Luczak, 2018], Seite 253) wird die Belastung des Menschen durch Einflüsse aus der Umwelt und einen gestellten Umfang an Aufgaben bezeichnet. Laut [DIN/EN/ISO 10075-1:2000, 2000] und [DIN/EN/ISO 10075-1:2017, 2017] wird „Belastung“ phänomenologisch als *„die Gesamtheit aller erfassbaren Einflüsse, die von außen auf den Menschen zukommen und (psychisch) auf ihn wirken“*, definiert. In ([Schlick et al., 2010], Seite 41) wird Belastung in die Typen

- *aufgabenbezogener* (Arbeitsformen mit energetischer oder informatorischer)
- *situationsgebundener* (Umgebungen mit physikalischer, chemischer oder sozialer)

Belastung differenziert. Weiter verfeinert, bezeichnet die aufgabenbezogene, *informatorische* Belastung explizit Belastungen aus der Informationsaufnahme, -verarbeitung und Informationsumsetzung ([Schlick et al., 2018], Seite 254). Qualitative Belastungsfaktoren können dabei die Art und Veränderung von Signalen, quantitative Belastungsfaktoren der Informationsgehalt von Anzeigen darstellen (([Schlick et al., 2010], Seite 41), [Schlick et al., 2018], Seite 26, 253)).

2.5.1.2 Beanspruchung

Eine entstehende Beanspruchung wird durch den Umfang an Aufgaben sowie deren Komplexität bei der Abarbeitung hervorgerufen. Nach [Parasuraman & Hancock, 2001] besteht ein Zusammenhang zwischen der Beanspruchung und der Belastung.

So erfolgt durch eine (mentale) Belastung eine (mentale) Beanspruchung, welche mit dieser ebenfalls potentiell ansteigt:

> *"Generally we expect that the operator's mental workload is related to task load, such that the higher the task load, the higher the operator's mental workload is likely to be."* [Parasuraman & Hancock, 2001]

Als *Workload* (oder auch *strain* [Schlick et al., 2018], Seite 253) wird die Beanspruchung eines Menschen durch gestellte Aufgaben (Belastung) bezeichnet. Dabei wird Workload allgemein als „*komplexes Konstrukt*" [Kantowitz, 1987] und „*multidimensionales*" Maß ([Cain, 2007], S. 24) verstanden.

Häufige zitierte Definitionen[37] beschreiben *Workload* zum einen phänomenologisch, beispielsweise als „*unmittelbare (nicht langfristige) Auswirkung der psychischen Belastung im Individuum"*[DIN/EN/ISO 10075-1:2000, 2000], [DIN/EN/ISO 10075-1:2017, 2017] oder als Kosten zur Erfüllung einer Aufgabe oder Mission (*„cost of accomplishing mission requirements for the human operator",* [Hart, 2006]). Zum anderen existieren kapazitätsbezogene Definitionen (in Bezug auf die Wahrnehmung und Aufmerksamkeit sowie verfügbare Ressourcen des Menschen), wobei *Workload* das *„Resultat einer Anforderung"* und als *„der Anteil der Kapazität, der für die Erfüllung der Aufgabe zugewiesen wird"* verstanden wird [De Waard, 1996].

Die Beanspruchung (*Workload*) wird nach [Kantowitz & Casper, 1988] prinzipiell in die Komponenten der *physischen* und *mentalen* Beanspruchung (*physical* und *mental*) kategorisiert. [Alty, 2003] liefert für „*kognitive Beanspruchung*" eine eingrenzende und spezialisierte Definition, nach der unter der *„kognitive(n) Beanspruchung"* eine *„Untermenge der mentalen Beanspruchung"* verstanden wird. Bei solch einer kognitiven Beanspruchung muss *„bewusste Anstrengung"* in Form eines *„bewussten Engagement(s)"* erbracht werden, sie kann also nicht unbewusst oder nebenläufig erbracht werden [Alty, 2003]. Diese Definition verfeinert damit explizit die (bewusste und unbewusste) *mentale Beanspruchung* durch eine Charakterisierung und Hervorhebung der durch bewusste kausale Betätigungen induzierten *kognitiven Beanspruchung*.

2.5.2 Menschliche Informationsverarbeitung

In der vorliegenden Anwendung werden Operateure hauptsächlich durch *informatorisch-mentale* Herausforderungen konfrontiert. Aus Wissenschaft und Literatur existieren Beschreibungen und Ansätze, welche diese *informatorisch-mentale* Arbeitsform des Menschen durch Modelle und Phasen beschreiben. Von besonderem Interesse sind hier die *phänomenologisch-empirischen* (biologischen motivierten) Modelle, insbesondere die auf den *Kapazitäten* des Menschen beruhenden Modelle (*Kapazitätsmodelle*). Diese beschreiben den Prozess der Informationsverarbeitung und dessen funktionsbezogenen Elemente [Schlick et al., 2018].

Bei den *Kapazitätsmodellen* erfolgt die Modellierung unter Betrachtung von psychophysiologischen (*Aktivierungstheorie*) und kognitionspsychologischen (*Aufmerksamkeitstheorie*) Aspekten, welche die begrenzten menschlichen Ressourcen und Kapazitäten (*Ressourcentheorie*) sowie deren Einsatz und Aktivierung zur Verrichtung informatorischer Arbeit durch das Erbringen mentaler Beanspruchung in Zusammenhang setzen ([Schlick et al., 2018], Seite 189). Im Umfang dieser Arbeit werden im Folgenden ein Schema aus dem Bereich der *Aufmerksamkeitstheorien* und ein Schema basierend auf der *Ressourcentheorie* näher betrachtet.

Zu den *Aufmerksamkeitstheorien* zählt das Schema menschlicher Informationsverarbeitung nach Wickens [C. D. Wickens & Hollands, 2000]. Dieses aufmerksamkeitstheoretische Schema integriert dabei als globalere Modellvorstellung das *Arbeits- und Langzeitgedächtnis* zur Verrichtung kognitiver oder gedächtnisgestützter Prozesse sowie die *Ressource der Aufmerksamkeit* zur

[37] In [Young, Brookhuis, Wickens, & Hancock, 2015] kann der Stand der Wissenschaft zum Thema *Mentale Beanspruchung* in der Ergonomie detailliert nachvollzogen werden.

stufenspezifischen [Sanders, 1983] und prozessspezifischen Aktivierung der Modellbestandteile bzw. Stufen [C. D. Wickens & Hollands, 2000], ([Schlick et al., 2018], Seite 192) neben sequentiellen Stufen des Informationsverarbeitungsprozesses. Abbildung 2.28 zeigt das aufmerksamkeitstheoretische Schema menschlicher Informationsverarbeitung mit horizontal angeordneten Stufen (sequenzielle Prozessblöcke) sowie vertikal angeordneten Ressourcen zur Aktivierung der Stufen.

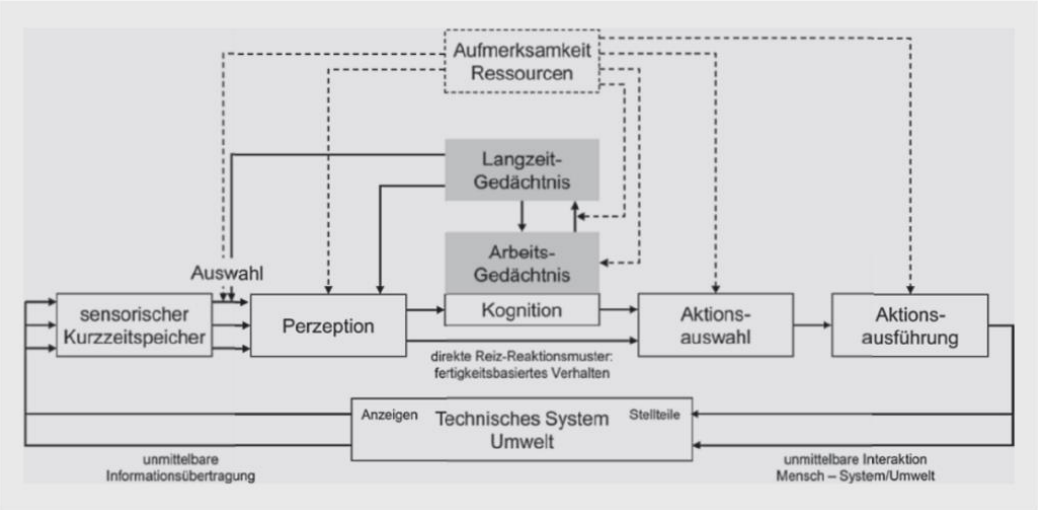


Abbildung 2.28: Modell menschlicher Informationsverarbeitung nach [C. D. Wickens & Hollands, 2000], Grafik aus ([Schlick et al., 2018], Seite 192). Die Ressource der Aufmerksamkeit wird zur Aktivierung der Verarbeitungsstufen und Verarbeitungsprozesse aufgewendet.

Die (mentalen) Ressourcen, wie beispielsweise der Verarbeitungsaufwand, die Gedächtniskapazität oder die Kommunikationskanäle, werden dabei grundsätzlich immer als limitiert [D. A. Norman & Bobrow, 1975] betrachtet. Die Aufwendung und Aktivierung (mentaler) Ressourcen durch die Beanspruchung wird dabei, aufgrund der der begrenzten und zeitlich variablen Verarbeitungsressource der Verarbeitungsfähigkeit, vordergründig als kapazitätsgebunden [D. A. Norman & Bobrow, 1975] interpretiert ([Schlick et al., 2018], Seite 192). Die variable Zuteilung der Verarbeitungsressourcen erfolgt spezifisch für die Stufen. Dazu schlägt [Sanders, 1983] das Modell eines Aktivierungssystems vor, welches auch die Aufteilung der limitierten Ressourcen bei konkurrierender mehrfacher Anforderung [D. A. Norman & Bobrow, 1975] durch Interprozesse beschreibt.

Zentrale Konzepte sind dabei die Ressourcen der *Aufmerksamkeit* und des *Arbeitsgedächtnisses*, welches in direkten Zusammenhang mit den kognitiven Prozessen gebracht wird (siehe Abbildung 2.28, im Zentrum).

2.5.2.1 Aufmerksamkeit

Die *Aufmerksamkeit*[38] bezeichnet dabei eine (prinzipiell limitierte) Ressource welche es dem Menschen ermöglicht, auf Stimuli aus der Umwelt zu reagieren; dabei solche Reize wahrzunehmen, herauszufiltern und weiterzuverarbeiten ([C. D. Wickens & McCarley, 2008], [C. D. Wickens & Carswell, 2012]). Dabei wird Aufmerksamkeit grob konzeptionell in drei Prinzipien unterteilt:

- Durch *selektive* Aufmerksamkeit erfolgt die Auswahl derer Reize und Informationen aus der Umwelt, welche Aufmerksamkeit und Verarbeitungsressourcen zugeteilt bekommen.

[38] Die Beschreibung reduziert das Konzept der Aufmerksamkeit auf eine prinzipielle und oberflächliche Darstellung. Weiterführende Literatur: ([C. D. Wickens & McCarley, 2008], [Wentura & Frings, 2013] Seite 93).

- Die *fokussierte* Aufmerksamkeit erlaubt die Bündelung und Konzentration der Aufmerksamkeit auf einen ausgewählten Reiz sowie dessen Verarbeitung und blendet Ablenkungen und Beeinflussungen weiterer Reize aus, was auch als *selegieren* bezeichnet wird [Wentura & Frings, 2013].
- *Geteilte* Aufmerksamkeit charakterisiert die gleichzeitige und parallele Verarbeitung mehrerer Reize oder Informationen aus der Umwelt.

Nach [C. D. Wickens & Carswell, 2012] spielt die Ressource der *Aufmerksamkeit* in der menschlichen Informationsverarbeitung zwei kritische Rollen: bei der Selektion (*selective agent*) zur Auswahl und Beschränkung wahrgenommener Reize und Informationen sowie beim Management (*task management agent*) bei der Verwaltung, welche Aufgaben beziehungsweise mentale Prozesse (gleichzeitig) ausgeführt werden. ([C. D. Wickens & Carswell, 2012], Seite 120).

2.5.2.2 Arbeitsgedächtnis

Das *Arbeitsgedächtnis*[39] wird als Ressource zur Vorhaltung und Verarbeitung einer begrenzten Anzahl an Informationen, Daten und Eindrücken (abstrakt, bildlich oder auditiv) verstanden, welche der Mensch zeitgleich mental aufrechterhalten und manipulieren kann ([C. D. Wickens & Carswell, 2012], Seite 133). Das Arbeitsgedächtnis agiert als flüchtiger Speicher, da die *Items* darin schnell verloren gehen beziehungsweise verworfen werden ([J. Brown, 1958], [Peterson & Peterson, 1959], [Ricker, Vergauwe, & Cowan, 2016]). Ebenso ist die Kapazität des Arbeitsgedächtnisses prinzipiell limitiert, nach ([G. A. Miller, 1956], [G. A. Miller, 1994]) wird diese Gedächtnisspanne (*memory span*) auf etwa fünf bis neun unabhängige *Items* beziffert. Dabei werden mehrere materiell unabhängige *Items* im Arbeitsgedächtnis jedoch als einzelnes *Chunk*, also als einzelne Einheit, repräsentiert. Anknüpfend an ältere Modellvorstellungen, welche die Literatur beschreibt, schlägt [A. Baddeley, 2003] mit Erkenntnissen aus der Neuropsychologie und psychometrischen Untersuchungen ein vierteiliges Modell des Arbeitsgedächtnis vor.

Zur Modellierung menschlicher Ressourcen (*„Demands“*), welche bei der Informationsverarbeitung beansprucht werden, soll kurz ein Modellierungsansatz der *Ressourcentheorie* aufgezeigt werden. Der Ansatz des *Modells Multipler Ressourcen* beschreibt Kapazitäten mit der *Theorie der multiplen Ressourcen* nach ([C. D. Wickens, 1989], [C. D. Wickens, 1992], [C. D. Wickens, 2002], [C. D. Wickens, 2004]) (Abbildung 2.29).

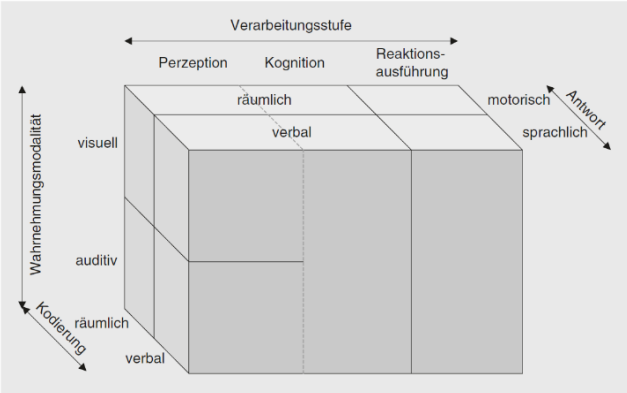


Abbildung 2.29: Theorie multipler Ressourcen nach [C. D. Wickens & Hollands, 2000]: Verarbeitungsstufe, Wahrnehmungsmodalität und Kodierung als Arten der Kapazität, Grafik aus ([Schlick et al., 2018], Seite 194).

[39] Die Beschreibung reduziert das Konzept des Arbeitsgedächtnisses auf eine prinzipielle und oberflächliche Darstellung. Weiterführende Literatur: [C. D. Wickens & Carswell, 2012] ab Seite 133, [Wentura & Frings, 2013] Seite 93.

Die Repräsentation umfasst dabei vier kategoriale Dimensionen mit dichotomischer Eigenschaft:

- **Verarbeitungsstufen** (Perzeption, Kognition, Reaktionsausführung)
- **(Sensorische) Wahrnehmungsmodalität (visuell vs. auditiv)**; die Art des visuellen Kanals im Speziellen wird noch feiner unterteilt (fokussiert vs. verteilt)
- Art der **Kodierung** (räumlich vs. verbal)
- **Antwortverhalten** (motorisch, sprachlich).

Mit dieser Art der Modellierung werden Inkonsistenten einfacherer Ressourcenmodelle genauer beschrieben und es lassen sich Inferenzen zwischen kognitiven Ressourcen durch die Mehrdimensionalität abbilden ([Schlick et al., 2018], Seite 195). Dadurch bietet es im Bereich des *Cognitive Engineering*[40] eine Grundlage zur *kognitiven Modellierung*[41] von Wissen über die Ressourcenallokation eines Probanden bei der Durchführung einzelner Tätigkeiten (beispielhaft angewendet in [Maiwald, 2013] zur Modellierung der Ressourcenbelegung bei Cockpittätigkeiten). Dabei werden einzelnen Ressourcen beziehungsweise Komponenten des Modells entsprechend einer gewissen anteiligen Zuteilung in einem beanspruchenden Kontext quantifiziert.

Durch die Aufklärungsdaten aus unbemannten Flugplattformen wird der Mensch als Informationsempfänger hauptsächlich mit visuellen Daten und Informationen konfrontiert, also mit der visuellen Informationsaufnahme und -verarbeitung beaufschlagt. Das Modell nach [A. Baddeley, 2003] wird im Folgenden dafür herangezogen, schwerpunktmäßig die Vorgänge der visuellen Perzeption und Kognition nachzuvollziehen. Damit werden konkrete Ansatzpunkte für die maschinelle Aufbereitung von Daten und Informationen aufgedeckt.

2.5.3 Visuelle Perzeption und Kognition

Hinweis: Einige Inhalte und Grafiken dieses Abschnitts wurden bereits vorab in [Ruf et al., 2017] veröffentlicht.

Bei der vorliegenden Arbeit nehmen die visuelle Perzeption und Kognition eines Operateurs die zentrale Rolle bei der Informationsaufnahme ein. Nachfolgend werden daher die prinzipiellen kognitiven Zusammenhänge bei *informatorischer* Belastung (Kapitel 2.5.1) im speziellen der visuellen Informationsaufnahme- und Verarbeitung entlang deren Abfolge erläutert. Dabei werden die Schritte von der Perzeption von visuellen Informationen bis hin zur Handlungsgenerierung unter dem letzten etablierten Erkenntnisstand der Wissenschaft abstrakt darstellt.

Abbildung 2.30 zeigt die Prozesskette, welche die Zusammenhänge anhand der kognitionspsychologischen Konzepte der (visuellen) *Aufmerksamkeit* und des (visuellen) *Arbeitsgedächtnisses* erläutert.

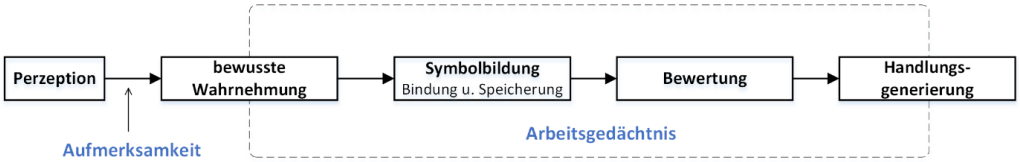


Abbildung 2.30: Prozesskette bestehend aus Konzepten der Aufmerksamkeit und des Arbeitsgedächtnisses. Grafik aus [Ruf et al., 2017].

[40] *Cognitive Engineering* bezeichnet nach [Wilson, Helton, & Wiggins, n.d.] *"die Anwendung der Kognitionspsychologie und verwandter Disziplinen auf das Design und den Betrieb von Mensch-Maschine-Systemen."*

[41] Die Methodik der Kognitiven Modellierung hat das Ziel, „kognitive (informationsverarbeitende) Prozesse natürlicher Systeme" (besonders des Menschen) als Simulation oder Modell in materiellen Systemen (Computer) zu implementieren, wobei diese formallogisch und mit vergleichbarer Leistung abgebildet werden." ([Strube et al., 1996], [Peper, 2013])

Die Bandbreite visueller sensorischer Informationen, welche das menschliche Gehirn über den optischen Nerv von der Retina bereitgestellt bekommt, lässt sich global auf bis zu 100 Mbps beziffern ([Strong, Köberle, de Ruyter van Steveninck, & Bialek, 1998], [Koch et al., 2006]).

Nach der Perzeption visueller Signale und Informationen wird ein Teil aus diesen bewusst wahrgenommen, indem *Aufmerksamkeit* [C. D. Wickens & McCarley, 2007] darauf gelenkt wird. Dabei werden einzelne, wahrgenommene Merkmale mithilfe des *Arbeitsgedächtnisses* zu Objekten gebunden und zugehörige Objektrepräsentationen zur weiteren Verarbeitung im Arbeitsgedächtnis abgelegt und vorgehalten. Dort werden sie durch einen Abgleich mit Informationen aus dem Langzeitgedächtnis bewertet, woraufhin eine Entscheidung über die Bedeutung des Objektes gefällt und eine Handlung generiert wird.

Die Prozesskette beinhaltet zwei zentrale Konzepte, zu denen ein neuzeitlicher Forschungsstand wiedergegeben werden soll: die *Aufmerksamkeit* und das *Arbeitsgedächtnis* ([A. D. Baddeley, Allen, & Hitch, 2011], [Theeuwes, Kramer, & Irwin, 2011]). Nach [A. Baddeley, 2003] besteht das Arbeitsgedächtnis aus verschiedenen Subsystemen:

- der *phonologischen Schleife* für die Aufrechterhaltung auditiver bzw. akustischer und
- dem *visuell-räumlichen Notizblock* für Haltung visuell-räumlicher Informationen sowie
- einer *zentralen Exekutive* zur Koordination der Verwendung der Informationen.

Die Verknüpfung zwischen den Subsystemen bildet der *episodische Puffer*, in welchem integrierte Repräsentationen gehalten werden ([C. D. Wickens & Carswell, 2012], Seite 133).

2.5.3.1 Visuelles Arbeitsgedächtnis[42]

Das *visuelle Arbeitsgedächtnis* dient dazu, visuelle Informationen für einen kurzen Zeitraum, in dem sie für aktuelles und zukünftiges Verhalten bedeutend sind, zu speichern [Chun, 2011], um sie mithilfe des episodischen Puffers zu verarbeiten. Visuelle Merkmale werden dabei innerhalb des visuellen Subsystems zu Objekten gebunden und als solche im episodischen Puffer unter Einbezug der Informationen aller Dimensionen des Arbeitsgedächtnisses weiterverarbeitet ([A. D. Baddeley et al., 2011], [Allen, Hitch, Mate, & Baddeley, 2012]). Bezüglich der Bindungsprozesse ist zu erwähnen, dass bei sequentieller Präsentation von Informationen -im Gegensatz zu simultaner- gebundene Objektrepräsentationen anfälliger für Störungen sind, die durch die Verarbeitung weiterer Informationen verursacht werden ([Allen, Baddeley, & Hitch, 2006], [L. A. Brown & Brockmole, 2010], [Allen et al., 2012]). Dies geschieht besonders, wenn die Objekte für die gestellte Aufgabe relevante Merkmale enthalten [A. D. Baddeley et al., 2011].

2.5.3.2 Visuelle Aufmerksamkeit

Eng verknüpft mit dem Konzept des Arbeitsgedächtnisses ist das Konzept der Aufmerksamkeit [C. D. Wickens & McCarley, 2007], wobei hier exklusiv die *visuelle Aufmerksamkeit* betrachtet wird. Die Prozesse, die im Arbeitsgedächtnis ablaufen, benötigen Aufmerksamkeit, wofür in zahlreichen Studien Belege gefunden wurden ([Wheeler & Treisman, 2002], [Elsley & Parmentier, 2009], [L. A. Brown & Brockmole, 2010], [Chun, 2011]), auch wenn die Zusammenhänge noch nicht gänzlich erforscht sind [L. A. Brown & Brockmole, 2010]. Studien, die sich gegen einen Zusammenhang aussprachen ([Allen et al., 2006], [Johnson, Hollingworth, & Luck, 2008]) präsentierten in ihren Experimenten ihre *Items* jedoch nur für sehr kurze Zeit (weniger als 500 Millisekunden), weswegen diese Studien im weiteren Verlauf als nicht relevant für diese Arbeit betrachtet werden, da es in der vorliegenden Anwendung keine künstliche Zeitbegrenzung der Präsentation von Informationen gibt.

Daher spielt die Aufmerksamkeit nicht nur für das Halten von Informationen [L. A. Brown & Brockmole, 2010] eine wichtige Rolle, sondern auch für die Auswahl, welche Informationen bedeutend sind; also für die Filterung, das Binden und die Ablage im Arbeitsgedächtnis

[42] Weiterführende Literatur: [Popp, 2013]

([Vogel, Luck, & Shapiro, 1998], [L. A. Brown & Brockmole, 2010], [Chun, 2011], [Theeuwes et al., 2011]). Die Belege stammen aus Experimenten zur Ermittlung des Einflusses von Zusatzaufgaben, welche Aufmerksamkeit benötigen und die Prozesse im visuellen Arbeitsgedächtnis störten [Allen et al., 2012].

Die Aufmerksamkeit kontrolliert den Zugang von Informationen zum Arbeitsgedächtnis, den Verbleib dieser darin und den Abruf daraus ([Chun, 2011], [Theeuwes et al., 2011]), aber sie unterliegt ebenso wie das Arbeitsgedächtnis einer beschränkten Kapazität. In diesem Punkt besteht in der Forschung weithin Einigkeit ([Cowan, 2011], [Chun, 2011], [Theeuwes et al., 2011], [Allen et al., 2012]). Es wird angenommen, dass das Arbeitsgedächtnis drei bis vier Einheiten halten kann, wobei eine Einheit aus einem Objekt mit mehr als einem Merkmal bestehen kann [Chun, 2011].

Basierend auf der Verarbeitung der visuellen Informationen im Arbeitsgedächtnis wird die Entscheidung gefällt, ob das Objekt für die zu erledigende Aufgabe oder die eigenen Ziele relevant ist oder nicht, und eine entsprechende Handlung generiert (Abbildung 2.30).

Dabei muss beachtet werden, dass bei der Informationsaufnahme Konflikte entstehen können, falls mehrere Aufgaben simultan[43] dieselbe periphere Ressource beanspruchen oder mehrere Aufgaben zeitgleich die zentrale prozedurale Ressource durch Beanspruchung von Aufmerksamkeit auslasten [Salvucci & Taatgen, 2008]. Besonders bei hoher (visueller *informatorischer*) Belastung entsteht ein hohes Konfliktpotential mit konkurrierenden (visuellen) Reizen, was zum Tunnelblick (*Attention Tunneling* und *Cognitive Tunneling*) führen kann ([C. D. Wickens & Alexander, 2009], [C. D. Wickens, 2017], Seite 21). Diese übermäßige Fokussierung wird durch die natürliche Abneigung des Menschen, schnell zwischen Betätigungen zu wechseln („*switch resistance*“, [C. D. Wickens, 2017]), und der Bevorzugung sequentieller Aufgabenabarbeitung, hervorgerufen. Beim *Attention Tunneling* wird die gesamte Aufmerksamkeit generell schwerpunktmäßig einem bestimmten Informationskanal zugeteilt [C. D. Wickens & Alexander, 2009]. Bei der Überlastung der Kapazitäten durch hohe Beanspruchung kann eine kognitive Blockade (*Cognitive Lockup*) als Extrem eintreten, welche die Erfassung einer Situation oder der Umwelt erschweren oder gar verhindern kann [Moray & Rotenberg, 1989].

2.5.4 Diskussion und Erarbeitung einer Entlastungsstrategie

Hinweis: Inhalte dieses Abschnitts wurden bereits vorab in [Ruf et al., 2017] veröffentlicht.

Mit der Darstellung der Konzepte und Modelle der Belastung und Beanspruchung (Kapitel 2.5.1), menschlicher Informationsverarbeitung (Kapitel 2.5.2) sowie den Ressourcen der Aufmerksamkeit (Kapitel 2.5.2.1) und des Arbeitsgedächtnisses (Kapitel 2.5.2.2) konnte anhand des wissenschaftlichen Erkenntnisstands rekonstruiert und dargestellt werden, dass diese grundlegenden Limitierungen hinsichtlich der Ressourcen unterworfen sind. Ebenso wurde aufgezeigt, dass eine externe Stimulation oder Erzeugung von Verarbeitungsaufwand eine (mentale) Belastung induziert, welche diese Ressourcen beansprucht.

2.5.4.1 Auswirkungen visueller Datenrepräsentation auf die Beanspruchung

Agiert ein Operateur einer unbemannten Aufklärungsflugplattform mit sensorisch erfassten Daten, müssen Daten und Informationen auf Displays wahrgenommen, verarbeitet und interpretiert werden (Kapitel 2.5.3). Diese Arbeitsabläufe werden mithilfe des visuellen Arbeitsgedächtnisses (Kapitel 2.5.3.1) ausgeführt, was eine zusätzliche *Beanspruchung* generiert.

Nimmt ein Operateur visuell dargestellte Aufklärungsdaten wahr, kommt dabei das Konzept der Aufmerksamkeit (Kapitel 2.5.3) zum Tragen. Dabei werden, gesteuert durch die visuelle Aufmerksamkeit, relevante Merkmale selektiert und herausgefiltert, aus denen im visuellen Arbeitsgedächtnis Muster und Symbole abgeleitet werden. Diese werden vorgehalten, um über ihre Relevanz für die weitere Aufgabenabhandlung (beispielsweise die Missionsgestaltung) zu

[43] Theorie der *„Threaded Cognition“* [Salvucci & Taatgen, 2008] berücksichtigt explizit die Mehrfachaufgaben-Situation und parallele Aufgaben.

entscheiden und Handlungen zu generieren. Damit wurde ersichtlich, dass maßgeblich für das Ausmaß der dabei induzierten *mentalen Beanspruchung* die Bandbreite bzw. der Abstraktionsgrad dieser Daten angenommen werden kann.

Generell lassen sich zur Präsentation von Aufklärungsprodukten verschiedene Arten und Darstellungsmodalitäten nutzen. Dabei können Aufklärungsdaten und -ergebnisse mittels unterschiedlicher Repräsentationsarten visualisiert werden, wodurch unterschiedliche Anforderungen aus den Bereichen der Wahrnehmung und der Verarbeitung an den Betrachter gestellt werden.

2.5.4.2 Einflussfaktoren aus dem Bereich der Wahrnehmung

Werden bildliche Sensordaten im Rohformat dargestellt, muss ein Operateur eine sehr große Menge bzw. hohe Bandbreite an Daten aufnehmen und verarbeiten, was die Kapazitäten der Aufmerksamkeit (Kapitel 2.5.2.1) und des visuellen Arbeitsgedächtnisses (Kapitel 2.5.3.1) stark beansprucht bzw. in Kombination mit anderen Aufgaben übersteigen kann. Zudem verringert sich dessen Kapazität, wenn die Merkmale komplex oder über unterschiedliche Teile eines Objekts verteilt sind oder mehrere Merkmale der gleichen Dimension entspringen. Abgesehen davon, dass die relevanten Merkmale vom Hintergrund getrennt und unter Überlagerung von Rauschen erkannt werden müssen, darf sich der Operateur von den externen, für diese Tätigkeiten irrelevanten Informationen sowie den kognitiven Prozessen nicht ablenken lassen, was in einem breiten Signalraum prinzipiell schwieriger ist.

Zudem ist zu beachten, dass bei visuell sequentieller Präsentation, beispielsweise durch Videostreams, sehr viele Informationen nacheinander dargestellt werden. Daraus können sich nach den oben vorgestellten Befunden Störungen in den Prozessen im Arbeitsgedächtnis (Kapitel 2.5.2.2) ergeben. Durch die Extraktion von Informationen und die Überführung in eine abstrakte, symbolische Informationsebene wird die Datendarstellung einerseits zeitlich entzerrt, da der Operateur weniger einzelne Signale bzw. Informationen überprüfen muss, andererseits wird eine simultane Wahrnehmung der hervorgehobenen Informationen ermöglicht. Dadurch werden die Ressourcen des Operateurs hinsichtlich der Aufnahmefähigkeit geschont.

Werden also Daten auf einem höheren Abstraktionsgrad präsentiert, indem erkannte relevante Merkmale bereits gebunden als Symbole dargestellt werden, reduziert sich die Bandbreite und Menge der Daten. Relevantes wird hervorgehoben (mit höherer *Salienz*[44]) dargestellt, tritt aus dem Hintergrund hervor und kann leichter erfasst werden, was weniger Ablenkung verursacht bzw. die Fokussierung auf Irrelevantes vermeidet. Durch die Bündelung von Merkmalen in Symbolen können die Einheiten der vorhandenen Kapazität des Arbeitsgedächtnisses besser ausgenutzt werden. Dies führt zu einer Entlastung der Kapazitäten der Aufmerksamkeit und in der Folge zu einer geringeren Beanspruchung des Operateurs.

2.5.4.3 Einflussfaktoren aus dem Bereich der Verarbeitung

Wie in den Kapiteln (Kapitel 2.5.3.1) und (Kapitel 2.5.2.1) ersichtlich, unterliegt das visuelle Arbeitsgedächtnis denselben Beschränkungen hinsichtlich seiner Kapazität wie die Aufmerksamkeit. Für die im Arbeitsgedächtnis nach der Wahrnehmung zur Informationsverarbeitung ablaufenden Prozesse, wie die Bindung von Merkmalen zu Objekten und die Vorhaltung von Objektrepräsentationen, ist ebenfalls die Aufmerksamkeit essentiell. Je größer daher die Menge und Komplexität der zu verarbeitenden Merkmale und Symbole ist, desto eher werden die Kapazitäten des Arbeitsgedächtnisses erschöpft, was zu einer Verschlechterung der Leistungen des Operateurs und einer Überlastung führen kann. Dieser Entwicklung kann durch die Transformation von Aufklärungsdaten in eine andere

[44] Als visuelle *Salienz* wird die „*Deutlichkeit von visuellen Reizen*“, basierend auf Farbe, Luminanz, Orientierung oder anderer Merkmale, bezeichnet. Der Theorie nach ziehen visuell saliente Objekte oder Regionen die Aufmerksamkeit und den Blick in bildlichen Darstellungen oder der Umwelt verstärkt an ([Gerrig & Zimbardo, 2008], Seite 141 ff., [Dorsch, 2020]).

Repräsentationsart entgegengewirkt werden, indem Menge, Komplexität und Bandbreite der Signale eingeschränkt werden.

Zusammenfassend wird bezüglich der Induktion von *Beanspruchung* festgehalten, dass diese durch die Erhöhung des Abstraktionsgrades der Aufbereitung der visuellen Daten vermindert werden kann und in der Folge Ressourcen der Aufmerksamkeit und des Arbeitsgedächtnisses eingespart werden können. Durch eine bessere Verständlichkeit von Informationen kann eine Reduktion der Belastung und der Beanspruchung des Operateurs erreicht werden. Hinzu kommt, dass Symbole verständlicher und salienter sind als eine Flut von Informationen, die nicht vorverarbeitete Aufklärungsdaten bieten. Die Reaktion auf Symbole ist schneller und leichter möglich und die Transformation von Aufklärungsdaten in eine abstraktere Darstellungsart ermöglicht es Operateuren, durch *regel-* oder sogar *fertigkeitsbasiertes Verhalten*[45] zu reagieren. Dies fordert prinzipbedingt weniger Aufmerksamkeitsressourcen und kann zur Senkung der Beanspruchung angewandt werden.

Der Abstraktionsgrad der Aufklärungsprodukte wird daher als wichtigstes Merkmal zur Reduktion der Beanspruchung identifiziert.

Daraus wird für die Gestaltung datenverarbeitender Funktionen abgeleitet, ergonomisch günstige und möglichst *kompatible* Datenrepräsentationsformen erzeugen. Das Konzept der *Kompatibilität*[46] zielt prinzipiell auf die Sinnfälligkeit (im Sinne der Anschaulichkeit, leichten Wahrnehmbarkeit, guten Erkennbarkeit, hohen Eingängigkeit für menschliche Sinne) verschiedenartig kodierter Information für einen Menschen ab. Dabei besteht eine Zielsetzung darin, für visuelle Daten (beispielsweise auf Anzeigen) eine hohe *primäre interne Kompatibilität*, also eine möglichst gute Angleichung an die dargestellten inneren Modelle des Menschen, zu erreichen. Der Transformationsaufwand (und damit die mentale und kognitive Beanspruchung) für die Integration von Informationen in das *mentale Modell* des Menschen kann minimiert werden, wenn die die Anforderungen an den Menschen durch umzucodierende (zu rekodierende) Information minimal ist ([Luczak, 1998] Seite 121, [Schlick et al., 2010]) nach [Williges, Williges, & Elkerton, 1987]).

Für die Vermittlung von Information von Maschinen an Menschen ergibt sich daher die Forderung, visuelle Daten in einer Form darzustellen, welche für den Menschen möglichst leicht erfassbar und damit aufwandsminimal in dessen *Mentales Modell*[47] integrierbar und innerhalb dieses Modells effizient verwertbar sind.

Hinsichtlich einer visuellen Darstellung und Präsentation von Aufklärungsdaten muss zusätzlich berücksichtigt werden, dass ein Mensch zeitgleich nur eine visuelle Aufgabe bearbeiten kann, da die visuelle Perzeption und Kognition immer exklusiv beansprucht wird (Kapitel 2.5.3). Das bedeutet, dass während der Involvierung des Operateurs anderweitig potentiell mit Engpässen bei einer dynamischer Aufgabenzuweisung gerechnet werden muss.

[45] nach ([Rasmussen, 1983], [Johannsen, 1993])

[46] Das Konzept der *Kompatibilität* nach Bubb ([Bubb, Bengler, Grünen, & Vollrath, 2015], Seite 269) beschreibt die Kosten des Transformationsaufwands (umgekehrt reziprok) für den Menschen, welcher beim Umcodieren von Information zwischen verschiedenen externen und internen Informationskanälen (externe und interne Kompatibilität) innerhalb von Mensch-Maschine-Systemen entsteht.

[47] Scerbo definiert ein *Mentales Modell* pauschal als „*die kognitive Repräsentation innerhalb eines Individuums, wie ein System funktioniert*“ [Scerbo, 1996]. Ein solches Konstrukt eines *mentalen Abbilds* (einer Situation oder eines Systems) wird kontinuierlich durch Beobachtungen angereichert und dient als Grundlage künftiger Entscheidungen ([Dominguez, 1994], [C. D. Wickens, 1996], [Strube et al., 1996]).

2.6 *Human Factors* im Kontext automatisierter Prozesse

Als Ergonomie oder *Human Factors*[48] wird eine wissenschaftliche Disziplin verstanden, welche sich auf das *„Verständnis der Wechselwirkungen zwischen Menschen und anderen Elementen eines Systems“* konzentriert ([Salvendy, 2012], [IEA, 2021]).

Insbesondere beim Einsatz von automatisierten Systemen zur Prozessführung (in Luftfahrzeugcockpits) sind aus der Domäne der Luftfahrtpsychologie verschiedene automationsinduzierte Phänomene bekannt, die beim Zusammenwirken von Operateuren mit komplexen, hochautomatisierten und zuverlässigen technischen Systemen sowie Prozessen auftreten. Ebenso existieren Phänomene, welche besonders in dynamischen Arbeits- und Aufgabenumgebungen oder beim Einsatz unsicherheitsbehafteter Automation beobachtet wurden. Auch variable Automation zeigt spezifische Effekte beim Operateur, ebenso wie der Einsatz von automatisierten Alarmierungssystemen.

Die Effekte und Phänomene lassen sich grob[49] in die drei Arten der

- *impulsiven* Effekte durch Überbeanspruchung und Aufmerksamkeitsdefizite
- *trägen* Effekte durch Unterforderung und mangelnde Aufmerksamkeit
- durch Automationsfehler oder *Systemverlässlichkeit induzierten* Effekte

einteilen.

Für die vorliegende Arbeit wird insbesondere die letzte Kategorie detaillierter betrachtet. Dies erfolgt im Hinblick auf die Aufgabenstellung des Operateurs, visuelle Datenrepräsentationen aufzunehmen, sowie aus der Perspektive von Alarmierungssystemen, welche durch Operateure überwacht und beaufsichtigt werden.

Die detaillierte Darstellung der *impulsiven Effekte* durch Überbeanspruchung und Aufmerksamkeitsdefizite sowie der *trägen Effekte* durch Unterforderung und mangelnde Aufmerksamkeit kann im Anhang B vorgefunden werden.

Daraus geht hervor, dass bei den *impulsiven Effekten* insbesondere Aufmerksamkeitsdefizite durch ein defizitäres mentales Bild einer Situation als Kernursache des Zusammenbruchs der Aufmerksamkeitsallokation ausgemacht werden konnten [N. Sarter, Woods, & Billings, 1997].

Wird ein Operateur mit einer Flut an Informationen oder Daten konfrontiert, ist vom Effekt des *Data Overload* [D. D. Woods, Patterson, & Roth, 2002] die Rede, bei welchem, eine Reizüberflutung aufgrund der Fülle und Menge an Informationen auftreten kann.

Besonders in dynamischen Umgebungen muss mit dem (temporären) *„Out-of-the-loop“*-Effekt aufgrund des Verlusts des *Situationsbewusstseins* (*Situation Awareness*[50]) [Endsley & Kiris, 1995] des Operateurs über dessen Umgebung gerechnet werden. Bei Prozessen, welche unvermittelt oder bei loser Anbindung eines Operateurs für diesen nicht nachvollziehbares Verhalten zeigen, nimmt das Risiko dafür zu.

Speziell im Falle adaptiver Systeme sind Effekte der „*Mode Confusion“* [Rushby, 2002] sowie „*Mode Awareness“* [N. Sarter et al., 1997] bekannt. Dabei vermag der Operateur den tatsächlichen Systemzustand nicht wahrzunehmen oder erfasst diesen falsch. Dies tritt insbesondere auf, wenn der

[48] Das Ziel ist dabei, *„das menschliche Wohlbefinden und die Gesamtleistung des Systems zu optimieren“* ([Salvendy, 2012], [IEA, 2021]).

[49] Die dargestellte Kategorisierung ist nicht exklusiv und soll der der verständnisfördernden Abgrenzung der Effekte dienen.

[50] Unter *Situationsbewusstsein (Situation Awareness)* wird als ein Konstrukt des *Cognitive Engineering* die Fähigkeit eines Menschen verstanden, seine (dynamische) Umgebung situativ (vollständig) zu erfassen, sich ein valides *mentales Modell* dieses umgebenden Kontexts aufzubauen und dessen zeitliche Veränderung zu erschließen [Endsley, 1995].

tatsächliche System- oder Betriebszustand nicht klar kommuniziert wird oder sich außerhalb des Aufmerksamkeitsbereichs des Operateurs zur Laufzeit ändert.

Erfolgt die spontane Rückgabe der Ausführungsverantwortlichkeit einer Aufgabe vom System an den Operateur, muss zudem mit dem *return-to-manual deficit problem* [Hadley, Prinzel, Freeman, & Mikulka, 1999] gerechnet werden. Diese Effekte sind der Literatur unter dem übergeordneten Begriff der *"Automation surprises"* ([N. Sarter et al., 1997], [Hollnagel & Woods, 2006]) bekannt.

Als Konsequenz dieser Effekte kann sich ergeben, dass dem Operateurs sogenannte *„ommission errors"* [N. Sarter et al., 1997] unterlaufen. Diese entstehen unbewusst durch das Aus- und Unterlassen nötiger Aktionen aufgrund eines fehlerhaften mentalen Bildes einer Situation.

Weitere Effekte, welche explizit durch systemseitige Unzuverlässigkeit entstehen können, werden nachfolgend dargestellt.

2.6.1 Effekte durch Systemverlässlichkeit (Trustworthiness)

Hinweis: Einige Inhalte dieses Abschnitts wurden bereits vorab in [Ruf et al., 2017] veröffentlicht.

Benutzer automatisierter Systeme bilden ein Vertrauen in technische Systeme aus, im speziellen in die automatisierten Funktion des technischen Systems ([Bonnie M Muir, 1987], [J. D. Lee & Moray, 1994], [B M Muir & Moray, 1996], [Cohen, Parasuraman, & Freeman, 1998], [J. D. Lee & See, 2004]). Das Vertrauen beschreibt, in wie weit ein Benutzer Aktionen des Systems vertraut und er sich auf ein technisches System verlässt. Eine solche Vertrauensbeziehung zu einem künstlichen System oder Agenten wird als *„Trust in Automation"* [J. D. Lee & See, 2004] bezeichnet und kommt besonders in unsicherheitsgeprägten Situationen zum Vorschein:

> *„Trust is the attitude that an agent will help achieve an individual's goals in a situation characterized by uncertainty and vulnerability." (*[J. D. Lee & See, 2004]*, S.54)*

Dabei bezieht sich dieses Vertrauen typischerweise auf die projizierten Erwartungen des Menschen, was das Verhalten des Systems angeht und wie das System arbeitet und funktioniert [Baker, Phillips, Ullman, & Keebler, 2018].

Die Verlässlichkeit (*Reliability*) der Automation beeinflusst direkt das ausgeprägte und entgegengebrachte Vertrauen (die Erwartungshaltung) eines Nutzers ([J. Lee & Moray, 1992], [Masalonis & Parasuraman, 1999], [Parasuraman et al., 2000]). Nach [Parasuraman et al., 2000] vermindert Unzuverlässigkeit eines technischen Systems das Vertrauen des Operateurs und untergräbt potentielle Benefits durch die Automation.

Fehlerbehaftete Systeme verursachen Probleme der Glaubwürdigkeit (*Credibility*) beim Benutzer, was zu Auswirkungen von der Meidung [J. D. Lee & Moray, 1994] bis zur kompletten Nichtbenutzung eines Systems führen kann ([Boehm-Davis et al., 1983], [Parasuraman & Riley, 1997]). Die Glaubwürdigkeit des Systems wird nach [Boehm-Davis et al., 1983] direkt aus der Verlässlichkeit der Automation (*Trustworthiness*) abgeleitet und mit dem Vertrauen (*Trust*) des Benutzers in Verbindung gebracht ([Boehm-Davis et al., 1983], ([Parasuraman et al., 1992], Seite 11)). Zudem ist das Vertrauen (*Trust*) eines Operateurs sowohl durch die bisherige erfahrende Systemleistung als auch durch dessen Kenntnisstand der Leistungsfähigkeit bzw. Systempräzision geprägt ([Boehm-Davis et al., 1983], ([Parasuraman et al., 1992], Seite 11)).

Übermäßiges Vertrauen (*Overtrust*) kann dabei Fehlgebrauch hervorrufen, wobei Automation zu leichtfertig, unreflektiert und/ oder übermäßig oft eingesetzt wird [Parasuraman & Riley, 1997]. Übermäßiges Misstrauen (*Distrust*) kann einen verminderten Einsatz oder Nichtgebrauch herbeiführen [Parasuraman & Riley, 1997]. Ein sogenanntes *„kalibriertes Vertrauen"* (*Calibrated Trust*) stellt einen der Realität entsprechenden und korrekten Zusammenhang zwischen den

tatsächlichen Fähigkeiten des Systems sowie einer realistischen Erwartungshaltung des Operateurs dar [Parasuraman & Riley, 1997], was zu einem angemessenen Einsatz der Funktionen führt.

Im themenverwandten Anwendungsfall von (automatisierten) Warnsystemen erfährt das Antwortverhalten eines Operateurs als Reaktionen auf äußere Reize besonderes Augenmerk. Dabei unterscheidet [Meyer, 2004] zwei Typen von Antworten (kognitive Konstrukte) auf Reize (hier Warnungen), welche sich beim Benutzer einstellen können: *Reliance* und *Compliance* ([Meyer, 2004], [S. R. Dixon & Wickens, 2006], [C. D. Wickens, Dixon, & Johnson, 2012]). *Reliance* bezieht sich dabei auf die Gegebenheit einer ausbleibenden Systemmeldung, bei der keine Warnung ausgegeben und eine trügerische Sicherheit vermittelt wird. Dabei verlassen sich Operateure zu sehr auf die Zuverlässigkeit der Automation und das sichere Auftreten eines zu meldenden, aber ausbleibenden Meldeereignisses [S. R. Dixon & Wickens, 2006]. Das kann dazu führen, dass der Benutzer gezwungen wird, die Automation (stärker) zu überwachen [C. D. Wickens et al., 2012]. Im Gegensatz dazu bezeichnet *Compliance* den Zustand des Operateurs bei der Gegebenheit eines tatsächlich alarmierenden Systems (richtige und falsche Alarme). Ein konformer Operateur folgt Warnungen des Systems und leitet Gegenmaßnahmen oder Aktionen ein. Automation, die zu übermäßigen Fehlalarmen neigt, verschlechtert daher die *Compliance,* was zu Verzögerungen oder dem Ignorieren wahrer Alarmierungen führen kann [S. R. Dixon & Wickens, 2006]. Im Zusammenhang mit einer Verminderung der *Compliance* wird der sogenannte *"Cry Wolf"* – Effekt ([Breznitz, 1984], [Sorkin, 1988], [Parasuraman & Riley, 1997]) genannt, bei dem aufgrund des Misstrauens (*Distrust*) des Operateurs im Umgang mit fehlerbehafteter Automation eine verzögerte oder gar keine Betrachtung und Bearbeitung eines (wahren oder falschen) Meldeereignisses erfolgt ([S. R. Dixon & Wickens, 2006], [C. D. Wickens et al., 2012]).

Im Zusammenhang mit dem Konzept der *Reliance* taucht häufig der Begriff der *Overreliance* [Parasuraman & Riley, 1997] auf, bei dem seltene bzw. unregelmäßige, unvorhersehbare Störungen oder Ausfälle ein zu hohes bzw. exzessives Vertrauen *(Trust)* in die Automation hervorrufen, welches dann im Fehlerfall zu blindem Verlassen auf die fehlerhaft arbeitende Automation führen kann [Parasuraman & Riley, 1997].

2.6.2 Diskussion

Für die vorliegende Anwendung spielen die *impulsiven Effekte* durch *Überbeanspruchung und Aufmerksamkeitsdefizite* eine zentrale Rolle. Diese können im vorliegenden Anwendungsfall durch die Höhe und die Charakteristik einer *informatorischen Belastung* adressiert beziehungsweise vermieden werden. Die *informatorische Belastung* entsteht in der vorliegenden Anwendung primär durch die Informationsmenge (Informationsüberfluss) (Kapitel 2.5) oder durch konfliktive Informationen.

Der Aspekt der *„Automation Surprises"* kann durch eine klare Kommunikationsstrategie und eindeutige Kennzeichnung des Systemzustands adressiert werden.

Hinsichtlich der Systemverlässlichkeit einer Automationslösung spielen insbesondere das situative Vertrauen (*Trust in Automation*) sowie die daraus geprägte Glaubwürdigkeit (*Credibility*) seitens des Operateurs eine zentrale Rolle. Daher müssen sowohl die Fähigkeiten des Systems sowie dessen Kommunikationsmittel und -modalitäten dem Operateur bekannt und im Betrieb jederzeit klar erkennbar sein.

Ein weiterer relevanter Aspekt stellt die Vermeidung des „*Cry Wolf*"-Effekts dar, durch welchen Operateure ein mangelndes (nicht korrekt *kalibriertes*) Vertrauensverhältnis ausprägen könnten, welches ebenfalls die Glaubwürdigkeit (*Credibility*) des Gesamtsystems in Frage stellen würde. Aus diesem Grund sollen unsicher erkannte Objektvorkommen klar als hypothetische Erkennungen gekennzeichnet werden, um dem Operateur die Notwendigkeit der Begutachtung und Weiterbearbeitung klar und eindeutig darzustellen und ihm diese Aufgabe rechtzeitig zu übertragen.

Für die Anbindung eines Operateurs an ein automatisiertes System ergeben sich daher für die vorliegende Anwendung die Forderungen der

- **eingängigen, nachvollziehbaren, leicht zu erfassenden Darstellung des Systemzustands** sowie
- **expliziten, unmissverständlichen Darstellung und Kennzeichnung unsicherheitsbehafteter Ergebnisse** als Produkte der mit einer *Trustworthiness* behafteten maschinellen Vorverarbeitung.

2.7 Erkenntnisse und Abschlussdiskussion

In diesem Kapitel wurde Eingangs die latente Unsicherheitsbehaftung (Kapitel 2.1.3) von Objekterkennungsalgorithmen (Kapitel 2.1.2) mit dem Grundprinzip maschineller Bilddatenauswertung (Kapitel 2.1.1) als Prozesskette in Zusammenhang gebracht. In Kapitel 2.1.5 wurde herausgearbeitet, dass entlang dieser Prozesskette ein aufsteigender Automations- und Abstraktionsgrad verläuft, jedoch ein gegenläufiger Grad der Verlässlichkeit angenommen wird. Aus Sicht der Aufgabenerledigung betrachtet, bedeutet dies jedoch, dass die Maschine nicht in allen Aufgabensituationen im Stande ist, die Aufgabe vollständig zu erledigen.

Für eine Automatisierung der Sensordatenverarbeitung existieren generelle Konzepte und Grundprinzipien, Daten algorithmisch auf abstrakten Vorverarbeitungsstufen (wie beim Großkonzept der Multi-Sensor Datenfusion) stufenweise zu verarbeiten, aufzubereiten und zu fusionieren. Speziell im SPM (*Sensor- und Perzeptionsmanagement*) (Kapitel 2.1.4) wurde das Konzept der *Perzeptionskette* vorgeschlagen (Kapitel 2.1.1), welches als Modell für ein stufenweises Prozessieren von Sensordaten des Fluggeräts als automatisierte Ausführung der Wahrnehmungsaufgabe herangezogen wird.

Für die Einbindung der menschlichen Komponente in eine automatisierte Datenverarbeitung zeigt das DFIG-Fusionsmodell die Methodik der *kognitiven Fusion* auf, bei welcher konzeptionell vorprozessierte Daten gezielt in das *mentale Modell* des Nutzers integriert werden sollen. Dieser kann sich als aktive Komponente durch den Eintrag kognitiver und mentaler Arbeit in die Aufgabendurchführung einbringen (Kapitel 2.1.1). Durch die Berücksichtigung des Nutzers im Fusionsdesign wird zudem die ethische Möglichkeit geboten, den Menschen als hoheitlichen, übergeordneten Entscheider einzubinden.

Zur Anbindung eines Operateurs an datenverarbeitende Systeme wurde in Kapitel 2.2.2 aus den menschzentrierten Automatisierungsansätzen das Paradigma *Variabler Automation* ausgewählt, da dieses eine Anpassungsfähigkeit an äußere Kontexte erlaubt und die Möglichkeit bietet, den Operateur durch ein überwachendes Delegationsverhältnis an den maschinellen Aufklärungsprozess anzukoppeln und bei Bedarf zu involvieren. Somit kann dieser, beim Einbruch der maschinellen Fähigkeiten (schwindende *Trustworthiness*) gezielt hinzugezogen werden, um gegebenenfalls eine unfertige Aufklärungsaufgabe zu komplettieren.

Zur Aufgabenallokation (Kapitel 2.3) wird für die Realisierung *Variabler Automationsgrade* eine dynamische, variable Funktionsallokation herangezogen, welche eine dynamische Akteur-Aufgaben-Zuweisung erlaubt. Die grundlegenden Konzepte der *Full-Task Automation* und *Part-Task Automation* sollen dabei auf die *Perzeptionskette* angewendet werden, um eine gemeinschaftliche Durchführung einer Aufklärungsaufgabe zu repräsentieren. Dazu wurde das Integrationsschema der *Levels of Auto*mation (Kapitel 2.3.2) identifiziert und ausgewählt, durch welches die dynamische Akteur-Aufgaben-Zuweisung erfolgen soll. Für die vorliegende Anwendung wird vorgeschlagen, das Design sowie die Anzahl an Automationsgraden anhand des Konzept der *Perzeptionskette* (Kapitel 2.1.1) zu orientieren, um einen engen Bezug zu einer algorithmischen Aufbereitung von Aufklärungsdaten herzustellen.

Zur dynamischen Adaption der Automation (Kapitel 2.4) und des Mensch-Maschine-Kooperationsverhältnisses wird eine Strategie aus der Kategorie der *Critical-Event Strategies* ausgewählt, eine sogenannte *Emergency logic*. Dabei wird eine systemseitige Anpassung des Automationsgrades bin Abhängigkeit von der *Trustworthiness* der maschinellen Objektaufklärung angestrebt (Kapitel 2.4.3).

Als Kriterien für die Induktion *mentaler Beanspruchung* bei der visuellen Informationsaufnahme (durch *informatorische* Belastung) wurden die drei Kriterien der Bandbreite (Menge bezogen auf die Zeit), die Komplexität der Datendarstellung sowie die Art der Darstellung an sich (Darstellungsmodalität) herausgearbeitet und identifiziert (Kapitel 2.5). Diese müssen beim Design der Lösung explizit berücksichtigt werden. Von diesem Aspekt her wird ein möglichst hoher Grad an Automatisierung als sinnvoll betrachtet. Wie aufgezeigt, ist dieser jedoch aus technischen Gründen sowie einer Fehlerbehaftung nicht immer möglich und sinnvoll.

2.7.1 Fazit und Lösungsanforderungen

Aus der vorliegenden Erkenntnisdarlegung lässt sich eine *(bereichsweise) antagonistische Abhängigkeit* zwischen dem Grad an Automation (und damit der Verlässlichkeit der Perzeptionskette) und der Belastung und mentalen *Beanspruchung* eines Operateurs bei der Anwendung der Automation formulieren:

- Aus Sicht der Verarbeitungsprozesse in der Perzeptionskette besteht für niederwertige Prozesse (Vorverarbeitung und Teile der Detektion) ein gleichläufiges Verhältnis zwischen dem Automationsgrad und der Möglichkeit der Entlastung des Operateurs.
- Für höherwertige Aufgaben (Teile der Detektion und Identifikation) besteht jedoch aufgrund des Risikos eines möglichen Versagens sowie den Problemen bei der Automatisierung ein Dualismus zwischen dem Automationsgrad und der Fähigkeit zur Entlastung des Menschen.

In einer Anwendung wird ein möglichst hoher Grad an Automatisierung gefordert, um eine maximale Entlastung des Operateurs zu erzielen. Die Verlässlichkeit (*Trustworthiness*) der komplexen Datenauswertung hat aber genau in diesem hohen Automatisierungsgrad die höchste Risikobehaftung für Fehlfunktion oder Nichterfüllung. Daraus wird eine antagonistische Beziehung erwartet, welche durch die gleichzeitige Forderung einer hohen Automationsstufe zur maximalen Entlastung des Operateurs sowie der Forderung einer hohen Zuverlässigkeit der Prozesse in einer niedrigen Automationsstufe entsteht. Abbildung 2.31 zeigt die dilemmatische Herausforderung der gegenläufigen Beziehung der Forderungen.

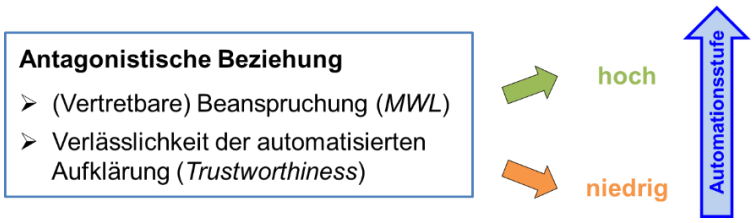


Abbildung 2.31: Dilemmatische Herausforderung der antagonistischen Beziehung.

Die Automatisierungslösung erfordert einerseits eine Lösung, welche eine möglichst hohe Automatisierungsstufe mit einem starken Grad an Automatisierung verlangt, um einen Operateur maximal zu entlasten und die Aufgaben der sensorbasierten Aufklärung möglichst stark und umfassend zu automatisieren.

Andererseits würde ein einzelner, hoher Automatisierungsgrad im Falle degradierender Aufklärungsgüte durch Algorithmen zur Objekterkennung wieder dazu führen, dass die Durchführung der Arbeitsaufgabe beim Versagen der Automationsmechanismen doch durch den Menschen erfolgen muss, wodurch der Operateur eine Beaufschlagung durch Aufgaben erfährt, welche ein hohes Maß an Belastung erzeugen.

In dieser Arbeit wird daher ein adaptiver Ansatz, welcher auf der eigenen Kritikfähigkeit (Selbstkritikalität) basiert, herangezogen. Als Kerneigenschaft nutzt dieser das primäre Merkmal der Adaptivität des Systems (Systemadaptivität), um unter variierenden Umgebungsbedingungen

angemessen reagieren zu können. Dabei soll die eine Anpassung der Automatisierungsstärke durch ein Umschalten der Automationsgrade erzielt werden.

Mit dem Fazit werden daher abschließend folgende **Anforderungen an die Automatisierungslösung** formuliert:

Systemische Anforderungen:

Wie oben identifiziert, soll das System durch eine auszuarbeitende Systemadaptivität handlungsfähig werden. Dafür sind mehrere Handlungs- und Auswahloptionen nötig, welche durch Automationsgrade abgebildet werden sollen. Jeder Automationsgrad bietet dem Operateur eine ausgewählte Systemfunktionalität für gegebene Umgebungsbedingungen an.

Dazu sollen Aufgaben, welche bei dem vorliegenden Arbeitsprozess anfallen, unterteilt werden:

- Aufgaben, welche robust durch das Automationssystem maschinell ausgeführt werden können.
- Aufgaben, bei welchen ein Operateur dem Automationssystem überlegen ist.

Anhand der Perzeptionskette für maschinelle Bildverarbeitungsroutinen (Kapitel 2.1.1) soll eine Modularisierung von Prozessverarbeitungsschritten für eine zielgerichtete Aufgabentrennung und sinnvolle Aufgabenverteilung erfolgen.

Funktionale Anforderungen:

Obenstehend wurde eine prinzipiell antagonistische Beziehung der potentiellen *Trustworthiness* und des Automationsgrades aufgezeigt. Dabei wurde herausgearbeitet, dass niedrige Automatisierung mehr Robustheit (*Trustworthiness*) aufweist und damit eine höhere Vertrauensbehaftung (*Trust in Automation*) bei einem Operateur aufweist. Ein höherer Automationsgrad eignet sich jedoch besser zur Reduzierung der Beanspruchung des Operateurs, was besonders in Mehraufgabensituationen an Relevanz gewinnt. Als Funktionale Anforderung wird daher die

Reaktionsfähigkeit bei Fähigkeitsdegradation durch Anpassung des Automationsgrades

formuliert**.** Dabei soll die Aufklärungsleistung restauriert werden, falls diese im automatisierten Betrieb degradiert. Dies soll durch gezielte Aktivierung und Involvierung mentaler Ressourcen des Operateurs erfolgen. Damit soll die für die Anwendung erforderliche Vollständigkeit einer Aufklärungsaufgabe wiederhergestellt werden, falls die Maschine diese nur teilweise bearbeiten kann.

Ergonomische Anforderungen:

Der Schwerpunkt liegt auf der Darstellung visueller Informationen aus sensorischen und informationsverarbeitenden, automatisierten (Flug-) Systemen. Die visuelle Darstellung hat Einfluss auf die Aufnahme und Verarbeitung beim Operateur (Kapitel 2.5).

An die Gestaltung der Visualisierungslösung[51] werden im vorliegenden Anwendungsfall die Anforderungen einer leichten Wahrnehmbarkeit und Eingängigkeit der Datenformate gestellt.

[51] Als Visualisierung wird als der *„Einsatz von comuptergestützten, interaktiven, visuellen Datenrepräsentationen“* bezeichnet, welcher der *„Verstärkung“* der Wahrnehmung und *„kognitiven Verarbeitung“* [Card, Mackinlay, & Schneiderman, 1999] dient.

Ebenso soll eine möglichst hohe *Kompatibilität* (Kapitel 2.5.4) zum Operateur erzielt werden, welche die Anforderungen an das Individuum geringhält.

Anhand dieser Anforderungen und des Fazits wird nun im folgenden Kapitel ein Lösungsvorschlag durch ein Systemkonzept vorgestellt.

Kapitel 3

Konzept und Umsetzung

Im vorherigen Kapitel wurden kognitionspsychologische sowie technische und systemische Sachverhalte dargestellt und lösungsmotivierende Anforderungen an die Gestaltung von Automation für die vorliegende Problemstellung herausgearbeitet und skizziert (Kapitel 2.7).

Zur Erfüllung der systemischen, funktionalen und ergonomischen Anforderungen aus Kapitel 2.7.1 wird nun ein technischer Lösungsansatz vorgestellt, welcher gezielt

- eine geeignete Aufgabenteilung für Aufklärungsaufgaben vorschlägt.
- Lösungsalternativen bei auftretender Unsicherheit bereitstellt.
- die *mentale Beanspruchung* des Operateurs geringhält.

Hinweis: Einige der Inhalte und Grafiken dieses Kapitels wurden bereits vorab teilweise oder in veränderter Form in [Ruf et al., 2017] veröffentlicht.

3.1 Lösungsansatz

Um den zuvor formulierten Anforderungen gerecht werden zu können, kommt im Konzept das Paradigma der *Variablen Automation* (Kapitel 2.3.2) in Gestalt mehrerer unterschiedlicher Automationsgrade zur Anwendung.

Die Automationsgrade sollen sich implizit durch unterschiedliche, mit höherem Automations- und Abstraktionsgrad abnehmende Robustheit und Vollständigkeit unterscheiden. Ein höherer Vorverarbeitungsgrad umfasst mehr komplexe algorithmische bzw. technische Prozesse und vermindert die Zuverlässigkeit. Für die Automationsgrade wird eine absteigende Verlässlichkeit („*Trustworthiness*“) angenommen.

Um eine Vereinfachung von Aufgabensituationen realisieren zu können, verlangen die Automationsgrade die Übernahme und Ausführung von Aufklärungsleistung durch die Automation sowie daraus resultierende unterschiedlichen Involvierungstiefen eines Operateurs, was sich in dessen dafür aufzuwendenden Anforderungen an Ressourcen *(„Demands“)* und damit *mentaler Beanspruchung* gemäß Kapitel 2.5.2. abbilden soll.

Unterschiedliche Automationsgrade, realisiert durch variable Automation, bilden infolgedessen das Rückgrat des Automationssystems, welches die technischen Aufklärungsressourcen (UAVs, Sensoren, Rechenressourcen, Algorithmen) als automatisierte Aufklärungsfähigkeiten bereitstellen soll.

Zur Veranschaulichung wird die verallgemeinerte Prozesskette aus Kapitel 2.1.1 herangezogen (Abbildung 3.1).

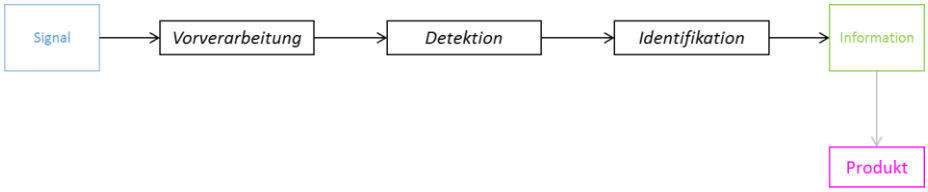


Abbildung 3.1: Verallgemeinerte Prozesskette der Objekterkennung.

Durch die Anwendung der drei Verarbeitungsstufen Vorverarbeitung, Detektion und Identifikation werden aus Sensorrohdaten (Signalen) als Produkte Ergebnisse in Gestalt von abstrakter Information extrahiert. Das Konzept der Prozesskette zur Objekterkennung dient als grundlegendes Argumentations- und Lösungsmodell zur Adressierung des speziellen Aspektes der Verlässlichkeit (*Trustworthiness*) automatisierter Datenauswertung (Kapitel 2.1.5).

Zur Umsetzung erfolgt eine Anpassung des Konzepts der Perzeptionsketten aus dem *Sensor- und Perzeptionsmanagement* (Kapitel 2.1.4) im Sinne einer konzeptionellen Erweiterung um:

- Definition von teilprozessierten Zwischenergebnissen aus Vorverarbeitungsgraden
- Bewertung der maschinellen Leistungsfähigkeit der Vorverarbeitungsgrade
- Datenabgriffe entlang der Perzeptionskette
- Einbringen des menschlichen Bearbeiters als aktiver Teil der Perzeptionskette
- Involvierungsmechanismen zur Vervollständigung der Prozesskette durch das Einbringen höherer, menschlicher kognitiver Leistung

Die konzeptionelle Erweiterung erfolgt durch das Einbringen des Paradigmas der *variablen Automationsgrade* durch das Integrationsschema der *Levels of Automation* (Kapitel 2.3.2) in das Paradigma des *Sensor- und Perzeptionsmanagements*. Die konzeptionelle Darstellung in Abbildung 3.2 erweitert das Konzept der Perzeptionskette aus Kapitel 2.1.1.

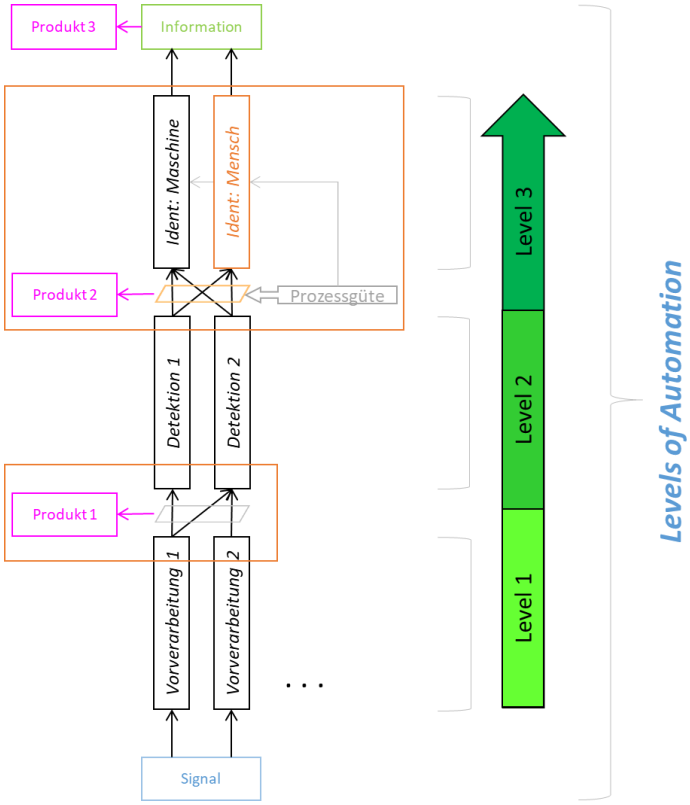


Abbildung 3.2: Erweiterung des SPM-Konzepts um „*Levels of Automation*“.

Dabei wird die Prozessgüte der Verarbeitungsschritte genutzt, um - alternativ zur Maschine - den Menschen situativ als Entscheider der Identifikationszugehörigkeit eines Ergebnisses zu involvieren (orangener Rahmen, oben). Zudem werden geeignete Verarbeitungsschritte implementiert und in Automationsgrade (*Levels of Automation*) eingeteilt, was in Abbildung 3.2 durch den grün gefärbten Pfeil zur Darstellung der abgestuften Automation als Automationsgrade dargestellt wird.

Entlang der in Abbildung 3.2 links senkrecht dargestellten Perzeptionskette werden dabei vorverarbeitete Daten unterschiedlicher Abstraktionsgrade als Produkte entnommen (Produkt 1-3, lila Hervorhebung in Abbildung 3.2), welche als separat präsentierte Aufklärungsprodukte an Operateuren herangetragen werden.

In diesem Lösungsansatz erfolgt die Aufteilung der Aufgaben auf die Akteure Mensch und Maschine mittels drei automatisierte Verarbeitungsstufen sowie der manuelle Aufgabenabarbeitung durch den Operateur, also insgesamt **drei** Automationsgraden und die Option manueller Nutzung.

3.2 Implementierung im Rechner

Die Umsetzung des beschriebenen technischen Konzepts als Experimentalsystem erfolgte durch eine onlinefähige Implementierung in der Programmiersprache *C++* ([Stroustrup, 2013], [Stroustrup, 2020]), unterstützt durch die Softwareerweiterungsbibliotheken *Boost* [Boost, 2019], das *Qt*-Framework (zur Erstellung von grafischen Benutzeroberflächen und Visualisierung von Daten) [Qt, 2020] sowie das *Carmenta Engine SDK* (Software-Bibliothek zur Erstellung von Kartendisplays) [Carmenta, 2020]. Die Verarbeitung von digitalen Bilddaten erfolgte mit den freien Programmbibliotheken *OpenCV Computer Vision Library* [OpenCV, 2018] und der *Dlib C++ Library* [King, 2009].

Abbildung 3.3 zeigt schematisch die Kernkomponenten und -funktionalitäten in einem Systemschaubild, durch welches die in Kapitel 3.5 vorgestellten Automationsgrade im Rechner als Experimentalsystem implementiert wurden.

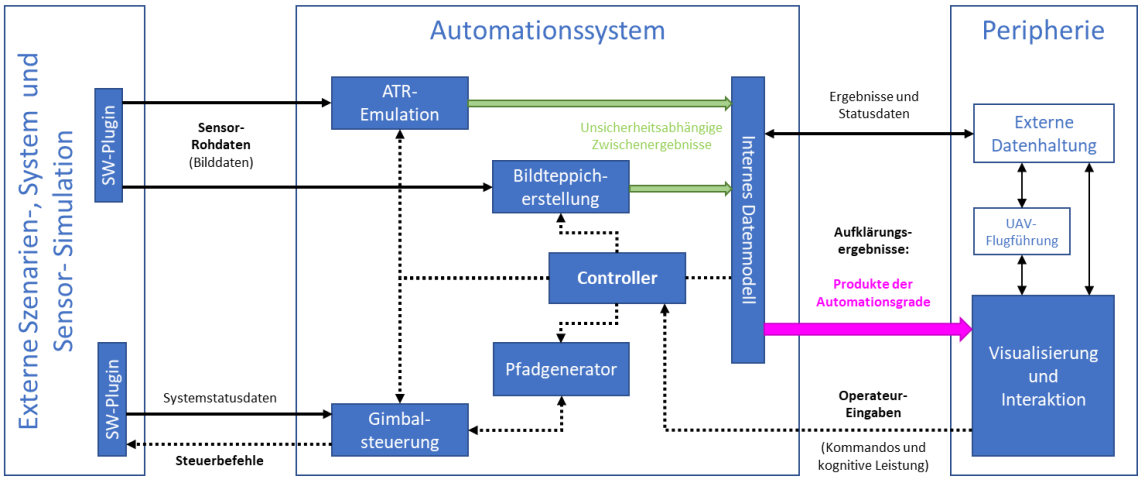


Abbildung 3.3: Schematisches Systemschaubild des variablen Automationssystems (mittig) und dessen Anbindung an eine externe Simulationsumgebung (links) sowie periphere Komponenten und Systeme (rechts). Schwarze Pfeile bezeichnen Datenflüsse, gepunktete Pfeile Kontroll- und Steuergrößen. Farblich hervorgehoben sind die durch das Automationssystem aufbereiteten visuellen Ergebnisdaten.

Die in Abbildung 3.3 blau ausgefüllten Komponenten wurden als funktionsfähige Softwareapplikationen im Rahmen dieser Arbeit erzeugt. Dabei wurden einzelne, getrennte Funktionalitäten modular durch C++-Code umgesetzt und werden als eigene Programmapplikationen oder als Software-Plugins innerhalb der Simulation betrieben.

Das Automationssystem wurde als lauffähige Applikationen auf einem COTS[52]-Rechnersystem umgesetzt und ist auf dem Betriebssystem *Ubuntu Linux 16.04 LTS* bzw. *Ubuntu Linux 18.04 LTS* [Canonical Ltd., 2018] lauffähig.

Ein feineres Systemschaubild der erstellten Applikationen sowie deren Vernetzung zu einem Gesamtsystem wird in Anhang C dargestellt. Einzelne Module und Applikationen sind über die institutseigene Interprozesskommunikation *AnyCom* [Boehm & Schulte, 2012] vernetzt, welche auf dem TCP/IP-Protokoll sowie dem Spread Toolkit [Spread Concepts LLC, 2020] basiert.

3.3 Designphilosophie für die visuelle Datenrepräsentation

Als primäre Designphilosophie beim Entwurf der Automationsgrade werden Prinzipien und Konzepte aus dem Bereich der Display- und Anzeigengestaltung aufgegriffen. Dabei werden:

- eine geringe Komplexität und die Vermeidung von Unterschieden in geringen Nuancen angestrebt [C. E. Billings, 1996][53].
- eine geringe Belastung des Kurzzeitgedächtnisses des Bedieners angestrebt ([Steinhauser, Pavlas, & Hancock, 2009][54], [Parasuraman][55], [Shneiderman & Plaisant, 2010][56]).
- ein „*In-the-Loop*“ – Zustand (Kapitel 2.6) des Operateurs erzielt; wobei der Code und Intensität von Systemmeldungen über deren Dringlichkeit Aufschluss geben [Earl L. Wiener & Curry, 1980][57].

Und insbesondere erfolgt:

- die Aufbereitung und Darstellung von Daten und Informationen „*zielorientiert und leistungssteigernd*”, damit diese für den Nutzer direkt erfassbar, aufnehmbar und direkt verwertbar und weiter nutzbar sind (*Ecological Interface Design*[58], EID [Vicente & Rasmussen, 1992], [Vicente, 2002], [Sheridan & Parasuraman, 2005]).
- die Erzeugung einer erfassungserleichternden Datenrepräsentation mit ergonomisch günstigen und möglichst *kompatiblen* (Kapitel 2.5) Datenrepräsentationsformen durch datenverarbeitende Funktionen.

Dabei wird gezielt das psychologische Konstrukt der mentalen Beanspruchung (Kapitel 2.5.1.2) adressiert, welche durch eine möglichst geringe Auslastung der Kapazitäten der Aufmerksamkeit und des visuellen Arbeitsgedächtnisses (Kapitel 2.5.2.1 und 2.5.3.1) minimiert wird.

Nachfolgend wird die erarbeitete Ausgestaltung der Automationsgrade dargestellt, welche auf dem Lösungskonzept und der Designphilosophie für die visuelle Ergebnisdarstellung basiert.

---

[52] COTS: *commercial off-the-shelf* oder *components-off-the-shelf* (englisch für kommerzielle Produkte aus dem Regal)

[53] *„Prinzipen und Gestaltungsgrundlagen (Guidelines) menschzentrierter Automation“* [C. E. Billings, 1996]

[54] „*Design Principles for Adaptive Automation and Aiding*” [Steinhauser et al., 2009]

[55] „Designprinzipien Adaptiver Automation in Luftfahrtsystemen“ (Design Issues and Principles for adaptive Automation in Aviation Systems [Parasuraman]

[56] „*Acht goldenen Regeln*“ zur Gestaltung von Displays und Cockpitanzeigen [Shneiderman & Plaisant, 2010]

[57] „Gestaltungsregeln für Automation“ [Earl L. Wiener & Curry, 1980]

[58] *Ecological Interface Design*[58], EID: Darstellungweise von Daten und Information, welche für den Nutzer direkt erfassbar, aufnehmbar und direkt verwertbar und weiter nutzbar ist. Es erfordert „*wenig oder keine kognitiven Aufwendungen*“ und stellt Informationen so bereit, dass diese „*direkt durch einen Blick auf das Display erfasst*“ und „*für schnelles Handeln*“ des Nutzers verwendet werden können ([Vicente & Rasmussen, 1992], [Vicente, 2002]).

3.4 Gestaltung der Automationsgrade

Die auf der Designphilosophie aufbauende Gestaltung der Automationsgrade erfolgt anhand eines Leitschemas nach [Endsley, 1995]. Demnach können Daten und Informationen durch eine angepasste Präsentationsstrategie optimal in das mentale, situative Situationsabbild (*SA, Situation Awareness*) (siehe Kapitel 2.6) eines Operateurs integriert werden:

> *„The way in which information is presented via the operator interface will largely influence SA by determining how much information can be acquired, how accurately it can be acquired, and to what degree it is compatible with the operator's SA needs."* [Endsley, 1995].

Der Beitrag der maschinellen ausgeführten Funktionen (Automation) erstreckt sich im Experimentalsystem auf zwei Bereiche der Entlastung des Bedieners:

- perzeptiv-kognitiv
- sensomotorisch.

Die Entlastung durch maschinell ausführbare Funktionen wird mittels Anwendung algorithmisch basierter Datenverarbeitungs- und Prozessautomationsketten verwirklicht. Abbildung 3.4 skizziert die funktionalen Domänen (blaue Kästen), welche die variablen Automationsgrade im Automationsschema durch technische Funktionen bilden:

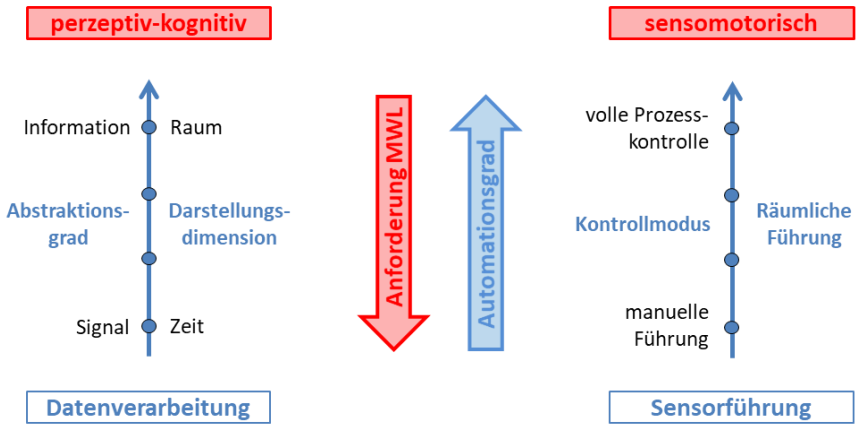


Abbildung 3.4: Automationsschema der variablen Automationsgrade mit funktionalen Domänen. Links: Kognitive Entlastung. Rechts: Sensormotorische Entlastung.

Zur kognitiven Entlastung werden durch den Einsatz von Signalverarbeitungsalgorithmen die Menge, Bandbreite und Darstellungsart von Daten variiert. Dabei werden gezielt der Abstraktionsgrad sowie die Dimension der Darstellung der Daten und Ergebnisse durch maschinelle Prozessschritte der Vorverarbeitung und Vorauswertung verändert. Dabei kommen folgende Funktionsprinzipien zur Anwendung:

- Datenauswertung von Rohdaten durch Algorithmen,
- Abstraktion und Extraktion von Information,
- Transformation von Daten und Überführung in angepasste Darstellungsdimensionen,
- Aufbereitung für Repräsentation durch verschiedene Darstellungsmodalitäten.

Die Repräsentation der aufbereiteten Daten als Produkte der Automationsgrade erstreckt sich dabei über den Abstraktionsgrad (bildliches Signal bis abstrakte Information) sowie die

Darstellungsdimension (zeitliche Folgen bis räumliche, symbolische Informationsebene), wie in Abbildung 3.4 links dargestellt.

Zur sensormotorischen Entlastung werden Führungsprozesse der kardanischen, schwenkbaren Kamerahalterung (*Gimbal*) sowie des Kamerasystems (Zoomoptik) automatisiert gesteuert, mit welchem der Wahrnehmungsfokus des Kamerasystems gelenkt wird. Damit kann der Wahrnehmungsfokus, im Gegensatz zu einer rigiden Kameramontage, frei und weitestgehend unabhängig von der Flugbahn der Sensorflugplattform geführt werden. Die Automationsgrade beinhalten dafür implementierte Kontrollmodi von manuell bis voll automatisiert, welche die automatisierte räumliche Führung zur Aufklärung von Routen und Gebieten sowie eine Mitführung der Zoomstufe der Kameraoptik umfassen [Reindl, 2015].

3.5 Produkte der Automationsgrade und Einbezug des Operateurs

Die Automatisierung der perzeptiven-kognitiven Anteile der Aufklärung begünstigt durch die implementierte Aufbereitung der Aufklärungsdaten die Aufnahmefähigkeit und Verständlichkeit seitens des Menschen und erleichtert somit die visuelle und mentale Beanspruchung [Ruf & Stuetz, 2017].

Die implementierte Automatisierung der Steuerung der Kameraschwenkvorrichtung vermeidet beziehungsweise reduziert die Anzahl an Interaktion und Führungsprozesse auf ein kommandierendes Minimum und macht die dafür regulär nötige Regel- und Führungsschleife über den menschlichen Bediener obsolet [Ruf & Stuetz, 2017].

Die folgenden Abbildungen zeigen die Datenrepräsentationen und Interaktionsformen, welche im realisierten Experimentalsystem durch die Automationsgrade in Echtzeit erzeugt und auf digitalen Multifunktionsanzeigen zur Anzeige gebracht werden. Die Multifunktionsanzeigen dienen ebenfalls als Interaktionsflächen zur Interaktion des Benutzers mit den Aufklärungsprodukten.

3.5.1 Automationsgrad „Video Assisted“

Der im Experimentalsystem niedrigste Automationsgrad *„Video Assisted“* unterstützt den Bediener durch einen Echtzeit-Videostream (Abbildung 3.5 und Abbildung 3.6) , in dem durch visuelle Markierung die Aufmerksamkeit auf potentielle Objekthypothesen gelenkt wird.

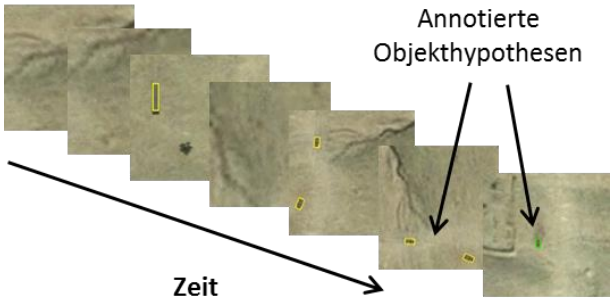


Abbildung 3.5: Automationsgrad „*Video Assisted*“: Mit Objektumrandungen annotiertes Echtzeitvideo.

Dabei wird ein kamerastabilisiertes Echtzeitvideo, in welchem die visuelle Aufmerksamkeit durch aktive Aufmerksamkeitslenkung (Objektumrandung in Abbildung 3.6) gelenkt wird, ins Cockpit übertragen. Bereits hier können während des laufenden Videostreams über eine Eingabeleiste Identifizierungseingaben getätigt werden, welche positionsgetreu in der Karte vermerkt werden.

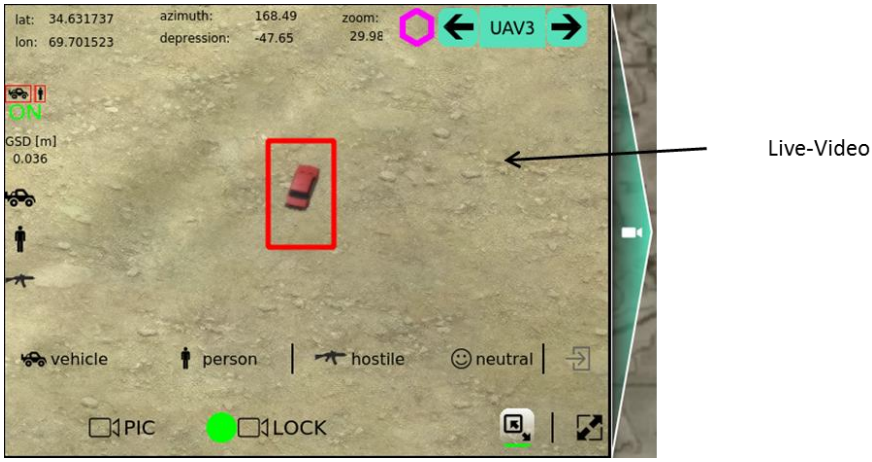


Abbildung 3.6: Automationsgrad „*Video Assisted*“: Detailansicht des annotierten Echtzeitvideo-Streams. Das mittig zentrierte Objekt kann durch eine Eingabeleiste identifiziert werden.

Dieser Automationsgrad steht immer zur Verfügung, sobald der Operateur ein Videofenster öffnet, in welchem das Echtzeitvideobild angezeigt wird und der Sensor durch Tippgesten manuell geführt werden kann. Dabei wird die Kamera auf die angetippte Bildkoordinate ausgerichtet und stabilisiert, wodurch diese ins Zentrum rückt. Zusätzlich kann der Sichtbereich der Kamera auch über die taktische Karte geografisch ausgerichtet werden. Die Führung des Sensors erfolgt dabei abgekoppelt von den Flugbewegungen des UAVs, was Operateuren ein breites und leicht anwendbares Spektrum an Einsatzvariationen bereitstellt, im Gegensatz zu einer starr montierten Kamera oder einem nicht-stabilisierten oder manuell zu steuernden Gimbalsystem.

Der Automationsgrad bewegt sich dabei auf dem niedrigsten Niveau, wie die Einstufung der Automationsfunktionen in das Automationsschema in Abbildung 3.7 durch die magentafarben markierten Hervorhebungen zeigt.

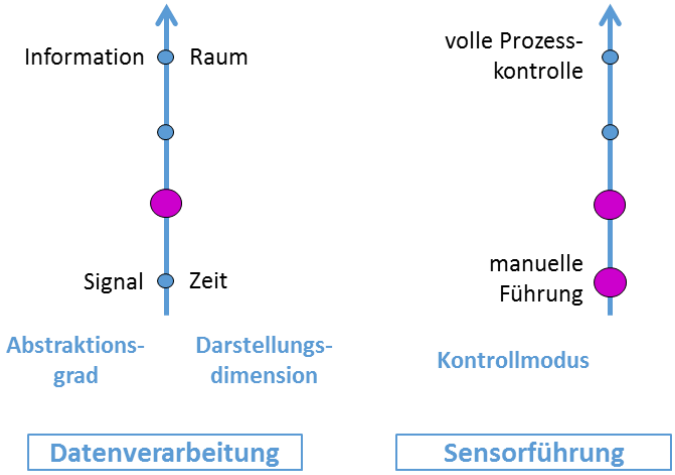


Abbildung 3.7: Einstufung der Automationsfunktionen im Modus „*Video Assisted*“ in das Automationsschema.

Bei der Anwendung dieses Automationsgrades übernimmt der Operateur den Führungsprozess der stabilisierten Kamera sowie des Sichtbereichs über die taktische Karte oder durch Interaktionen mittels Gesten im Kamerabild selbst. Der Bediener schließt dabei die Führungsschleife. Er wird durch die Annotation von Objekthypothesen im Echtzeitsensorbild unterstützt. Somit kann dieser Automationsgrad zur nutzerinitiierten, manuellen Suche von Bodenobjekten und für die Einsicht auf relevante Bodenkoordinaten, wie Landezonen, oder Objekte (*eyes-on-target*) genutzt werden.

3.5.2 Automationsgrad „Map-Assisted“

Im Automationsgrad *„Map Assisted“* des Experimentalsystems erzeugen Automationsfunktionen einen georeferenzierten Teppich aus aktuellen Bodenbildern, welcher in einer räumlichen Darstellung zur Anzeige gebracht wird (sichtbar in Abbildung 3.9).

In der nun räumlichen und zeitlich gebundenen Darstellung der Daten wird die Aufmerksamkeit durch visuelle Markierung auf potentiell detektierte Objekte gelenkt, die eine Bedrohung für den überfliegenden Hubschrauber darstellen könnten (Objekthypothesen). Die Darstellung dieser sogenannten *„Target Candidates“* erfolgt durch eine eigens entworfene Symbolik (Abbildung 3.8), welche eine leichte und schnelle Erfassung ermöglicht und nach den Gesichtspunkten der Kognitionspsychologie (Kapitel 2.7) entworfen wurde.

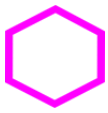


Abbildung 3.8: Symbol zur Darstellung von „*Target* Candidates“.

Das entworfene Symbol zeichnet sich dabei durch eine hohe Salienz, eine deutlich ausgeprägte Abhebung zu bestehender Symbolik, eine sich abhebende und im Cockpit als Hinweisfarbe exklusiv genutzten Färbung sowie einer hohen visuellen Ergonomie aus.

Dabei wird für jeden dieser noch un-identifizierten *„Taget Candidates“* ein Standbild erzeugt und in einer Objektdatenbank gespeichert, welches dann durch Anklicken des Symbols auf der Karte abgerufen und angezeigt werden kann.

Das zugehörige Nutzerinterface bietet dem Operateur dabei die Möglichkeit, das Objekt dort direkt zu identifizieren (Abbildung 3.9, links).

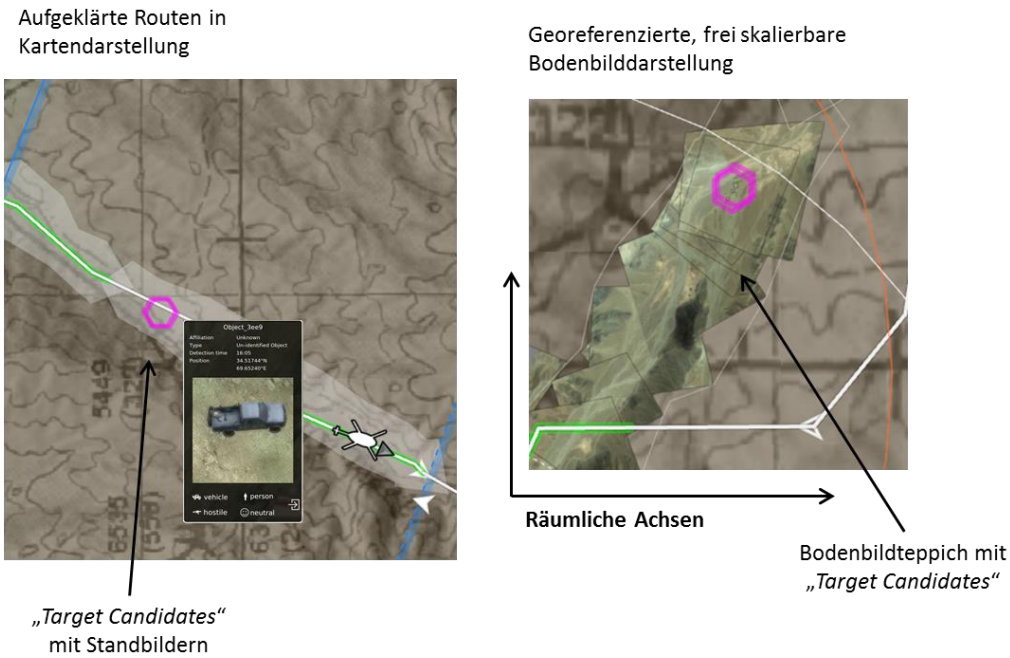


Abbildung 3.9: Automationsgrad „*Map Assisted*“: zeitlich aktueller Bodenbildteppich mit Objekthypothesen. Links: Karte im Übersichtsmodus, rechts detaillierter in vergrößerter Ansicht.

Im Gegensatz zu einer Listendarstellung der Funde können diese durch den Operateur jederzeit intuitiv geographischen Orten und dem Missionsverlauf zugeordnet werden. Der Entdeckungsort des Objekts wird dabei durch das Symbol zur Darstellung der *Target Candidates* gespeichert und auf der Taktischen Karte verfügbar gemacht (Abbildung 3.9 rechts und Abbildung 3.10, stark vergrößert).

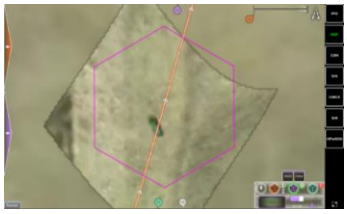


Abbildung 3.10: Zoombarer Kartenausschnitt mit Markierung des Entdeckungsortes des Objekts durch Symbolik, stark vergrößerte Ansicht.

Die Führung des Erfassungsbereichs der Kamera sowie die Vergrößerungsstufe der Zoomoptik erfolgt dabei automatisiert, wodurch ein annähernd gleich breiter und optisch gleichbleibend aufgelöster Bildteppich gewährleistet wird. Dadurch wird ebenfalls sichergestellt, dass automatisierte Systeme zur Datenverarbeitung mit Daten annähernd konstanter Bodenauflösung versorgt werden, was deren Funktionsprinzip zugutekommt.

Die abgetasteten, aufgeklärten Bereiche werden auf der taktischen Karte durch eine graue Schattierung visualisiert (Abbildung 3.9, links), sie zeigen abstrakt die aufgeklärten Bereiche an, über denen der Helikopter entlang fliegen soll. Die Einteilung in zusammenhängende Flächen erfolgt dabei jeweils für eine Minute. Sind mehr als 15 Minuten zwischen aktuellen und Aufklärungszeitpunkt vergangen, werden diese wieder sektionsweise entfernt, was die Übersicht im Interface erhöht und den erneuten Überflug abgesuchter, nicht mehr aktuell aufgeklärter Flächen durch die Crew vermeidet. Dadurch wird der Falscheindruck vermieden, aktuell als sicher aufgeklärte Flächen zu überfliegen. Ebenso werden so neue Impulse gesetzt, den Aufklärungsvorgang erneut zu initiieren und somit aktuellere Aufklärungsdaten zu erhalten. Zusätzlich erfolgte eine farbliche Visualisierung des Bedrohungsstatus der Route (grün = objektfrei, rot=bedroht und weiß = unbekannt), wie in (Abbildung 3.9, links) zu sehen.

In höheren Vergrößerungsstufen der Kartendarstellungen wird von der abstrakten grauen Darstellung der abgesuchten Fläche auf eine Bodenbildkarte umgeschaltet, die das System während des Überflugs erzeugt (Abbildung 3.11).

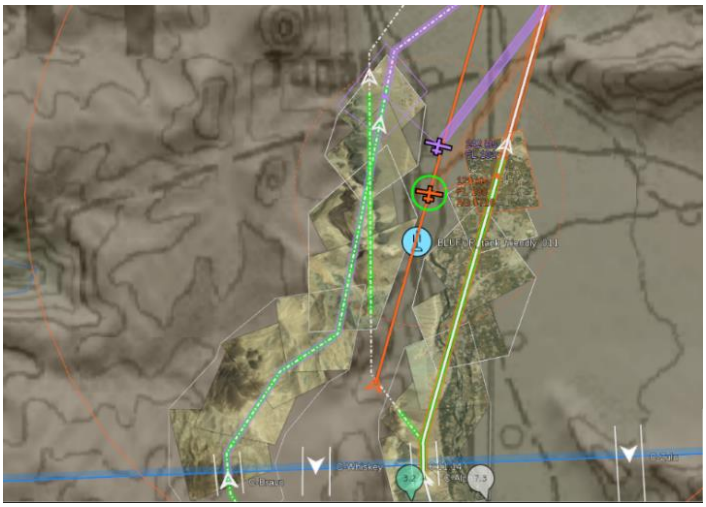


Abbildung 3.11: Kartendarstellung mit texturierter Bodenkarte in höheren Vergrößerungsstufen.

In diesem Automationsgrad erfolgt die Entlastung des Operateurs durch die zeitliche Entzerrung (Konservierung) sowie die simultane Repräsentation der Aufklärungsdaten eines einzelnen und mehrere UAVs. Im Gegensatz zu reinen Aufzeichnungen der Videodaten der einzelnen UAVs können die auf inhaltliche Redundanzen gefilterte Daten vom Operateur nun auch parallel und in sehr kurzer Betrachtungszeit wahrgenommen oder bei Bedarf verifiziert werden.

Der Automationsgrad bewegt sich dabei auf dem mittleren Level, wie die Einordnung der Automationsfunktionen in das Automationsschema in Abbildung 3.12 zeigt.

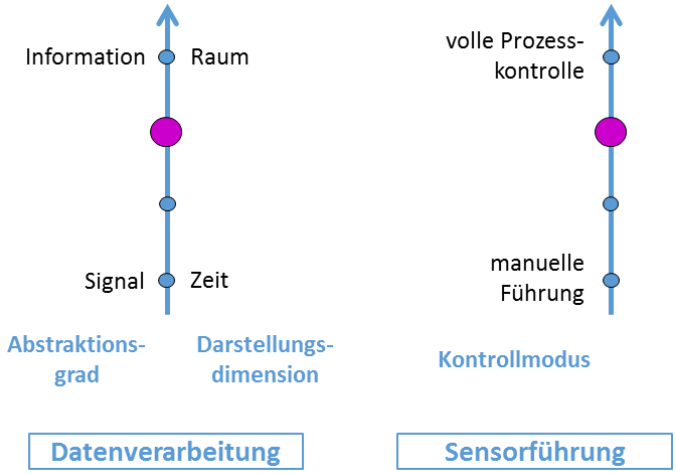


Abbildung 3.12: Einstufung der Automationsfunktionen im Modus „*Map Assisted*“ in das Automationsschema.

Bei der Anwendung dieses Automationsgrades im Experimentalsystem übernehmen Automationsfunktionen den Führungsprozess der Kamera sowie des Sichtbereichs, ebenso erfolgt die Analyse der Bilder mittels rechnerbasierter Auswertung. Der Nutzer wird nur dann involviert, wenn *Target Candidates* auftauchen.

Zur Abfrage der Identifizierung durch den Operateur steht eine Identifizierungshilfe bereit, über die der Operateur seine Identifikationsentscheidung ins System eingeben kann. Diese Entscheidung erfolgt anhand des bereitgestellten Standbildes des Objekts. Abbildung 3.13 zeigt das bereitgestellte Eingabewerkzeug zur Vervollständigung der Perzeptionskette (Einbringen der Identifizierungsleistung) durch den Operateur.

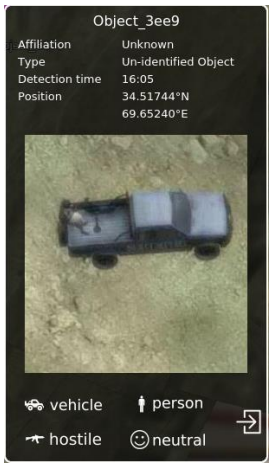


Abbildung 3.13: Identifizierungshilfe mit Interaktionselementen.

Dieses besteht aus visuellen Interaktionselementen (Ein Aufklärungsbild sowie Metainformationen wie den Erkennungsstatus durch die Automation, der Erkennungszeit, der Objektposition) sowie haptischen Interaktionselementen für den Eintrag menschlicher kognitiver Leistung zur Vervollständigung der Aufklärungsaufgabe.

Das Standbild als zeitlich abstrakteste Darstellung wurde gewählt, um Operateuren eine möglichst einfache Datenrepräsentation bereitzustellen, die im Gegensatz zu Videodaten nebenläufig besser und unkompliziert betrachtet und erfasst werden kann. Für tiefere, genauere Inspektionen kann der Operateur den Automationsgrad durch eine manuelle Führung des Sensors kurzzeitig übersteuern und das Objekt durch die Sensorsysteme betrachten.

3.5.3 Automationsgrad „Tactical Assisted“

Der höchste Automationsgrad des Experimentalsystems *„Tactical Assisted“* stellt maschinell identifizierte Aufklärungsergebnisse in der taktischen Karte des *MFD*s mittels Symbolik der *„Taktischen Zeichen“* [U.S. Department of Defense, 2008] abstrakt dar (Abbildung 3.14). Diese militärisch eingängige Darstellung ermöglicht Luftfahrzeugführern und Operateuren eine besonders schnelle Wahrnehmung und Reaktion auf neue Aufklärungsergebnisse. Zur Absicherung des Bedieners kann dieser sich optional ein aus den Rohdaten extrahiertes Standbild des Objekts anzeigen lassen.

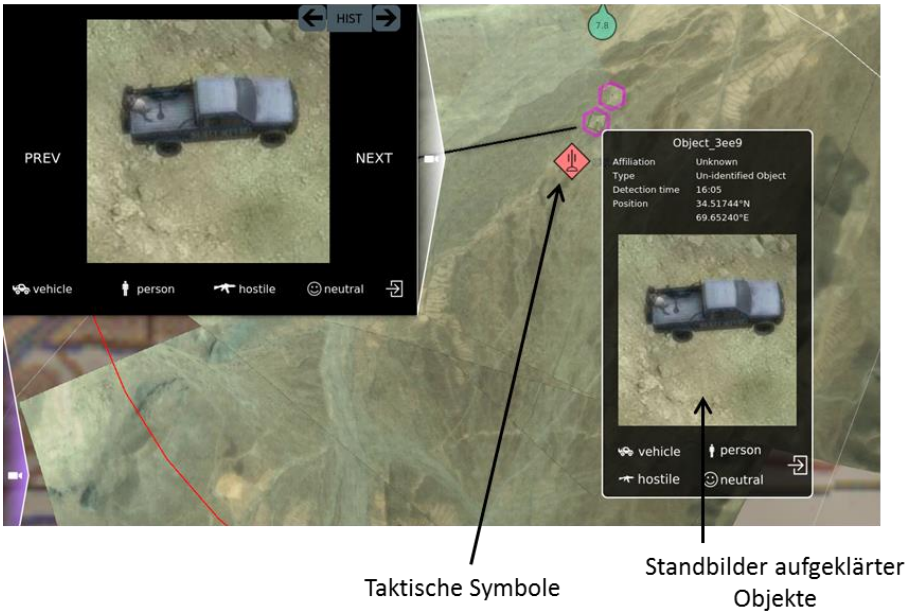


Abbildung 3.14: Automationsgrad „*Tactical Assisted*“: Darstellung von Informationen auf taktischer Ebene mittels symbolischer Kodierung und Rohdatenausschnitt.

Dieser Automationsgrad bietet eine abstrakte, symbolische Objektrepräsentation. Der Signalraum des Operateurs wird stark verringert, und die Aufklärungsdaten werden simultan repräsentiert.

Der Automationsgrad bewegt sich auf dem höchsten Level, wie die Einordnung der Automationsfunktionen in das Automationsschema in Abbildung 3.15 zeigt.

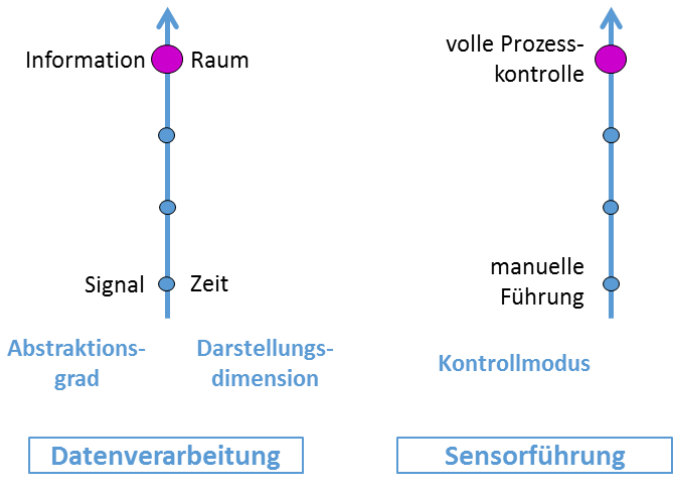


Abbildung 3.15: Einstufung der Funktionen im Modus „*Tactical Assisted*“ in das Automationsschema.

Bei der Anwendung dieses Automationsgrades übernehmen Automationsfunktionen den Führungsprozess der Kamera sowie des Sichtbereichs, ebenso erfolgt die Analyse der Bilder mittels rechnerbasierter Datenauswertung. Dieser Automationsgrad erfordert als sogenannte Vollautomation kein explizites Involvieren des Benutzers in die Perzeptionskette mehr, und setzt eine hohe Konfidenz aller maschinell ausgeführten Prozesse voraus.

3.6 Wirkungsprinzip der Automationsgrade

Die Repräsentationsformen der bereitgestellten Informationen, welche in Kapitel 3.5 dargestellt wurden, beeinflussen dabei beim Betrachter konkret:

- Die Aufmerksamkeit: Sie wird bedarfsgerecht auf potentiell relevante Informationen in der Datenmenge gelenkt (annotierte Objekte in Video und Bodenbildkarte, taktische Symbole).
- Das Arbeitsgedächtnis: Es wird durch Komplexitätsreduktion der Symbole und weniger notwendiger Prozesse der Symbolbildung sowie des Managements derer entlastet, indem abstrahierte und simultane Darstellungsformen (Karte, Zeichen, Standbilder) Anwendung finden.

Die abstraktere Darstellung von Informationen zielt auf eine einfachere Wahrnehmung ab. Indem multiple Daten konserviert, zeitlich entzerrt und kompakt aufbereitet als informationstragende Komplexe präsentiert werden, fällt dem Operateur die Wahrnehmung relevanter Objekte leichter.

Für diesen Vorschlag variabler Automation sowie die vorgestellten Aufklärungsprodukte nehmen dabei mit steigendem Automationsgrad die Anforderung an den Bediener, die Tätigkeitsdichte sowie Auslastung von Ressourcen und Kanälen (*mentale Beanspruchung*) ab, was in Kapitel 4.2.1 und [Ruf & Stuetz, 2017] für diese Automationsgrade experimentell belegt werden konnte.

Mit steigendem Automationsgrad wird jedoch ein gegenläufiger Zuverlässigkeitsgrad der Automation angenommen, da die Extraktion von Ergebnissen auf symbolischer Ebene eine deutlich höhere Komplexität des Datenverarbeitungsalgorithmus mit sich bringt. Zudem fehlt der Maschine die Generalisierungsfähigkeit was bedeutet, dass diese maschinelle Fähigkeit ein schmales, beengtes funktionelles Fenster aufweist und nur vereinzelt erfolgreich durchgeführt werden kann.

Es wird angenommen, dass sich der höchste Automationsgrad in allgemeinen, unstrukturierten Umgebungen nur auf einen Bruchteil der Bedarfsfälle anwenden lässt und in der überwiegenden Anzahl die Imperfektion der Aufklärungsautomation den Zuverlässigkeitsgrad der Ergebnisse verschlechtert. Ein degradierter Zuverlässigkeitsgrad der Automation würde jedoch die

Aufklärungsleistung mit deren Rolle als alleiniger Akteur der Durch- und Ausführung vermindern; in solchen Fällen kann die Aufklärungsleistung jedoch durch die gezielte Involvierung des Menschen als Teil des Mensch-Maschine-Teams aufrechterhalten werden. Dabei wird gezielt kognitive Leistung des Operateurs angefragt, welche die maschinellen Anteile nicht zu leisten im Stande sind. In diesem Sinne wird aktiv das Kooperationsverhältnis zwischen dem Operateur und der Maschine gezielt adaptiert.

Um eine situationsangepasste Charakteristik des Systems an den Zuverlässigkeitsgrad der Aufklärungsautomation zu erzielen, wurde im vorliegenden Falle eine *adaptive* Auslegung des Automationssystems mit systemseitiger Adaption (anhand der *Trustworthiness* als Kriterium) realisiert.

Das System enthält jedoch ebenso *adaptierbare* Elemente, welche es dem Benutzer ermöglichen, das System im eigenen Sinn der situativen Anwendung einzusetzen. Die Systemadaptierbarkeit sowie die Adaptivität werden durch die in Kapitel 3.5 vorgestellten Automationsgrade realisiert.

3.7 Adaptierbarkeit durch funktionale Ebenen

Die variablen Automationsgrade ermöglichen die Verwendung der Fähigkeiten auf drei funktionalen Ebenen. Dabei werden die verfügbaren Ressourcen (UAV, Kamerasystem, Gimbal, Perzeptionsketten) auf unterschiedliche Weise von der Maschine oder dem Menschen allokiert.

Tabelle 5 zeigt dabei die funktionalen Ebenen, auf denen der Nutzer mit den bereitgestellten Funktionen interagiert.

Dabei erfolgt der Wechsel zwischen den funktionalen Ebenen und damit den Automationsgraden durch eine explizite Interaktion (gezielter Funktionsaufruf) durch den Benutzer.

Funktionale Ebene	Automationsgrade	Modus / Typ	Funktion	Beschreibung	Ressourcen	Hoheit
automatisiert	*Map Assisted* *Tactical Assisted*	**adpativ** Supervisory Control (Funktionalität)	*„Recon“*	Automatische Aufklärung ganzer Flugpfade oder Punkte durch Maschine	UAV, Kamera, Gimbal, Perzeptionsketten	Mensch und Maschine
teilautomatisiert	*Map Assisted* *Tactical Assisted*	**adaptierbar** / **adaptiv** Steuerung / Supervisory Control (Routine)	*„Gimbal Scan“*	Aufklärung von frei wählbaren Strecken durch Maschine	Kamera, Gimbal, Perzeptionsketten	Mensch
manuell	*Video Assisted*	**adaptierbar** Steuerung	*„GeoLock“*	Kamerastabilisierung auf frei wählbare Bodenkoordinate oder Objektnachführung mit Echtzeit-Sensorbildübertragung	Kamera, Gimbal, Perzeptionsketten	Mensch

Tabelle 5: Funktionale Ebenen und variable Automationsgrade.

Während der automatisierten Ausführung der Aufklärung durch die Maschine (**automatisierte funktionale Ebene**) stehen Maschine und der Nutzer in einem überwachenden Verhältnis (*Supervisory Control*) (Kapitel 2.2.2.2.2). Dabei überwacht der Nutzer die eigenständig laufende Automation, indem er sich ein Bild der höchsten Prozessebene (Funktionalität) aufbaut. Die Maschine meldet dabei Ergebnisse und erwartet gegebenenfalls weitere Nutzereingaben. Falls nötig, besteht die Möglichkeit für den Nutzer, auf die Maschine einzuwirken, um die Ausführungsweise oder das Arbeitsziel zu modifizieren. Die Maschine involviert dabei eigenständig alle technischen Ressourcen (das UAV, die Kamera, den Gimbal sowie die Perzeptionsketten) und behält die Hoheit über diese, solange der Nutzer diese nicht durch einen gezielten *manuellen Eingriff* an sich zieht und nach der Benutzung wieder freigibt. Auf dieser funktionalen Ebene sorgt die *Adaptivität* des Systems für eine Anpassung an die Automationsverlässlichkeit und stellt Produkte der

Automationsgrade *„Map Assisted“* (mit *Target Candidates*) (siehe Kapitel 3.5.2) und/ oder *„Tactical Assisted“* (siehe Kapitel 3.5.3) mit maschinell identifizierten Objekten bereit.

In der mittleren funktionalen Ebene (**teilautomatisiert**) greift der Benutzer direkt auf tieferliegende Automationsfunktionen zur eigenen, zielgerichteten Verwendung zu (*adaptierbare Komponente)*. Diese werden auf der automatisierten funktionalen Ebene von der Maschine selbst aufgerufen und verwendet, beispielsweise scannt die Funktion *„Gimbal Scan“* Strecken am Boden ab und klärt diese auf, während das UAV auf der automatisierten Ebene neben dem Suchbereich herfliegt und so eine aufgeklärte Strecke entsteht. Dabei erfolgt der explizite Aufruf der Funktion durch den Nutzer, mit denen er auf dem Ausführungslevel der Routine steuernd oder überwachend interagiert. Durch diese funktionale Ebene wird der Durchgriff auf tieferliegende Automationsfunktionen ermöglicht, um den teilautomatisierten Betrieb zielgerichtet einsetzen zu können. Dadurch wird es dem Benutzer ermöglicht, automatisiert eigens vorgegebene Strecken, wie beispielsweise Zugänge oder Straßen zum Operationsort, losgelöst von der automatisierten Routenaufklärung (beispielsweise von Helikopterflugrouten) auf eigene Initiative hin aufzuklären. Auf dieser funktionalen Ebene sorgt die *Adaptivität* des Systems ebenfalls für eine Anpassung an die Automationsverlässlichkeit mit den Produkten der Automationsgrade *„Map Assisted“* (mit *Target Candidates*) und/ oder *„Tactical Assisted.*

In der **manuellen** funktionalen Ebene greift der Benutzer direkt auf zu Grunde liegenden Ressourcen (Kamera, Gimbal, annotierte Bilddaten) zu. So steuert der Benutzer den Interessensfokus und Öffnungswinkel der Kamera selbst, indem er beliebige Bodenkoordinaten oder ein Kartenobjekt auswählt und den Sichtbereich der Kamera anpasst (*manuelle Eingriffe*). Die Maschine übernimmt hier die Kamerastabilisierung und gegebenenfalls -nachführung auf bewegte Bodenziele (*Tracking*) und stellt eine Auswertungshilfe gemäß des Automationsgrades *„Video Assisted“* bereit.

Eine *Adaptierbarkeit* des Systems wird durch die implizite und übersteuernde Wahl der funktionalen Ebene durch den Nutzer selbst erreicht, was im Folgenden als „*manuelle Eingriffe*“ bezeichnet wird. Dabei wird über die Auswahl einer bestimmten Funktion aus Tabelle 5 durch den Benutzer eine entsprechende funktionale Ebene angewendet, für die jeweils eine Allokationshoheit herrscht. Dies können zum einen die Maschine selbst oder der Mensch sein. Systemseitig wurde ein Mechanismus zur permanenten Aufrechthaltung der Nutzerhoheit in den funktionalen Ebenen und bei deren Verschachtelung durch den Nutzer umgesetzt und implementiert. Dieser Fall tritt beispielsweise auf, wenn ein laufender Aufklärungsauftrag des UAVs auf der automatisierten funktionalen Ebene durch eine manuelle Führung des Sensors durch den Operateur unterbrochen wird. Dabei wird sichergestellt, dass der Mensch die Autorität über folgende Kriterien (bis zur Freigabe) behält:

- Aufgabenhoheit: volle Kontrollierbarkeit auf Task-Ebene der UAVs
- Prozesshoheit: volle Kontrollierbarkeit von Prozessen (ermöglicht nutzergetriebenen Einsatz von Subfunktionen)
- Ressourcenhoheit: vollständige Nutzbarkeit der Ressourcen zur eigenen Verwendung

Dies ermöglicht es Operateuren, die Fähigkeiten bzw. Funktionen des Systems situativ und zielgerichtet aufzurufen und so das System an eigene situative Bedürfnisse anpassen zu können, auch während des laufenden Betriebs auf einer anderen, höheren funktionalen Ebene.

3.8 Systeminitiierte Adaptivität

Neben der oben beschriebenen Eigenschaft der *Adaptierbarkeit*, bei dem der Nutzer die niedrigen Systemebenen bewusst verwenden kann, weist das System auf den beiden oberen funktionalen Ebenen eine systeminitiierte *adaptive* Komponente auf.

Damit wird eine proaktive Adaptivität zur systemseitigen Manipulation des kooperativen Mensch-Maschine-Verhältnisses realisiert.

In Kapitel 2.4.3 wurde die *Emergency Logic* aus den *Critical-Event Strategies* ausgewählt, bei welcher eine Änderung durch das Auftreten eines kritischen Ereignisses im Kontext erfolgt.

Beim Auftreten eines solchen kritischen Ereignisse wird ein Wechsel des Automationsgrades und eine damit verbundene Adaption des dynamischen Mensch-Maschine-Kooperationsverhältnisses mittels einer alternativen, für das Ergebnis des automatisierten Prozesses situativ günstigeren Funktionsallokation, durch das System selbst eingeleitet.

Der aktuelle Kontext der Verlässlichkeit der Automation ist hier durch die *Trustworthiness* der automatisierten Objekterkennung gegeben, welche als Trigger zur Neuabwägung des situativ besten Automationsgrades herangezogen wird.

Auf diesen extrinsischen Parameter (Einsatzumgebung der Automation, algorithmische Leistung) hat der Nutzer keinen direkten Einfluss, und um bei der Degradierung der Aufklärungsfähigkeit eine schlechte Aufklärungsleistung zu vermeiden, wird systeminitiiert auf einen niedrigeren Automationsgrad („*Map Assisted*“) umgeschaltet. Die Erfassung und Bearbeitung der dabei erzeugten *„Target Candidates“* obliegt dem Operateur. Dadurch soll dieser gezielt und situativ involviert werden, um die Perzeptionskette zu vervollständigen.

Nimmt die Aufklärungsfähigkeit durch günstigere Umgebungsbedingungen wieder zu, wird der Automationsgrad wieder angehoben („*Tactical Assisted*“), um den Nutzer zu entlasten. Die Ermittlung der Aufklärungsfähigkeit erfolgt dabei anhand der Verlässlichkeit der Glieder der Perzeptionskette.

Kapitel 4

Experimentelle Evaluierung im Simulator

In diesem Kapitel wird die Evaluierung der dargestellten Funktionalitäten aus Kapitel 3 beschrieben. Als Anwendungsumgebung für die Implementierung, Integration und experimentelle Bewertung des zuvor beschriebenen Automationssystems diente der Hubschraubersimulator des Instituts für Flugsysteme (IFS) der Universität der Bundeswehr München.

Die experimentelle Evaluierung erfolgte im Rahmen einer mehrwöchigen *Human-In-The-Loop*-Kampagne. In der Messkampagne führten vier Helikoptercrews mit militärischer Einsatzerfahrung simulierte militärische MUM-T-Transportmissionen in Konfliktregionen eigenständig durch, wobei durch die Vorabaufklärung Bedrohungen in Gestalt von Bodeneinheiten aufgespürt werden sollten. Dabei wurde das umgesetzte Experimentalsystem dem Kommandanten des Transporthubschraubers zur Vorabaufklärung der eigenen Flugrouten des Helikopters zur Seite gestellt und als zentraler Bestandteil der MUM-T - Anwendung intensiv eingesetzt.

Im Folgenden werden zunächst die vorgenommene Operationalisierung des Bewertungsvorhabens (Abschnitt 4.1), zuvor durchgeführte Vorabuntersuchungen (Kapitel 4.2), sowie die Versuchsumgebung (Kapitel 4.3), in welcher das Experiment stattfand, beschrieben. Anschließend folgt die Darstellung des Versuchskonzepts und der Versuchsabläufe (Kapitel 4.4) sowie eine Beschreibung der Probandengruppe (Kapitel 4.5). Abschließend werden noch auf den generellen Aufbau und Ablauf der Experimentalkampagne (Kapitel 4.6) sowie die erhobenen Daten (Kapitel 4.7) eingegangen.

4.1 Operationalisierung

Vor der Operationalisierung werden die eingangs formulierten Forschungsfragen nochmals aufgegriffen:

Frage 1):

> *„Welchen Einfluss auf die Leistungsfähigkeit des Gesamtsystems hat ein mit adaptiver Automation ausgestattetes Mensch-Maschine-System zur sensorischen Aufklärung?“*

Frage 2):

> *„Wie prägen sich das Vertrauen und die Akzeptanz der Operateure bei der Interaktion mit einem adaptiv automatisierten Mensch-Maschine-System aus und wie lässt sich dieses Vertrauen quantifizieren?“*

Frage 3):

> *„Welche Beanspruchung in Form von Anstrengung, Konzentration und Aufmerksamkeit erfahren Operateure bei der Aufgabendurchführung in einem adaptiven Mensch-Maschine-System zur sensorischen Aufklärung?“*

Nachfolgend werden zur anstehenden experimentellen Evaluierung Variablen für die jeweiligen Forschungsfragen definiert und tabellarisch dargestellt. Die Zusammenhänge der Variablen werden zugehörig für jede der Forschungsfragen grafisch aufgezeigt.

Forschungsfrage 1 formuliert den Zusammenhang zwischen der Zuverlässigkeit der automatisierten Objekterkennung sowie deren Auswirkung auf die Leistungsfähigkeit des Gesamtsystems mit dem Hintergrund des Einsatzes der Variablen Automation zur Kompensation negativer Auswirkungen.

Tabelle 6 zeigt die Variablendefinition für Forschungsfrage 1).

Art der Variable [59]	**Erklärung**
UV	**Zuverlässigkeit** der automatisierten Objekterkennung.
IV	**Automationsgrad,** welcher eine Belastung mit spezifischen Anforderungen an den Operateur stellt.
AV	**Aufklärungsleistung** (Anzahl vollständig klassifizierter Objekte) des Mensch-Maschine-Teams.

Tabelle 6: Definition der Variablen zu Forschungsfrage 1).

Das zugehörige Pfaddiagramm wird in Abbildung 4.1 dargestellt und zeigt den Zusammenhang der Variablen UV, IV1 und AV1.

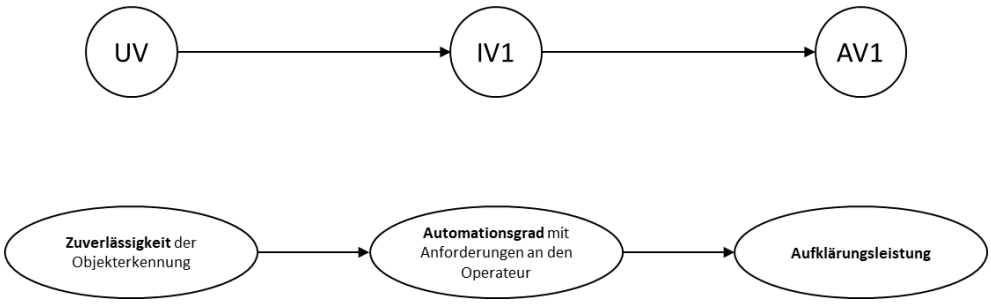


Abbildung 4.1: Pfaddiagramm der Variablen zu Forschungsfrage 1).

Die Zuverlässigkeit der Objekterkennung bedingt dabei den Automationsgrad, welcher wiederum die gesamten Aufklärungsleistung des Mensch-Maschine-Teams beeinflusst. Dabei werden nur

[59] Nach [Eid, Gollwitzer, & Schmitt, 2010] bezeichnen: UV eine *Unabhängige Variable* (Ursache oder Faktor), AV eine *Abhängige Variable* (Kriterium), IV eine *Intervenierende Variable* (Mediator – Ursache und Wirkung) sowie MV eine *Moderatorvariable* (Lenker).

Objekte als aufgeklärt gewertet, welche bei einer Involvierungsanfrage des Systems durch den Operateur klassifiziert wurden.

Forschungsfrage 2 adressiert das Vertrauen, welches Operateure im Umgang mit dem variablen System und insbesondere in die Darstellungsmodalitäten ausprägen, wenn diese zur Kompensation von Unsicherheit Anwendung finden. Dabei beeinflusst die Güte des mentalen Modells des Systems bei den Operateuren deren Vertrauen. Dieser Einfluss wurde jedoch im Vorfeld durch Schulungen minimiert und zwischen den Probanden angeglichen, so er als ähnlich über alle Probanden angenommen werden kann.

Die Definition der Variablen zu Forschungsfrage 2) wird in Tabelle 7 aufgelistet.

Art der Variable	**Erklärung**
UV	**Zuverlässigkeit** der automatisierten Objekterkennung.
IV	Automationsgrad mit spezifischer **Repräsentationsform (**Darstellungsmodalität) der Aufklärungsdaten.
AV	**Ausgeprägtes Vertrauen** des Operateurs in die Darstellungsmodalitäten und Systemfunktionen.
MV	Mentales Modell der Fähigkeiten des Automationssystems beim Operateur. (Im Rahmen dieser Arbeit nur elementar untersucht).

Tabelle 7: Definition der Variablen zu Forschungsfrage 2).

Abbildung 4.1 zeigt das zugehörige Pfaddiagramm der Variablen UV, IV2, AV2, MV2 zu Forschungsfrage 2).

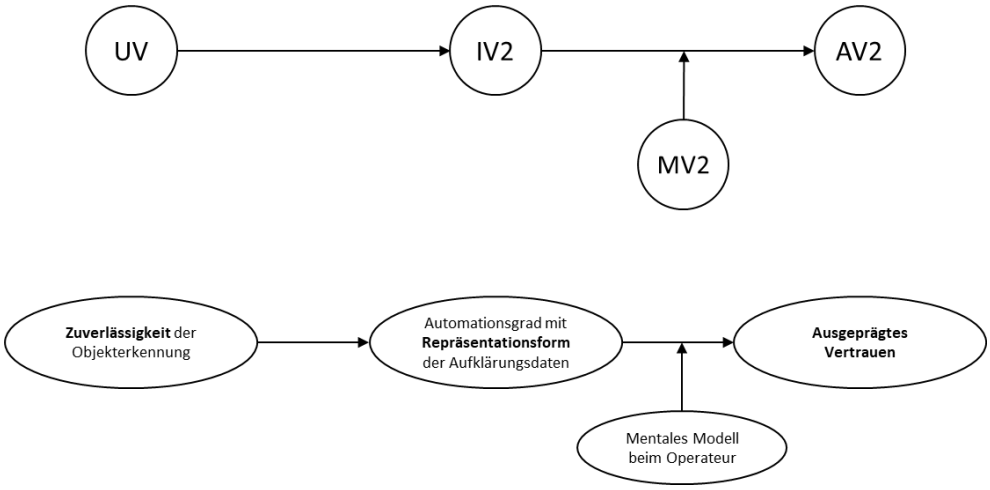


Abbildung 4.2: Pfaddiagramm der Variablen zu Forschungsfrage 2).

Die intervenierende Variable IV2 repräsentiert in diesem Zusammenhang den Automationsgrad (*VideoAssisted*, *MapAssisted*, *TacticalAssisted*) sowie dessen visuelle Repräsentationsform der Aufklärungsdaten. Das ausgeprägte Vertrauen der Operateure als AV2 kann dabei durch die MV2, der Güte des Mentalen Modells des Automationssystems sowie dessen Fähigkeiten, gelenkt sein. Dieses wird jedoch im Rahmen dieser Arbeit nur dahingehend untersucht, ob elementare

Voraussetzungen (wie beispielsweise die Wahrnehmung eines anstehenden Handlungsbedarfs) während des Experiments erfüllt werden.

Forschungsfrage 3 formuliert das Untersuchungsziel der Ermittlung der Beanspruchung der Probanden durch die Aufgaben, welche die Automationsgrade an diese stellen. Der Umfang und die Art der Aufgaben (Belastung) hängt wiederum von der Zuverlässigkeit der Objekterkennung ab. Die erfahrene Beanspruchung wird zusätzlich durch die individuellen Befähigungen der Probanden beeinflusst, in dynamischen Aufgabensituationen organisiert, koordiniert und effizient zu agieren.

Tabelle 8 zeigt die zur Forschungsfrage 3) zugehörigen Variablendefinitionen.

Art der Variable	**Erklärung**
UV	**Zuverlässigkeit** der automatisierten Objekterkennung.
IV	**Belastung** durch anfallende Dichte an Tätigkeiten beim Operateur.
AV	Durch die Tätigkeiten induzierte **Beanspruchung** des Operateurs, welche Aufwendung von Ressourcen erfordert.
MV	Individuelle Befähigungen des Operateurs (vertiefend nicht weiter betrachtet, z.B. Multitasking-Fähigkeit, Grad des Situationsbewusstseins, Güte des Mentalen Modells).

Tabelle 8: Definition der Variablen zu Forschungsfrage 3).

Das zur Forschungsfrage 3) zugehörige Pfaddiagramm mit den Variablen UV, IV3, AV3, MV3 wird in Abbildung 4.3 dargestellt.

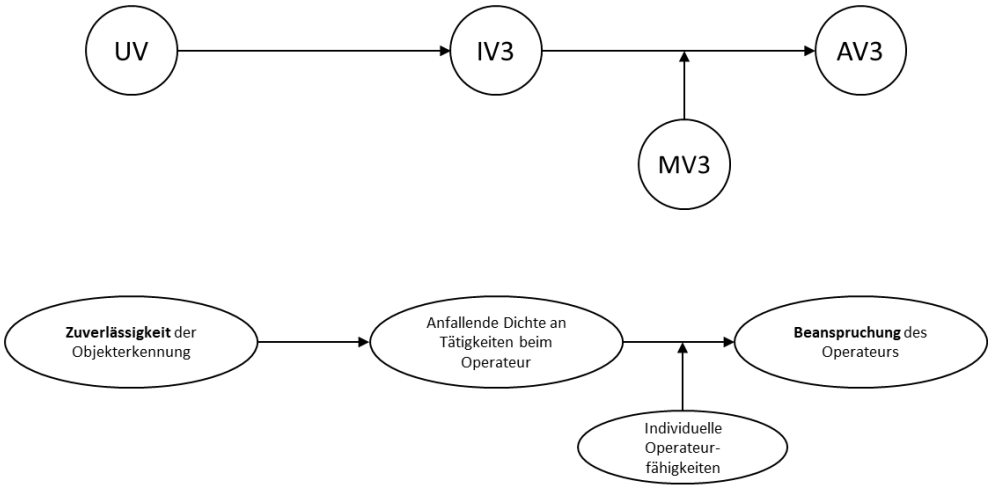


Abbildung 4.3: Pfaddiagramm der Variablen zu Forschungsfrage 3).

Zur Operationalisierung der Variablen müssen folgende Zusammenhänge und Kennzahlen erhoben werden:

- **Variabel-automatisierte Aufklärungsleistung** anhand von Kennzahlen (Auszählung der Objekte, Größe der aufgeklärten Flächen) sowie der **Leistung des MUM-T- Verbandes** (durch Vorwarnzeiten, Annäherungsdistanzen, Anteiliger Flug des HC über/ neben abgesuchtem Gebiet, erzielte Aufklärungsleistung, erzielter Überschuss an Aufklärungsfläche).
- **Ausgeprägtes Vertrauen** der Operateure in Abhängigkeit des angewendeten Automationsgrades bzw. Vorverarbeitungsgrad der Sensorrohdaten.
- **Rekonstruierte Belastung des Kommandanten durch Aufklärungstätigkeiten** (Aufgabendichte, Reaktions- und Bearbeitungszeiten von Ergebnissen) sowie **die erfahrende Beanspruchung** der Operateure während der Aufgabendurchführung.

Die Erhebung der Daten erfolgt dabei durch objektive Messungen während simulierter Messflüge in der Experimentalumgebung. Für die Ermittlung des ausgeprägten Vertrauens sowie der erfahrenden Beanspruchung werden subjektive Einschätzung der Probanden mittels Fragebögen eingeholt.

Während der simulierten Messflüge wird das Verhalten der Kommandanten beim Umgang und der Interaktion mit den variablen Automationsgraden gezielt beobachtet, aufgezeichnet und später detailliert analysiert. Dieses wird in Relation zum Betrieb, dem Betriebsmodus, der Repräsentationsweise der Aufklärungsergebnisse und der erbrachten Leistung der variablen Automationsgrade gesetzt.

Das variable System wird dabei durch die künstliche Variation der UV (*Trustworthiness*) als Zuverlässigkeit der automatisierten Objekterkennung stimuliert, die verwendete Methodik wird in Kapitel 4.4.3 aufgezeigt.

4.2 Vorabuntersuchungen zur Konzeptbestätigung

Als Beleg des vorgeschlagenen Wirkungsprinzips zur Verminderung der Beanspruchung des Operateurs sowie der Notwendigkeit der Automationsgrade hinsichtlich der Verlässlichkeit eines Aufklärungsprozesses erfolgten zwei kleinere Studien als Vorabuntersuchungen.

Die Zielsetzungen dabei waren dabei die Nachweise der:

- Notwendigkeit eines menschlichen Entscheiders im Aufklärungsprozess.
- Tauglichkeit der erarbeiteten Automationsgrade zur Reduktion der Beanspruchung des Operateurs.

4.2.1 Notwendigkeit eines menschlichen Entscheiders

Zur exemplarischen Bestätigung und Überprüfung der getroffenen Annahmen der Imperfektion von Verfahren zur automatisierten Detektion von Objekten in Luftbildern sowie der Fähigkeit solcher Verfahren zur Objekterkennung und -identifikation wurde eines der in Kapitel 2.1.2 aufgezählten Verfahren in [Wiegel, 2017] als *Proof-of-Concept* implementiert und evaluiert.

Dafür wurde ein gradientenbasiertes[60] Verfahren herangezogen, welches mit maschinellem Lernen verknüpft wird. Der gewählte Ansatz des *HoG*-Verfahrens [Dalal & Triggs, 2005] basiert darauf, objekttypische und objektspezifische Gradientenmuster zu extrahieren, welche als Deskriptoren potentieller Objekte in den Bildern dienen. Diese Muster werden dann mit einem Verfahren, welches objekttypische Muster angelernt bekommen hat, detektiert und nach einem groben Klassenschema

[60] *Gradienten* treten im Bild an Objektgrenzen und entlang Konturen als Kanten auf. Sie gelten als wesentlicher Informationsträger in Bilddaten und dienen einem Großteil der Verfahren und Methoden als Grundlage zur automatischen Bildauswertung.

eingeordnet. Dabei trennt eine hinterlegende *Support Vector Machine (SVM)* ([Dalal & Triggs, 2005], [Osuna, Freund, & Girosit, 1997]) anhand informationstragender Teile der Gradientenmuster potentielle Objekte im Bild vom Hintergrund, was durch eine angelernte Trennung des mehrdimensionalen Merkmalraums der Muster realisiert wird.

4.2.1.1 Vorgehen

Für die Objektdetektion wurden (zur künstlichen Einschränkung der Freiheitsgrade) vertikale Ansichten von Fahrzeugen (Orthofotos) verwendet, da diese in der Literatur bisher vornehmlich Betrachtung fanden (vgl. exemplarisch [Tuermer et al., 2013], [Hajehasani, 2017]). Die Erzeugung der Bilddaten (Abbildung 4.4) erfolgte mit der Simulationssoftware VBBS3[61], wobei aus diesen exemplarisch zwei unähnliche, und gut unterscheidbare Grundklassen (Pickup und Panzer)[62] ausgewählt wurden.

Abbildung 4.4: Bodenobjekte (Fahrzeuge) in Orthofotos, exemplarisch dargestellt: Panzer, Pickup, PKWs. Bilddaten erzeugt in und mit der Simulationsumgebung VBS3.

Abbildung 4.5 (links) zeigt beispielhaft je ein anzulernendes Objekt aus den beiden Objektklassen Pickup und Panzer unter Berücksichtigung und expliziten Anlernens des Freiheitsgrads der Rotation, welcher von der genutzten Implementierung des Verfahrens nicht gehandhabt werden konnte.

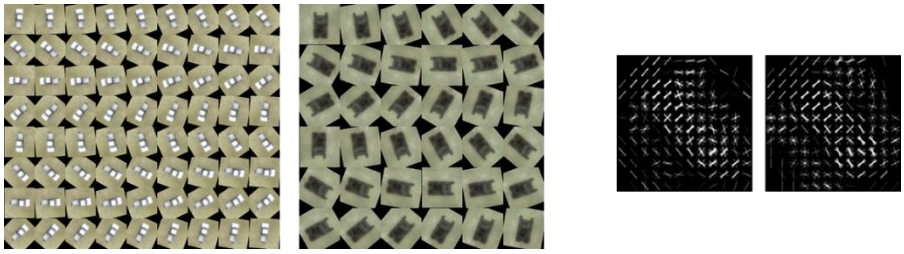


Abbildung 4.5: links: Bilder aus den Objektklassen Pickup und Panzer, jeweils mit abgestufter rotierter Darstellung; rechts: Anschauungsbeispiel eines Gradientenmusters des *HoG*-Verfahrens (einzelne Rotationsstufe).

Ebenso sind in Abbildung 4.5 (rechts) die Gradientenmuster des *HoG*-Deskriptors schematisch abgebildet, welche in neuen, unbekannten Bilddaten aufgefunden werden. Anhand solcher Muster lernt das Verfahren Merkmale, welche für die Objektklasse typisch sind und mit welchen das Objekt detektiert und gegebenenfalls identifiziert werden kann.

Für die beiden betrachteten Objektklassen Panzer und Pickup wurden zur Anwendung im Verfahren zwei Detektoren (*SVMs*) angelernt. Das Trainingsdatenset umfasste dabei 21 Objekte für die den Detektor 1 (Pickup) und 26 Objekte für den Detektor 2 (Panzer).

[61] Eine detaillierte Beschreibung erfolgt in Kapitel 4.3.

[62] Klasse 1: Pickup (7 verschiedene Objekte innerhalb Klasse, 28 Bilder gesamt), Klasse 2: Panzer (18 verschiedene Objekte innerhalb Klasse, 33 Bilder gesamt)

Anhand getrennter, elementfremder Datensets für das Training und für Tests des Verfahrens wurde dessen Erkennungsvermögen ermittelt. Der Testbilddatenumfang beträgt für die Objektklassen Pickup und Panzer je 7 Bilder.

Bei der automatisierten Auswertung unbekannter Bilder (Testdaten) durch das Verfahren erfolgte die Anwendung von

- Detektor 1 und Detektor 2 auf die jeweiligen Testdatensets (Datenset 1 und Datenset 2).
- Detektor 1 und Detektor 2 auf die elementfremden Testdatensets (Datenset 2 und Datenset 1).

Dadurch wurden jeweils die Single-Class – Detektionsfähigkeit (für die Detektion klassengleicher Objekte) als auch die Multi-Class- Detektionsfähigkeit (das Ansprechen auf klassenfremde Elemente) durchgeführt. Durch letzteres kann insbesondere das Ansprechverhalten des Verfahrens auf klassenfremde Objekte speziell evaluiert werden, was einer (der reinen Detektion) nachgeschalteten Identifikation (Klassifikation in binärem Klassenschema) entspricht.

4.2.1.2 Ergebnisse

Die Auswertung ergab die folgenden Trefferquoten für die Detektion und Identifikation auf und zwischen den beiden Klassen (Abbildung 4.6).

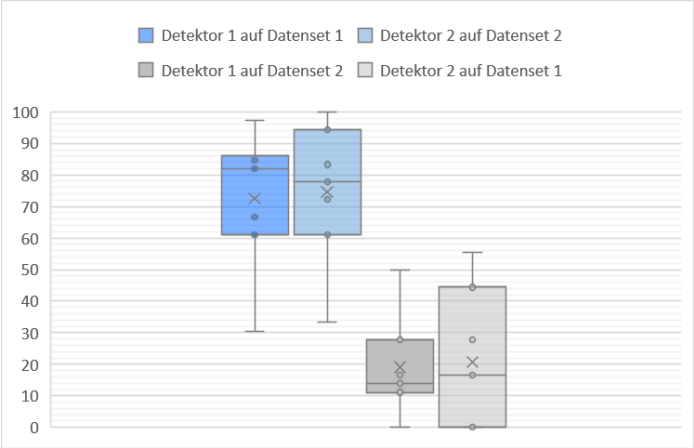


Abbildung 4.6: Trefferquoten der Detektoren 1 und 2 auf eigenen Testdatensets (blau gefärbt) sowie klassenfremdem Testdaten (grau gefärbt).

Dabei erzielten auf den eigenen Testdatensets der Detektor 1 eine maximale Trefferquote von 97,2 % (gemittelt 72,62 %, minimal 30,56 %) und der Detektor 2 eine maximale Trefferquote von 100,0 % (gemittelt 74,6 %, minimal 33,32 %), wie in Abbildung 4.6, blau dargestellt. Bei der Anwendung auf dem fremden Datenset konnte gezeigt werden, dass dieselben Detektoren auch auf klassenfremde Objekte ansprechen. Dabei erzielten der Detektor 1 auf dem Datenset 2 eine maximale Ansprechquote (Fehlerquote) von 50,0 % (gemittelt 19,05 %, minimal 0,0 %) und der Detektor 2 auf dem Datenset 1 eine maximale Ansprechquote (Fehlerquote) von 55,56 % (gemittelt 20,64 %, minimal 0,0 %) (Abbildung 4.6, grau dargestellt).

Mit der Voruntersuchung konnte ein Verfahren zur Detektion und dessen Identifizierungsfähigkeit von Objekten prinzipiell anhand des Beispiels der Detektion und Identifikation zweier Objektklassen in Orthofotos aus einer Simulationsumgebung demonstriert werden. Dabei konnte gezeigt werden, dass sich die potentielle Behaftung von Detektionsalgorithmen mit Fehlern prinzipiell in der Güte, also den Trefferraten der Objekte niederschlägt. Dabei waren beim angewandten Verfahren bereits inhärente Gründe für später äußerliche Imperfektion erkennbar, wie beispielsweise der Umfang des Lernprozesses, der Vorverarbeitungsgrad der Bilder (Filter und Filterstärken), die Objektauflösung und Abbildungsgüte oder die Diskretion von Winkeln bei der

Repräsentation rotierter Objekte im Rechner. In den Ergebnissen der gesamten Pilotstudie ist ersichtlich, dass die Güte für unterschiedliche Parameter der Bildvorverarbeitung, des Ansichtswinkels, des Umfangs und der Parametrisierung des maschinellen Lernprozesses bei dem gewählten Verfahren und den vorliegenden Testbedingungen variieren und keine konstante Güte erreichen [Wiegel, 2017]. Daher können die getroffenen Annahmen bezüglich der Existenz von Erkennungsverfahren sowie deren inhärenter Imperfektion und unterschiedlicher Zuverlässigkeit der Erkennung anhand der Evaluation als bestätigt angenommen werden.

Hinsichtlich der Klassifikationsfähigkeit von Algorithmen konnte beim angewendeten Verfahren bereits bei der binären Klassifikation (als primitive Identifikation betrachtet) eine signifikante Fehlerbehaftung beobachtet werden, welche mit nur mit einer relevanten Fehlerbehaftung zwischen den beiden Klassen unterscheiden kann. Bei den gewählten Klassen (Pickup und Panzer) kann die Auswirkung einer maschinellen, binären Entscheidung (Identifizierung) als nicht ausreichend eingestuft werden.

4.2.1.3 Gewonnene Erkenntnisse

Im Rahmen der Metastudien konnte eine Sinnhaftigkeit festgestellt werden, die Perzeptionskette in gewissen Situationen durch einen menschlichen Entscheider zu erweitern. Somit könnten die Zuverlässigkeit des gesamten Erkennungs- und Identifizierungsprozess erhöht und die Prozessgüte wiederhergestellt werden. Aus diesem Grund wurde das Konzept der Perzeptionskette um den menschlichen Entscheider erweitert (siehe Kapitel 3.1), der bei Degradierung der Aufklärungsfähigkeit und bei anfallenden Identifikationsprozessen durch die Anwendung eines niedrigen Automationsgrades in den Auswertungsprozess aktiv einbezogen wird.

4.2.2 Tauglichkeit zur Reduktion der Operateur-Beanspruchung

Wie in [Ruf & Stuetz, 2017] detailliert beschrieben, erfolgte zunächst eine Nachweisführung der Tauglichkeit der vorgestellten Automationsgrade zur Reduktion der Beanspruchung des Operateurs mittels eines eigenen *Human-In-the-Loop - Experiments*. Dabei galt es zu zeigen, dass sich die Anforderungen an Beanspruchung des Operateurs bei der Anwendung der vorgestellten Automationsgrade zum einen unterscheiden und zum anderen quantifizieren lassen. Die visuellen Ergebnisse der Automationsgrade (wie in Kapitel 3.5 dargestellt und beschrieben) werden dabei auf den bildschirmbasierten Anzeigeeinrichtungen (*Multi-Function-Dislays*, MFDs) dargestellt, welche als Interaktionsflächen für visuelle und haptische Interaktionen dienen. Dabei wurden messbare Interaktionen des Operateurs sensorisch erfasst und ausgewertet.

4.2.2.1 Vorgehen

Zur Vermessung der visuellen Interaktionen mit den visualisierten Ergebnissen der Automationsgrade dient dabei das Blickbewegungsmesssystem des Forschungssimulators[63], welches über vier im Cockpit verteilt angeordnete Kameras die Blickkoordinaten des Operateurs auf den *Multi-Function-Dislays* (MFDs) eines Mock-Up-Cockpits sensorisch erfasst [Honecker & Schulte, 2017b]. Diese Blickkoordinaten werden in Echtzeit in eine semantische Beschreibung des betrachteten Objekts umgesetzt, mit Hilfe eines geometrischen Modells der aktuellen Displaykonfiguration bzw. des aktuell angezeigten Layouts. Zusätzlich werden die Blickbewegungsdaten durch haptische Eingaben vervollständigt, um robustere, reichhaltigere und eindeutigere Evidenzen [Honecker, 2021] zu erzielen ([Honecker & Schulte, 2017b], [Honecker, 2021]).

Zwei Indikatoren, ein zeitliches Beobachtungsintervall sowie die darin sensorisch erfassten Evidenzen werden herangezogen, um die Bandbreite der Interaktionsevidenzen (Evidenzen pro Zeitintervall) zu ermitteln. Dabei wird diese Interaktionsbandbreite durch:

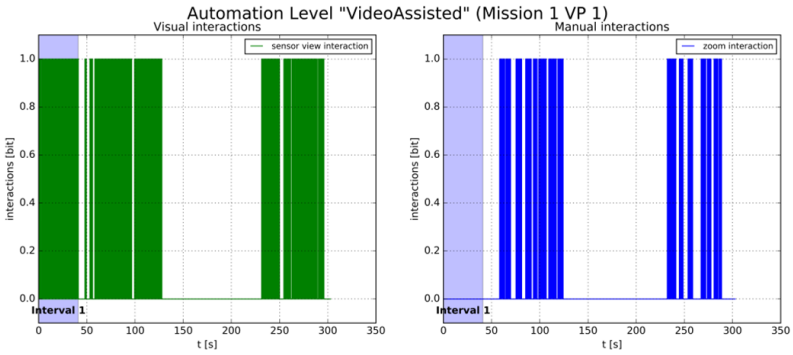
[63] Eine detaillierte Beschreibung der Experimentalumgebung erfolgt in Kapitel 4.3.

- die Normierung auf die maximale Auslastung der Kanäle[64] VS und RM (maximal mögliche manuelle Interaktionsbandbreite)
- dieselbe Menge an visuell präsentierten Aufklärungsdaten

spezifiziert und vergleichbar gemacht. Die Methodik sowie der Pseudocode zur Berechnung der vergleichbaren Interaktionsmengen wird in [Ruf & Stuetz, 2017] aufgezeigt.

Die experimentelle Evaluierung erfolgt mittels eines *Human-In-the-Loop – Experiments*, wobei für jeden der Automationsgrade Referenzmessungen erfolgten. Die Messungen erfolgten in zwei Durchläufen mit einer Beobachtungsdauer von je ca. 300 Sekunden. In dieser Zeit wurden in kleinen, geeigneten Anwendungsszenarien (*use-cases*) mit dem Einsatz der Automationsgrade Aufklärungsergebnisse erzeugt und für jeden Automationsgrad auf den MFDs visualisiert. Ein Proband führte dabei die die Extraktion von relevanten Informationen (potentielle Objektbedrohungen am Boden) aus. Je nach Automationsgrad mussten dafür verschiedene Interaktionsarten angewendet und damit *Demands* aufgewendet werden, um das Aufgabenziel zu erreichen. Diese Interaktionen spiegeln sich in den aufgezeichneten und normierten Interaktionsbandreiten wieder. Dabei wurden mit dieser Methodik erwartungsgemäß die Kanäle VS und RM ermittelt.

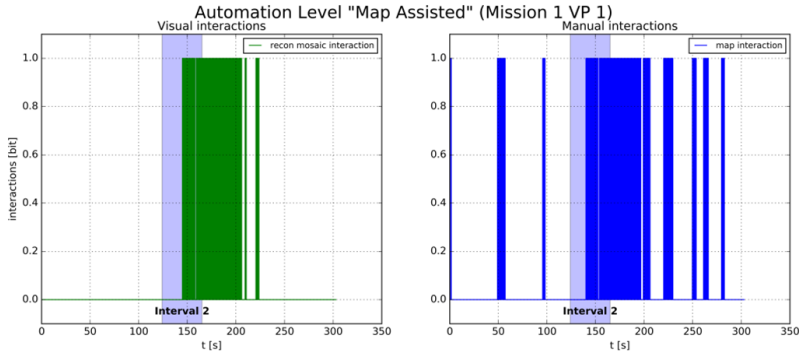
Abbildung 4.7, Abbildung 4.8 und Abbildung 4.9 zeigen die aufgezeichneten, möglichen visuellen und manuellen Interaktionen mit den Aufklärungsprodukten aus den Automationsgraden.




```
+++++ Automation Level: "Video Assisted" ++++++
VS value: [1.0]
RM value: [0.0]
```

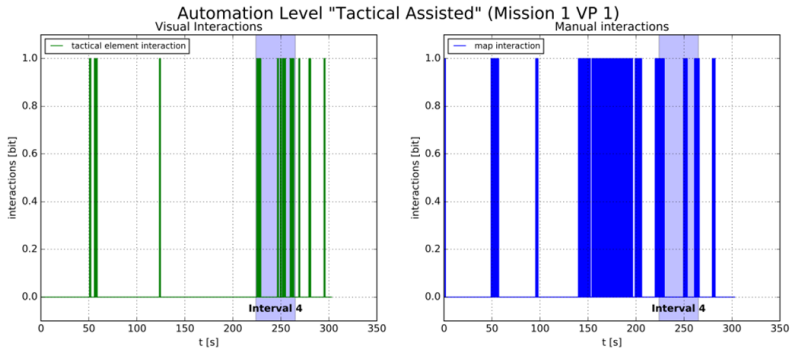
Abbildung 4.7: Interaktionen und rekonstruierte Ressourcenauslastung im Automationsgrad „*Video Assisted*“ mit transparenter Hervorhebung des Betrachtungsintervalls.

[64] Elemente des *Demand*-Vektors nach der „Theorie multipler Ressourcen“ der menschlichen Informationsverarbeitung nach ([C. D. Wickens, 2002], [C. D. Wickens & Hollands, 2000])




```
+++++ Automation Level: "Map Assisted" ++++++
VS value: [0.481]
RM value: [0.380]
```

Abbildung 4.8: Interaktionen und rekonstruierte Ressourcenauslastung im Automationsgrad „*Map Assisted*“ mit transparenter Hervorhebung des Betrachtungsintervalls.




```
+++++ Automation Level: "Tactical Assisted" ++++++
VS value: [0.341]
RM value: [0.218]
```

Abbildung 4.9: Interaktionen und rekonstruierte Ressourcenauslastung im Automationsgrad „*Tactical Assisted*“ mit transparenter Hervorhebung des Betrachtungsintervalls.

Die Messungen beschränken sich aufgrund der sensorischen Beobachtbarkeit auf die Komponenten VS (*visual spatial*) und RM (*response manual*) des Demand-Vektors. Dabei ist das Beobachtungintervall eines Produkts eines Automationsgrads transparent hinterlegt, unter der Grafik befinden sich die für den entsprechenden Ressourcenkanal des *Demand*-Vektors aus dem Experiment ermittelten Beanspruchungswerte. Unter den Abbildungen sind die jeweiligen normierten Auslastungswerte für den jeweiligen Automationsgrad angegeben, welche die Versuchsperson bei der Interaktion mit dem jeweiligen Aufklärungsprodukt erfahren hat.

Nachfolgend werden diese Messergebnisse kompakt gegenübergestellt.

4.2.2.2 Ergebnisse

Abbildung 4.10 stellt die Ergebnisse in grafischer Form gegenüber und verdeutlicht den Zusammenhang der Automationsgrade mit den zugehörigen ermittelten, normierten Beanspruchungsmaßen VS und RM. Dabei wird die zuvor ermittelte, normierte Beanspruchung der Ressourcen des Operateurs prozentual dargestellt, um eine quantitative Beschreibung zu erhalten.

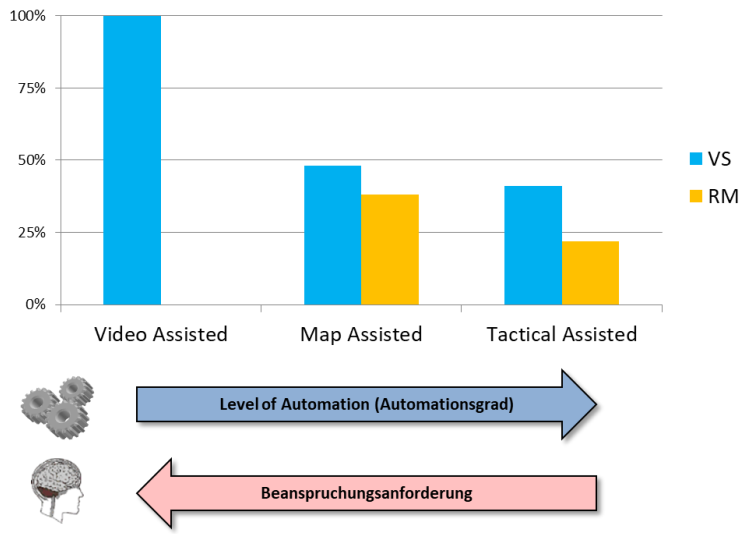


Abbildung 4.10: Grafischer Vergleich der normierten, prozentuellen Beanspruchung der Interaktionskanälen bei der Nutzung der Aufklärungsprodukte der Automationsgrade auf einer normierten Datenmenge.

Anhand des Experiments konnten die wichtigsten Komponenten des *Demand*-Vektors zur Beschreibung der Beanspruchung des Operateurs anhand einer typischen, vorgegebenen Aufgabensituation ermittelt werden. Der Messdatensatz ließ jedoch keine Schlüsse auf alle Werte der Beanspruchung zu. Besonders die kognitive Beanspruchung (CS, kognitiv räumlich) musste durch Expertenwissen rekonstruiert und empirisch bestimmt werden. Die ermittelten Parameter beschreiben die *Demands* an den Operateur während der visuellen und haptischen Interaktion mit den Aufklärungsprodukten, und konnten einen Beitrag für ein größeres, domänenübergreifendes Aufgabenmodell ([Honecker, Brand, & Schulte, 2016], [Honecker, 2021]) leisten [Ruf & Stuetz, 2017]. Eine Abbildung des so erzeugten Aufgabenmodells kann in Anhang A vorgefunden werden.

4.2.2.3 Gewonnene Erkenntnisse

Die Ergebnisse belegen, dass der Umsetzungsvorschlag der Automationsgrade unterscheidbare Anforderungen an die Beanspruchung des Operateurs stellt. Bei der Interaktion mit den Aufklärungsprodukten zeichnen sich unterschiedliche Beanspruchungsstufen ab, wobei die erforderliche Beanspruchung zum hohen Automationsgrad hin abnimmt. Die verwendeten Ansätze der Automation und Assistenz werden damit als geeignet zur Reduktion der *Workload* (Beanspruchung) angenommen.

4.3 MUM-T Missionssimulator als Experimentalumgebung

Der am Institut für Flugsysteme errichtete MUM-T - Missionssimulator ermöglicht die Simulation realistischer militärischer Szenarien und die deterministische Durchführung militärischer, großflächiger MUM-T- Missionen durch einen Transporthelikopter mit mehreren UAVs.

Er bietet eine möglichst hohe Immersionstiefe durch eine angemessene Realitätsnähe und eine hohe visuelle Detailtreue durch eine fotorealistische, dreidimensionale Darstellung der Umwelt. Die Simulation bietet eine realitätsnahe Dynamik von Entitäten und Objekten mit realistisch ausgeprägtem Verhalten und optischer Beschaffenheit, ebenso kann eine hohe zeitliche und situative Dynamik in verschiedenen Szenarien abgefahren werden.

Die Simulation basiert auf der kommerziellen, proprietären Simulationsumgebung *VBS3* (*Virtual Battlespace 3*) des Herstellers *Bohemia Interactive*[65] und erzeugt ebenso die Bildgenerierung für die

[65] https://bisimulations.com

Außensicht des Helikopters sowie die Simulation und Bilddatengenerierung der UAV-Sensorsysteme.

Im Folgenden werden die Kernbestandteile des Simulators kurz erläutert. Hierzu wird zunächst das H/C-Cockpit mit seinen Bedien- und Interaktionsmöglichkeiten beschrieben (Kapitel 4.3.1), ebenso die Displays, auf welchen die Präsentation der Aufklärungsprodukte erfolgt. In Abschnitt 4.3.2 wird kurz die notwendige UAV-Sensorsimulation und -emulation erläutert. Abschließend wird in Kapitel 4.3.3 kurz auf die zur Missionssimulation erstellten MUM-T Szenarien eingegangen.

4.3.1 Cockpit und Displays

4.3.1.1 Cockpit

Die Durchführung von Missionen erfolgt durch eine Helikoptercrew im zweisitzigen Cockpit des simulierten Transporthubschraubers. Abbildung 4.11 zeigt das Cockpit des Transporthelikopters mit aktivierter Außensichtsimulation und veranschaulicht die Anordnung der Komponenten.

In Abbildung 4.11 sind dabei die folgenden Komponenten hervorgehoben:

1. Außensichtdarstellung (Dynamische Umweltdarstellung).
2. MFDs (*Multi-Function Displays*) zur Systeminteraktion.
3. CDUs (*Control Display Units*): Helikoptersysteme, Kommunikationssysteme.
4. Steuerorgane zur Steuerung des Helikopters: *cyclic, collective, pedals.*
5. Blickbewegungsmesssystem.

Abbildung 4.11: Missionssimulator zur Durchführung von MUM-T Helikoptermissionen am Institut für Flugsysteme mit Modulen des Transporthelikoptercockpits und simulierter Außensichtdarstellung.

Interaktionen des Piloten bzw. des Kommandanten mit den UAV- und Helikoptersystemen finden im Wesentlichen über die beiden MFDs (*Multi-Function-Displays*) statt, diese dienen als primäre Schnittstelle des MMIs (*Mensch-Maschine-Interface*). Darauf erfolgt die Darstellung der taktischen Karte, den helikopterspezifischen Anzeigen, der Instrumente, sie dienen als Bedienerschnittstelle zur Führung der abgesetzten UAVs und zum Empfang von Aufklärungsergebnissen.

Abbildung 4.12 zeigt die geometrische Anordnung der Laborumgebung. Die Interaktionsflächen sowie Mess- und Beobachtungssysteme zur Versuchsdurchführung sind dabei farblich hervorgehoben.

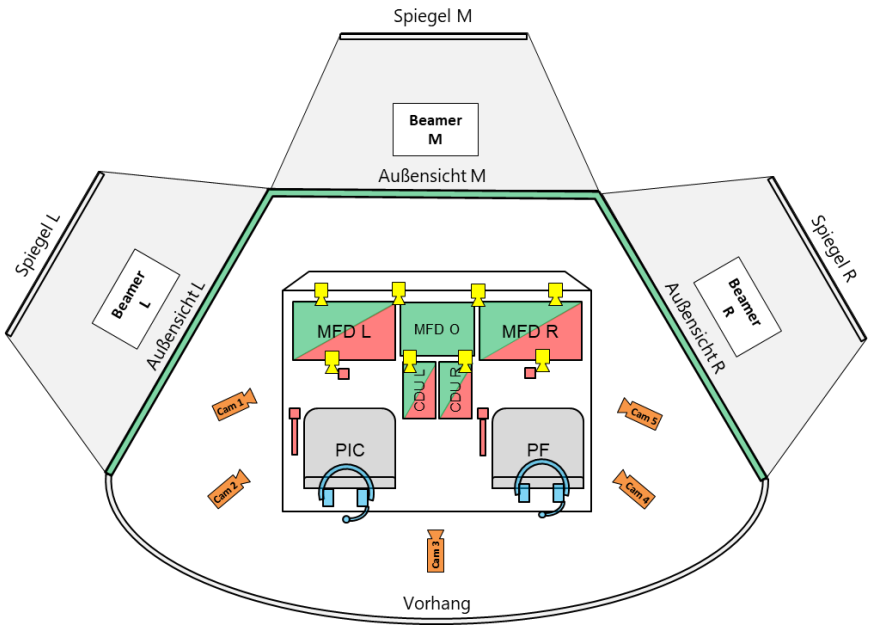


Abbildung 4.12: Schematische geometrische Anordnung der Laborumgebung.

Die Aufzeichnung der Probanden während der Versuchsdurchführung erfolgte durch fünf Kameras (orange in Abbildung 4.12), welche sich innerhalb des durch einen Vorhang isolierbaren Bereichs befinden.

Abbildung 4.13 zeigt die farbliche Hervorhebung der Interaktionselemente der Simulationsumgebung aus Abbildung 4.12.

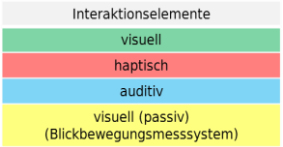


Abbildung 4.13: Farbliche Codierung der Interaktionselemente der Simulationsumgebung.

Im Cockpit befindet sich zur Erfassung der Blickdaten der Crew ein Blickbewegungsmesssystem der Firma *SmartEye*[66]. Das System besteht aus vier Kameras und drei Infrarotbeleuchtern pro Arbeitsplatz und ermittelt im kalibrierten[67] Zustand in Echtzeit die Blickkoordinaten der Crew auf den visuellen Interaktionsflächen (Displays und Außensicht), womit eine semantische Erkennung der betrachteten Anzeigeelemente und Ergebnisdarstellungen vollzogen wird ([Honecker & Schulte, 2017a], [Honecker, 2021]).

4.3.1.2 Displays

Die Kartendarstellung bzw. Darstellung der taktischen Lage[68] erfolgt auf der *TacticalMap*-Seite des *MFDs* (Abbildung 4.11, Element 2) und kann bildschirmfüllend dargestellt werden (Abbildung 4.14).

[66] http://smarteye.se
[67] Das System muss für die Blickbewegungserfassung probandenspezifisch individuell kalibriert werden.
[68] Die auf den Cockpitanzeigen dargestellte Taktische Lage umfasst realitätsgetreu verfügbare Informationen, welche die Crew durch Aufklärungsinformationen aus dem Einsatz der UAVs für ein aktuelles Lagebild zur Missionsdurchführung anreichern kann.

Abbildung 4.14: *TacticalMap* des MFDs in Vollbilddarstellung als Missionsinterface zur Auftragsvergabe und visuellen Darstellung der Aufklärungsdaten.

Ihre primären Funktionen sind das Missionsmanagement und die Führung der UAVs zur Vorabaufklärung sowie die Auswertung der Aufklärungsdaten. Die Führung der UAVs erfolgt dabei über ein kontextsensitives Radialmenü, welches je nach selektiertem Kartenelement die verfügbaren Eingabemöglichkeiten (beispielsweise Kommandierung der UAVs) zur Anwahl anbietet. Abbildung 4.14 zeigt exemplarisch das MFD des Kommandanten zur Planung der Aufklärungsrouten in einer eingeblendeten taktischen Karte sowie oben links den Direktzugriff auf das Kamerasystem des orangefarbenen UAVs.

4.3.2 Sensorsimulation und UAV-Systeme

Die Simulation von sensorischen Hardwareressourcen (Gimbalsystem[69], Kamerasysteme, Datenlink) erfolgte ebenfalls in *VBS3*, die Ansteuerung dieser sowie Datenabgriffe erfolgten mittels der C++-API von *VBS3* (*Fusion for VBS3*[70] des Herstellers *SimCentrics)*. Die Funktionalität einer schwenkbaren Kameravorrichtung wurde durch ein individuell erstelltes Softwareplugin (Komponente zur Erweiterung) der *VBS3*-Applikation hinzugefügt. Ein anderes Softwareplugin stellt die Prozesse der Bildextraktion und Bildübertragung bereit, simuliert so die technischen Funktionalitäten eines optischen Kamerasystems sowie eines Datenlinks. Die Plugins sind dabei über die Interprozesskommunikation *AnyCom*[71] an die Komponentenarchitektur angebunden (Kapitel 3.2). Das simulierte bildgebende Kamerasystem sowie der schwenkbare Gimbalvorrichtung werden von den zu untersuchenden Cockpitfunktionen als funktionale Einheiten angesteuert. Die Sensoren werden dabei als Nutzlast von einem in VBS3 simulierten UAV-System getragen, dessen Flugdynamik durch eine erweiterte Punktmasse-Simulation primitiv nachgebildet wurde.

4.3.3 Szenariensimulation und MUM-T - Szenarien

Mit Hinblick auf eine hohe visuelle Güte und einen fotorealistischen Qualitätsanspruch erfolgte die Erstellung mehrerer hochauflösender Datenbasen [Pyschkin, 2015], welche aus Satellitendaten mit einer Bodenauflösung von 50 cm bzw. 25 cm sowie einem digitalen Elevationsmodell bestehen.

[69] schwenkbare Kameravorrichtung
[70] https://www.simct.com/products/vbs3/vbsfusion
[71] AnyCom : institutseigene Interprozesskommunikation [Boehm & Schulte, 2012]

Eine geotypische Ausmodellierung ergibt eine simulierte Umwelt, welche von den UAVs aus der Luft maßstabs- und farbgetreu beobachtet werden kann.

Zur Erprobung des variablen Automationssystems in der Versuchskampagne wurden mehrere Missionsvignetten von Transporthelikoptermissionen konzipiert und in den Datenbasen umgesetzt, in welche 6 verschiedene Missionen eingebettet wurden ([Pyschkin, 2014], [Pyschkin, 2015], [Winkler, 2015], [Winkler, 2016]). Bereits in den Erstellungsprozessen der Szenarien und der Simulationsdatenbasen wurden Vorkehrungen und wichtige Grundlagen für die Evaluierung der Untersuchungsschwerpunkte dieser Arbeit geschaffen. So erzeugen die geospezifische und realitätsnahe Bodenbeschaffenheit der Szenarios sowie die die geotypische Ausmodellierung des Geländes entlang möglicher Missionspfade ein realitätsnahes Umfeld zur Erprobung der variablen Automationsfunktionen zur Routenaufklärung und ermöglichen die Replikation und Abbildung domänenspezifischer Gegebenheiten.

Die Missionsvignetten können durch das Bedienpersonal des Simulators gezielt geladen und abgefahren werden. Umfangreiche, in die Szenarien integrierte Kontroll- und Steuerungsmechanismen, ermöglichen u.a. das für die Crew plötzliche Erscheinen von Objekten verschiedener Gesinnung, um beispielsweise die Flugrouten des Helikopters mit Objektvorkommen zu beaufschlagen oder gezielt zu blockieren. Durch diese dynamisch im Szenario auftretenden Bedrohungen auf den Flugrouten ergibt sich somit ein intensiver Kontrolleindruck für die Crew, da diese den Verlauf der Helikopterrouten im Einsatzgebiet weitestgehend selbst bestimmen können und nicht auf vorab festgelegte Flugpfade eingeschränkt sind. Jedes der Szenare enthält alternative Einsatzverläufe und bietet eine hohe Missionsdynamik.

Da durch externe Kontroll- und Steuermöglichkeiten die Bedrohungen an unterschiedlichsten geografischen Positionen im Szenar auftauchen können, schwankt die Güte der automatisierten Aufklärungsfunktionen zusätzlich innerhalb eines Missionsverlaufs, was zur Erprobung der der variablen Automationsgrade genutzt wird.

Allen Szenaren gemein ist, dass es sich um Transporteinsätze der Heeresfliegerei handelt. Das bedeutet, dass eigene Truppen durch den Transporthubschrauber in- oder aus eine/r Gefechtszone transportiert werden müssen, und dass alle Flugrouten des bemannten H/C im Einsatzgebiet durch die UAVs voraufgeklärt werden müssen. Besonders der dynamische Einsatzverlauf und die wechselnde Bedrohungslage machen den Einsatz der UAVs zur Vorabaufklärung der Flugrouten immer wieder und regelmäßig erforderlich.

Die Missionen haben verschiedene Ziele und Charakteristiken (Missionstypen: Material-, Truppen- oder Verletztentransport), Einsatzdauern von maximal einer Stunde, verschiedene Missionsdynamiken sowie Flugwegmuster des Helikopters. Sie sind in der Abfolge voneinander unabhängig und enthalten hinsichtlich der Forschungsfragestellungen keine Korrelationen oder wiederkehrende, erkennbare Muster.

Eine Detailbeschreibung der Missionsvignetten sowie die Beschreibung des Test- und Trainingsszenars sind in Anhang D zu finden.

4.4 Versuchskonzept

Dieses Kapitel stellt das Versuchskonzept sowie den Versuchsablauf innerhalb einer Missionsdurchführung bei der Durchführung der *Human-In-The-Loop* - Kampagne dar.

4.4.1 Operatives Arbeitssystem

Der untersuchte *Arbeitsprozess*, die Durchführung der bemannt-unbemannten Transportmission mit dem Transporthelikopter sowie den abgesetzten Aufklärungsplattformen (UAVs), soll dabei im *Arbeitssystem* mit dem *Missionsziel* umgesetzt werden, als *Ergebnis* Ladung (Truppen oder Material) unbeschadet an einen Zielort zu verbringen.

Abbildung 4.15 zeigt das in dieser Arbeit untersuchte delegierende Verhältnis zwischen dem Kommandanten (Pilot Non-Flying) sowie den UAVs und dem Helikopter als Werkzeuge (*Tools*) im Arbeitssystem unter Verwendung der Entwurfsmuster (*Design pattern*) nach [Schulte et al., 2016] für militärische MUM-T Transportmissionen mit Vorabaufklärung durch auftragsbasiert geführte UAVs aus dem Helikoptercockpit [Schulte & Donath, 2018].

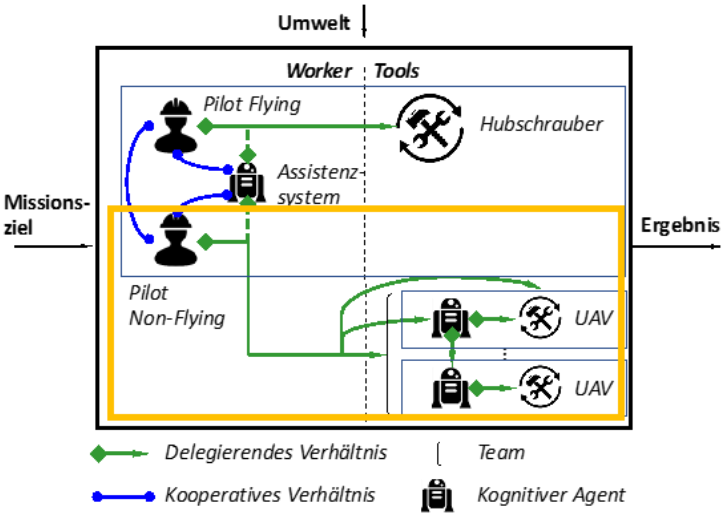


Abbildung 4.15: Instanz des Arbeitssystems für militärische MUM-T - Transportmissionen mit Vorabaufklärung durch auftragsbasiert geführte UAVs aus dem Helikoptercockpit, Grafik aus [Honecker & Schulte, 2017b].

Dabei liegt der Fokus des Experiments auf dem Führungsprozess des UAV-Verbands durch den Kommandanten (PIC) des Helikopters (orangefarbene Umrandung in Abbildung 4.15).

Das umgesetzte variable Automationssystem zur Routenaufklärung wurde in ein solches experimentelles Arbeitssystem eingebettet, und kann über das grün eingezeichnete Delegationsverhältnis auf den UAVs auftragsbasiert geführt werden.

4.4.2 Versuchsdesign

Im Rahmen der Versuchskampagne absolvieren alle Kommandanten in einem Laborexperiment die gleichen Messmissionen in der selbigen Abfolge (*Within-Subject-Design)*. Die Evaluierung erfolgt dabei in simulierten *Full-Mission-Messflügen* im Simulator, wobei der Einsatz des Automationssystems nicht exklusiv[72] erfolgt. Dabei wird dieselbe Konfiguration des Automationssystems (variabel automatisierter Betrieb) in allen Messflügen evaluiert.

Das Versuchsdesign sieht folgende Gegebenheiten für die Durchführung der Messflüge vor:

- Die Evaluierung erfolgt in kompletten, simulierten MUM-T-Missionen (*Full-Mission-Messflüge*).
- Jeder Kommandant absolviert alle Messmissionen in derselben Reihenfolge (*Within-Subject-Design).*
- Innerhalb jeder Messmission stehen allen Kommandanten dieselben Einsatzmöglichkeiten des Automationssystems zur Verfügung (*Within-Subject-Design).*
- Jeder Kommandant setzt die Funktionalitäten gezielt ein, um mögliche Objektbedrohungen innerhalb einer sinnvollen Vorwarnzeit aufklären zu können.

[72] Die Vorabaufklärung der Flugrouten stellt das neue Betätigungsfeld im Aufgabenspektrum des Kommandanten dar, welches in den regulären Aufgabenkontext der Kommandanten eingebettet wurde.

- Alle Kommanden interagieren bei der Versuchsdurchführung mit dem Automationssystem und werden während des Flugs mit circa derselben Menge an den visuellen Präsentationen der Produkte der *Variablen Automationsgrade zur Routenaufklärung* konfrontiert.
- Die sich zur Laufzeit ändernde *Trustworthiness* der Aufklärungsergebnisse gibt dabei vor, wie die Aufklärungsdaten durch das Automationssystem dargestellt werden.

Bei der Versuchsanordnung werden Prozesskreisläufe innerhalb der Cockpitumgebung (Kapitel 4.3.1) sowie innerhalb der simulierten Umgebung (Kapitel 4.3.2 und 4.3.3) ausgeprägt und aufgebaut. Abbildung 4.16 zeigt schematisch die in der Versuchsanordnung aufgebauten Prozesskreisläufe (magenta) sowie deren Verkettung, welche zwischen der automatisierten Aufklärung in der *Virtuellen Umgebung* und dem Operateur im *Cockpit* verlaufen.

Dabei wurde die Cockpitumgebung durch den Einsatz von *Systemen und Methoden* (Variable Automationsgrade, ATR-Emulation) funktional an die virtuelle Umgebung angebunden. In der Simulation der künstlichen und dynamischen Missionswelt fanden Ereignisse (Erzeugung von Aufklärungsprodukten) getriggert durch Objektvorkommen statt, welche kausale Reaktionen beim *Operateur* hervorrufen und *kognitive Prozesse* stimulieren (induzierte Prozesskreisläufe in Abbildung 4.16, blau).

Durch die Veränderung der Charakteristik der bindenden Schicht (Systeme und Methoden) wurden durch den gezielten Aufruf automatisierter Funktionen maschinelle Beobachtungen aus der virtuellen Umgebung (Aufklärungsdaten) auf unterschiedliche Weise im Cockpit auf dem *MMI* (Mensch-Maschine-Interface) dargestellt. Als Reaktion darauf werden unterschiedliche Handlungen und kognitive Prozesse des Operateurs erwartet.

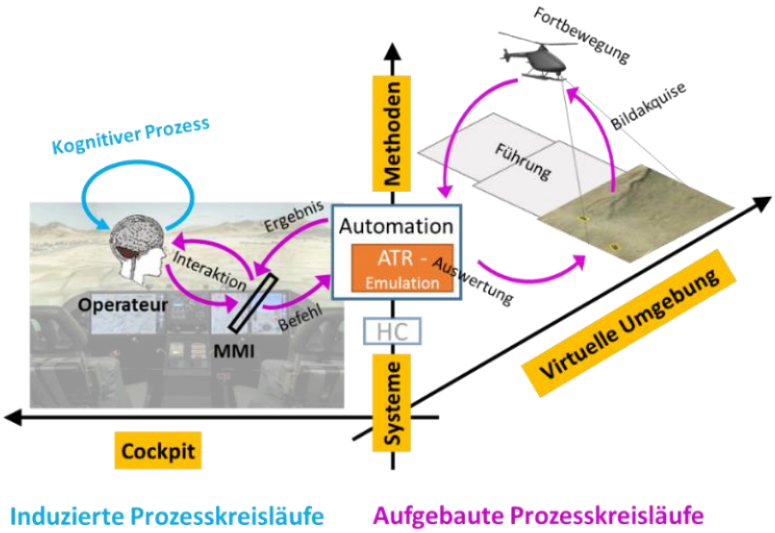


Abbildung 4.16: Kausale Prozesskreisläufe im Mensch-Maschine-Experiment.

4.4.3 Trustworthiness als Unabhängige Experimentvariable

Die Stimulation des Automationssystems, welche einen Wechsel des Automationsgrades und damit der Darstellungsmodalität der Aufklärungsdaten im Cockpit herbeiführen kann, erfolgt anhand der Zuverlässigkeit der Aufklärungsergebnisse (*Trustworthiness*) als UV des Experiments.

Dabei werden mittels eines emulierten ATR-Systems (*Automatic Target Recognition*) zur Laufzeit Produkte der Perzeptionsketten mit unterschiedlichen Gütemaßen aufbereitet. Zur Ergebnisextraktion wird eine für den Versuch deterministische Detektions- und Identifizierungsfunktion emuliert, welche über die Messreihe hinweg reproduzierbare Gütemaße produziert. Dies stellte eine sehr ähnliche Versuchsanordnung über alle Messflüge hinweg sicher.

In Abhängigkeit der Verlässlichkeit[73] (*Trustworthiness*) einer Objektdetektion erfolgt dann die Datenaufbereitung durch den entsprechenden Automationsgrad und die gezielte Rückführung ins Cockpit und Darstellung auf den MFDs.

Die UV der *Trustworthiness* wird im Experiment sowohl

- objektbezogen für jedes detektierte Element
- räumlich entlang der Flugpfade

variiert.

Die objektbezogene Verlässlichkeit des Erkennungsprozesses hängt dabei von der äußeren bildlichen Erscheinung des Objekts ab. Die Objekte wurden dazu vorab mit unterschiedlichen Schwierigkeitsgraden der optischen Wahrnehmbarkeit belegt, welche in drei Schwierigkeitsklassen unterteilt wurden. Daraus ergaben sich dann unterschiedliche Werte der Verlässlichkeit (*Trustworthiness*) bei der Aufklärung (Tabelle 9).

Der Grad der maschinellen Aufklärbarkeit von Objekten, resultierend aus dem Schwierigkeitsgrad der optischen Wahrnehmbarkeit, wurde dabei vorab anhand des Objekttyps sowie dessen Farbgebung und dem wahrscheinlichsten optischen Kontrastverhältnis zum Untergrund eingestuft und festgelegt. So wurden Objekte mit untergrundfremden Farben (rot, gelb, weiß, bunt) und zivile Fahrzeuge (große Fensterflächen, glänzende Oberflächenmaterialien, ziviles und urbanes Design und eine häufig abgerundete und ausladende Formgebung, diffuse Lichtspiegelung und daher aus vielen Winkeln optisch wiedererkennbar) als optisch leicht aufklärbar eingestuft. Militärische Fahrzeuge hingegen (militärische, kantige Formgebung, kleine Fensterflächen, matte und gedeckte Oberflächen) mit untergrundähnlichen Farben (sandfarben, olivgrün, grün, grau) oder Tarnmustern wurden als schwer aufklärbar eingestuft.

Schwierigkeitsgrad der optischen Wahrnehmbarkeit	**Zuverlässigkeit (*Trustworthiness*) der Aufklärung [%]**
schwer	0 bis 25
mittel	25 bis 70
leicht	70 bis 100

Tabelle 9: Zusammenhang zwischen Erkennbarkeit der Objekte und deren Verlässlichkeit bei der Aufklärung.

Die gestreuten Objekte, deren Verschiedenheit aus einem Pool von sechs neutralen und fünf bedrohlichen bemannten Fahrzeugen besteht, lassen sich durch äußerliche Merkmale für Menschen gut unterscheiden. Die Gesinnung der Aufklärungsobjekte war anhand äußerer Merkmale, wie beispielsweise offen getragener Bewaffnung, erkennbar. Durch ein Training (siehe Kapitel 4.6.1) wurde vorher sichergestellt, dass hinsichtlich des Identifizierungsprozesses keine Unsicherheiten seitens der Teilnehmer bei der Versuchsdurchführung bestehen.

Das räumliche Auftreten von Aufklärungsobjekten innerhalb der Szenarien erfolgt bezogen auf zuvor festgelegte und selektierte geographische Gebiete für jedes Missionsgebiet. Die Auftrittswahrscheinlichkeit der Objekte wird dabei innerhalb vorab festgelegten, den Probanden aber unbekannten geographischen Regionen variiert. Innerhalb dieser Gebiete findet eine intervallweise zufällige Verteilung der Bodenobjekte entlang der aufzuklärenden Pfade statt, um für

[73] aus einer emulierten, dynamischen Funktionalität

alle Messflüge eines Missionsszenarios ähnliche und damit vergleichbare Gegebenheiten zu schaffen. Dabei erfolgte eine räumlich zufällig verteilte Streuung entlang der aufzuklärenden Pfade, wobei die Probanden den Verlauf der Pfade selbst frei definieren konnten. Anhand eines Zufallsmechanismus erfolgte eine selektive Auswahl des bedrohten Pfades, somit wurden nicht grundsätzlich alle Pfade durch aufzuklärende Objekte blockiert. Dadurch soll bei den Probanden eine *Kontrollillusion*[74] entstehen, da für sie keine erkennbaren Muster des Erscheinens und des Typs aufzuklärender Objekte erkennbar sind. Sie werden vielmehr in den Glauben versetzt, durch eine geeignete Vorgabe von Aufklärungspfaden (Anzahl größer eins) höhere Chancen unbedrohter Routen und damit mehr Alternativen an Routen zu erhalten. Dadurch soll erzielt werden, dass die Probanden reichlich Gebrauch von den automatisierten Funktionen machen.

Abbildung 4.17 zeigt beispielhaft eine sich daraus ergebende Ausprägung der *Trustworthiness* der Aufklärungsobjekte innerhalb eines Experimentalfluges einer Mission. Die prozentualen Werte bezeichnen die Verlässlichkeit der maschinellen Aufklärung. Objekte, welche nicht durch die Perzeptionskette identifiziert werden konnten, wurden als *Target Candidates* ins Cockpit gebracht. Dabei sind die durch die UAVs aufgeklärten Flächen farbig dargestellt. Durch diese führt die in blau dargestellte Flugroute des Helikopters, welche über die zuvor aufgeklärten Wegstrecken führt.

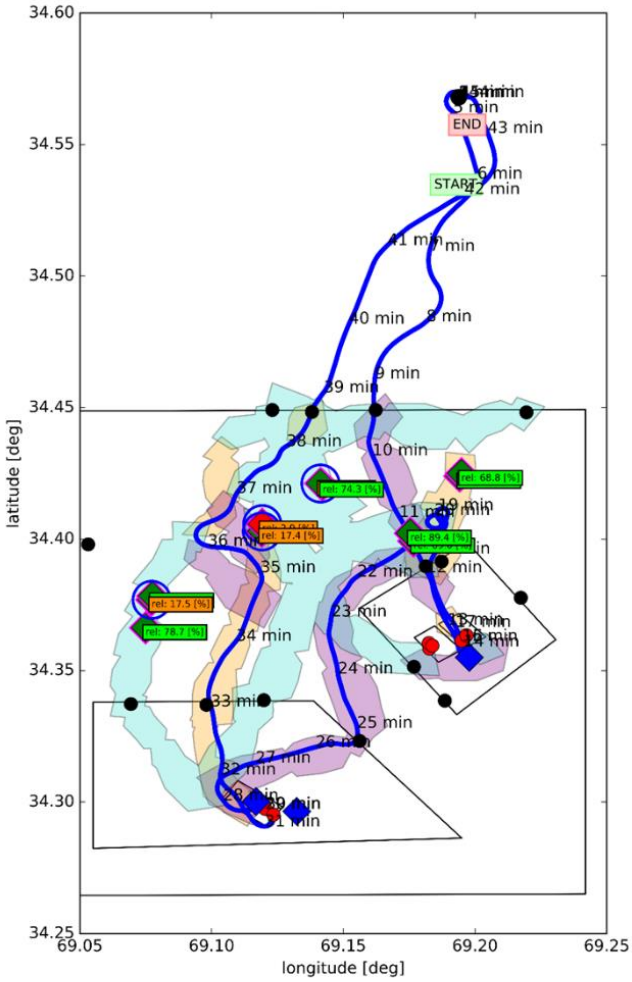


Abbildung 4.17: Beispielhafte Ausprägung der Verlässlichkeit der Aufklärung einzelner Objekte innerhalb eines Szenarios (farbige Wimpel mit Maß der *Trustworthiness*).

[74] Als Kontrollillusion (illusion of control) wir die Annahme eines Individuums bezeichnet, durch eigenes Verhalten zufallsverteilte Ereignisse kontrollieren zu können ([Langer, 1975], [Wegner, 2002]).

Vom Vorhandensein und der technischen Umsetzung der Kontrollmechanismen, welche bis hier skizziert wurden, erhalten die Probanden keine Kenntnis.

4.4.4 Evaluierungsmethodik der Abhängigen Experimentvariablen

Zur Beantwortung der Forschungsfragen kommt eine mehrschichtige Auswertung des Experiments mittels objektiver Kriterien (statistische Analysen) als auch subjektiven, retrospektive Methoden (Fragebögen) zur Anwendung.

Dazu wurden drei Fragebögen zur gezielten Befragung der Probanden entwickelt (siehe Kapitel 4.7). Mit diesen erfolgt die subjektive Einschätzung der Kommandanten

- zu einzelnen Situationen,
- nach jedem Messflug,
- einmalig ganzheitlich am Ende der Kampagne.

Zusätzlich werden sämtliche Systemgrößen, System- und Betriebszustände des variablen Automationssystems mittels Datenloggern erfasst. Während der gesamten Durchführung werden die visuellen Interaktionen der Probanden mithilfe eines Blickbewegungsmesssystems (Kapitel 4.3.1) sowie sämtliche Interaktion mit dem Automationssystem durch einen Datenlogger erfasst und aufgezeichnet.

Die Abhängigen Variablen und die dafür angewendete Auswertungsmethodik werden in Tabelle 10 dargestellt.

Abhängige Variablen	**Methode**
Automatisierte **Aufklärungsleistung**	**objektiv** (Datenlogger Automationssystem)
Belastung und **Beanspruchung** des Kommandanten	**objektiv** (Datenlogger Interaktionen Kommandant), **subjektiv** durch **Fragebogen**
Ausgeprägtes **Vertrauen** in die Systemfunktionen und die Repräsentationsformen der Daten	**subjektiv** durch **Fragebogen**

Tabelle 10: Evaluierungsmethodik der Abhängigen Variablen des Experiments.

4.4.5 Evaluierungsmethodik der Systemergonomie

Im Rahmen der Evaluierung werden zusätzlich weitere Einschätzungen zur Bewertung der Systemergonomie eingeholt (Tabelle 11).

Aspekt	**Methode**
Visuelle Ergonomie der Ergebnisdarstellung	**subjektiv** durch **Fragebogen**
Ergonomie der Benutzerschnittstelle	**subjektiv** durch **Fragebogen**
Adaptierbarkeit und Autorität	**subjektiv** durch **Fragebogen**
Effekte der proaktiven Adaptivität	**videobasiert einzeldiagnostisch, subjektiv** durch **Fragebögen**

Tabelle 11: Evaluierungsmethodik der Systemergonomie.

4.4.6 Versuchsanordnung und -ablauf

Bei der Durchführung des Laborexperiments setzen alle Probanden (die Kommandanten des Helikopters) das *Variable Automationssystem zur Routenaufklärung* während und zur Durchführung simulierter Transporthelikopterflüge innerhalb der Arbeitsumgebung ein. Das übergeordnete Ziel besteht darin, den Helikopter möglichst nur über aufgeklärtem Gebiet zu fliegen. Die Aufgabe des Kommandanten besteht konkret darin, drei UAVs so zu führen, dass ständig abgesuchte, voraufgeklärte Flächen zum Überflug bereitstehen. Dabei obliegt es ihm, potentielle Objektvorkommen rechtzeitig zu identifizieren, damit keine unbekannten Objekte überflogen werden müssen.

4.4.6.1 Durchführung

Abbildung 4.18 zeigt den Kommandanten (links im Bild) im Helikoptercockpit des Flugsimulators während einer Missionsdurchführung.

Abbildung 4.18: Kommandant (links) während des Helikopterflugs bei der Durchführung einer simulierten MUM-T – Mission mit variabel automatisierter Vorabaufklärung der Flugrouten.

Die eigenständige Durchführung eines Messfluges durch eine Crew erfolgt jeweils nach einem detaillierten Missionsbriefing (genaue Beschreibung der Abläufe siehe Kapitel 4.6), wobei jedes der sechs Missionsszenarien pro Crew nur einmal Verwendung findet. Nachdem die Crew das Missionsziel gemeinsam erschlossen hat, plant der Kommandant im Cockpit auf den *MFDs* die Flugrouten des Helikopters sowie Alternativen, welche er für die Erfüllung der Mission benötigt (Abbildung 4.19).

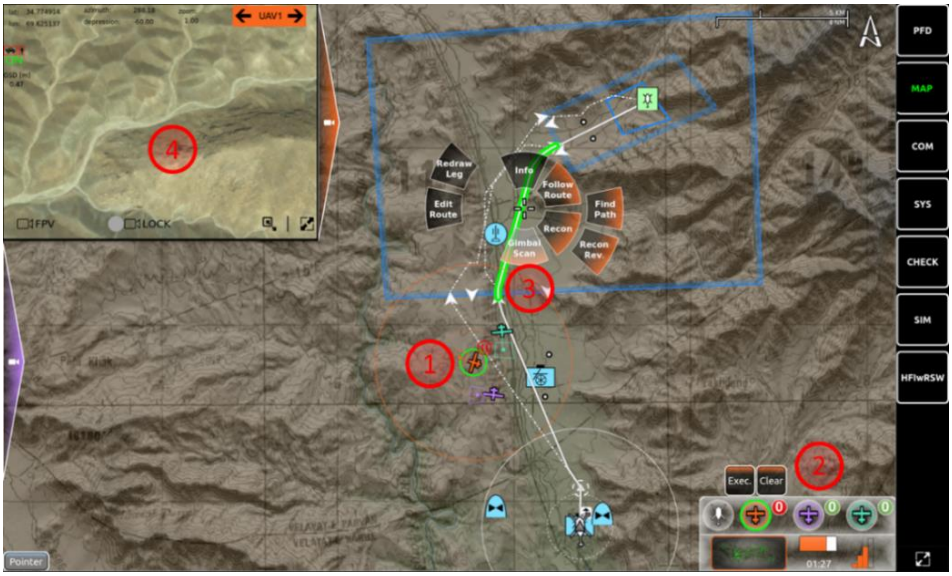


Abbildung 4.19: *TacticalMap* in Vollbilddarstellung als Missionsinterface zur Auftragsvergabe.

Dabei erfolgt die Auftragsvergabe zur Routenaufklärung durch die Selektion der potentiellen Flugrouten sowie die Delegation der Aufklärungsaufgabe an das selektierte UAV auf dem Missionsinterface (Abbildung 4.19). Dort sind folgende Eingabemasken und Bedienelemente bzw. Visualisierungen vorhanden:

1. UAVs zur Vorabaufklärung.
2. Selektionsmenü zur Auswahl eines aktiven UAVs (grün markierte Selektion), auf das sich die Auftragsvergabe oder manuelle Führung des Sensors bezieht.
3. Selektionsmöglichkeit (grüne Hervorhebungen) von Kartenobjekten sowie Bedienelement zum Funktionszugriff.
4. Fenster mit Echtzeitvideobild eines ausgewählten UAVs zum direkten Durchgriff auf Ressourcen und für manuelle Eingriffe (optional einblendbar).

Zur Verwendung der Funktionalität zur automatischen Routenaufklärung dieser Flugrouten wendet der Kommandant während der Durchführung der Missionen das Prinzip der *Auftragsbasierten Führung* an. Die auftragsbasierte Führung der UAVs erfolgt dabei für ein ausgewähltes UAV über das als Radialmenü gestaltete Bedienelement (Abbildung 4.20) auf der *TacticalMap* zur kombinierten, automatisierten UAV- und Sensorführung.

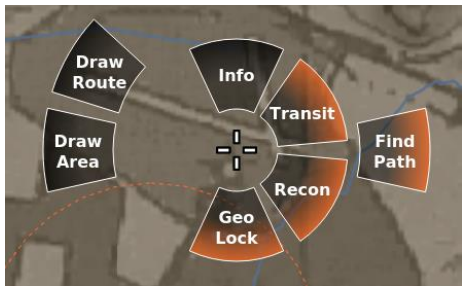


Abbildung 4.20: Bedienelement der Auftragsbasierten Führung auf der Kartendarstellung des MFDs, für selektiertes UAV1 (orangefarbene Farbgebung).

Mit der Schaltfläche „*Recon*“ wird dem UAV ein Aufklärungsauftrag auf das entsprechend selektierte Kartenelement (Route, Objekt oder Punktkoordinate) zur automatisierten Durchführung erteilt. Dabei wird standardmäßig der höchste Automationsgrad „*TacticalAssisted*“ aufgerufen, welcher bei auftretender Unsicherheit systemseitig und ohne

Kommunikation an den Operateur auf das niedrigere Level *„Map Assited“* angepasst wird. Der Aufklärungsauftrag „*Recon*“ kann zur Laufzeit über entsprechende, adaptive Schaltflächen jederzeit pausiert oder abgebrochen werden, wobei bei pausierter Ausführung die beteiligten Ressourcen manuell durch den Operateur geführt werden können.

Die Schaltfläche „*Geo Lock*“ stabilisiert die Kamera auf eine Bodenkoordinate, welche dann in einem Echtzeitvideo aus dem Helikoptercockpit eingesehen werden kann. Dabei erfolgt die Unterstützung durch den Automationsgrad *„Video Assisted“* (siehe Kapitel 3.5.1). Erfolgt diese direkte Übernahme der Ressourcen Kamera und Gimbal durch den Operateur während eines laufenden Aufklärungsauftrags des UAVs (*manuelle Eingriffe*), wird die automatisierte Ausführung bis zur Freigabe der Ressourcen pausiert.

Nach erfolgter Auftragsdelegation fliegt das UAV dabei den Anfang der aufzuklärenden Route an und richtete die Kamerasicht selbständig auf den Routenbeginn aus. Das automatisierte System führt das Kamerabild dabei durch kontinuierliche Steuerung und Nachführung der Route entlang, während das UAV mit einem seitlichen räumlichen Versatz entsprechend des sog. *Detection levels* (siehe Abschlussbericht Teil I, [Schulte et al., 2018]), einer Maßnahme zur erschwerten Eigenaufklärbarkeit, der automatisierten Sensorführung durch die Automationsgrade synchronisiert folgt.

Während des Versuchs werden alle Interaktionen (visuell und haptisch) des Kommandanten mit den Systemen und dargestellten Aufklärungsergebnissen aufgezeichnet.

4.4.6.2 Visuelle Repräsentation von Aufklärungsergebnissen

Während des Fluges werden Aufklärungsergebnisse an den Kommandanten herangetragen, diese werden auf den Multifunktionsanzeigen visualisiert. Im Cockpit des Helikopters wurde dafür das *MMI* (Mensch-Maschine-Interface) um eine spezialisierte Benutzerschnittstelle zur Interaktion mit den Funktionalitäten der Aufklärungsautomation und deren Ergebnisdarstellung (siehe Kapitel 3.5) erweitert. Diese Interfaces wurden in das gemeinsame Bedienkonzept der MFDs (*Multi-Function-Displays*) integriert und wird von der Crew nur verschmolzen als gemeinsame UAV-Funktionalität wahrgenommen, die auftragsbasiert kommandiert und ausgeführt wird.

Abbildung 4.21 zeigt beispielhaft die Nutzung des Produkts des Automationsgrades *„VideoAssisted“* auf dem MFD des Kommandantenarbeitsplatzes.

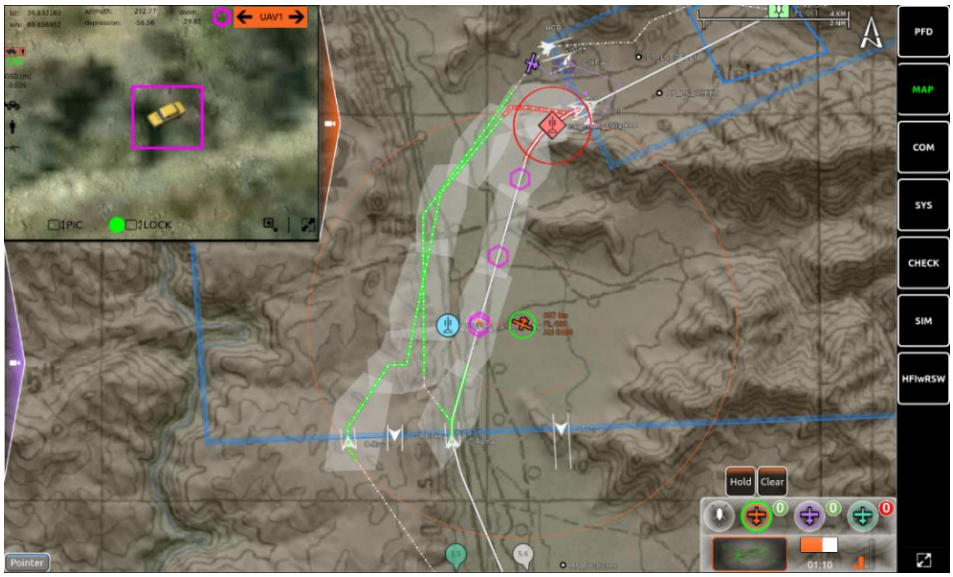


Abbildung 4.21: Der Automationsgrad "*VideoAssisted*" annotiert Objekte im Videostream (oben links), während mit UAV1 (orange) ein Bodenobjekt beobachtet wird.

Die *TacticalMap* (Kartendarstellung in Abbildung 4.21) dient ebenfalls zur zeitlich entzerrten Repräsentation der Aufklärungsdaten der UAVs. Dabei erfolgten die Ergebnisrückführung und visuelle Darstellung sowie die automatische Fusion und Integration der Aufklärungsprodukte in das taktische Lagebild. Dadurch wird den Kommandanten eine geschlossene, ergebnis- und nutzerorientierte Darstellung der aktuellen Aufklärungsdaten auf den auf MFDs bereitgestellt. Auf den Routen gefundene *Target Candidates* oder bereits durch die automatisierte Objekterkennung identifizierte Objekte werden ebenso auf den Teppichen der UAVs visuell dargestellt (Abbildung 4.21).

Dabei werden durch das maschinelle System eigenständig detektierte und identifizierte Detektionen im Automationsgrad „*Tactical Assisted*“ durch normierte *Taktische Zeichen* [U.S. Department of Defense, 2008] gemäß STANAG visualisiert (Beschreibung siehe Kapitel 3.5.3). Im Falle unsicherer Identifikationsleistung erfolgt die Darstellung der Produkte des Automationsgrades „*Map Assisted*“ mit *Target Candidates* (siehe Kapitel 3.5.2), welche durch den Kommandanten bewertet und identifiziert werden müssen.

Durch eine Schulung (Kapitel 4.6.1) der Bedeutung der Daten wird vorab sichergestellt, dass die Kommandanten die Kritikalität erkennen und die unidentifizierten Objekte im Sinne der eigenen Sicherheit bearbeiten. Dabei wird dem Kommandanten die Möglichkeit geboten, die Perzeptionskette auf eigene Initiative hin durch die Erbringung und die Eingabe eigens erbrachter Identifikationsleistung zu vervollständigen. Die zugehörigen Eingabemodalitäten werden ebenso vorab geschult.

Zur Durchführung einer manuellen Identifikation werden den Kommandanten zwei Werkzeuge auf den *MFDs* bereitgestellt, ein Interaktionselement (objektweise über das Kartensymbol zugänglich) sowie einen globalen Bildspeicher (Sammlung aller *Target Candidates*).

4.4.6.3 Mechanismen zur Involvierung des Operateurs

Die **reguläre Involvierung** des Kommandanten erfolgte dabei passiv visuell, indem das Vorkommen unsicherer Detektionen durch die Symbolik der *Target Candidates* kommuniziert wird (Abbildung 3.8 in Kapitel 3.5.2). Dabei steht ein möglichst geringes Störpotential der Arbeitsabläufe des Kommandanten durch die Automation sowie die passive Meldung im Vordergrund. Abbildung 4.22 zeigt das auf der taktischen Karte bereitgestellte Interaktionselement zur Durchführung des Identifikationsprozesses (Bildauswertung und Identifikationseingabe) durch den Kommandanten, welches durch Anwahl jedes *Target Candidates* aufgerufen werden kann.

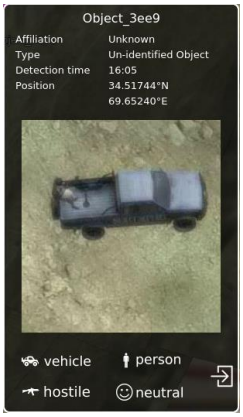


Abbildung 4.22: Interaktionselement auf taktischer Karte zur Objektidentifikation.

Zur akuten Gefährdungsminimierung des Helikopters beim drohenden unbemerkten Überflug nicht-identifizierter *Target Candidates* kann systeminitiiert eine explizite, **proaktive Involvierung** des Kommandanten durch Modifikation der Benutzerschnittstelle (Displayautomation) ausgelöst werden.

Dabei soll während der Messflüge eine Minimierung und Relaxation der *Workload* des Kommandanten durch das *variable Automationssystem* erfolgen, falls ein erwarteter Anstieg der globalen Beanspruchung und damit der Belastung absehbar[75] werden. Zur Ermittlung der Kritikalität wurde ein Katalog an einzelnen, situativen Gegebenheiten aufgestellt und implementiert. Drei Kriterien kommen für die Auslösung des proaktiven Interaktionsmechanismus zur Geltung:

- **Tätigkeiten durch die Handhabung der Aufklärungsergebnisse** sind in der projizierten Aufgabenbelastung in ([Honecker & Schulte, 2017a], [Brand & Schulte, 2018], [Honecker, 2021]) vorhanden.
- Es gibt zwei parallellaufende Aufklärungsaufträge der UAVs (ein **hohes Aufgabenaufkommen und eine einhergehend hohe Beanspruchung** durch die Handhabung der Aufklärungsergebnisse wird erwartet).
- Tatsächliche Vorkommnisse von *Target Candidates* mit **Involvierungsbedarf des Kommandanten** auf der primären Flugroute (bestimmt durch Annäherungskriterium).

Dabei wird auf dem *MFD* ein Identifizierungswerkzeug zur gebündelten Abarbeitung der *Target Candidates* eingeblendet, wobei die nicht-identifizierter Objekte auf der Helikopterroute vorsortiert in einem Bildspeicher repräsentiert werden. Die Identifizierungsleistung des Kommandanten wird aktiv eingefordert. Damit soll die noch unvollständige Perzeptionskette für mögliche bedrohliche Bodenobjekte rechtzeitig vom Kommandanten vervollständigt werden.

Abbildung 4.23 (oben links) zeigt das proaktiv zur Anzeige gebrachte Interaktionselement zur Durchführung des Identifikationsprozesses (Bildauswertung und Identifikationseingabe) durch den Kommandanten.

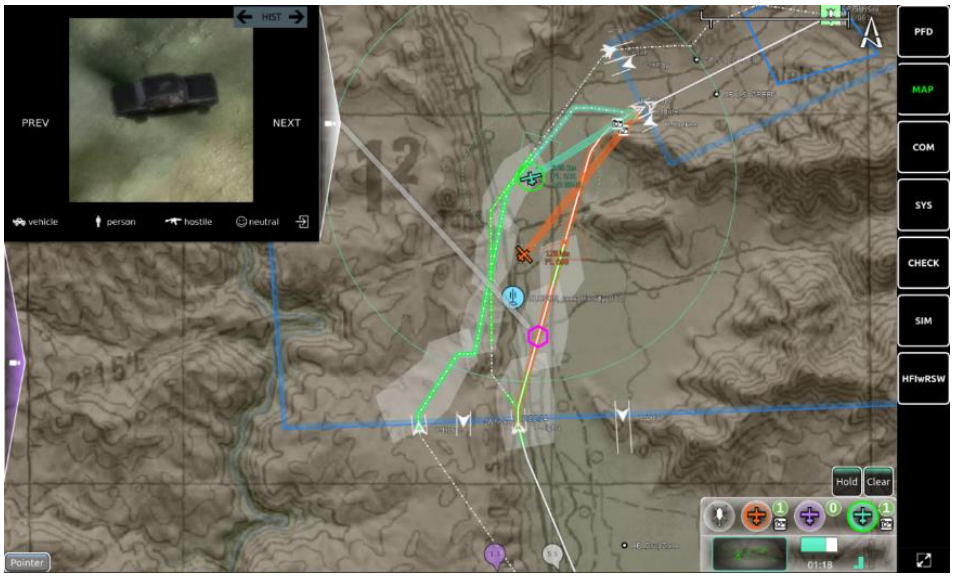


Abbildung 4.23: Bildspeicher (oben links) als proaktiv präsentiertes Interaktionselement mit Verweis auf zugehörigen Fundort des Objekts.

Diese proaktive Involvierung kommt nur dann zur Anwendung, wenn der Kommandant die passiv gemeldeten *Target Candidates* aufgrund der Aufgabenbelastung oder der vorherrschenden Displaykonfiguration des MFDs zu spät oder gar nicht wahrzunehmen vermag.

[75] Die Ermittlung erfolgt anhand externer Komponenten und Module eines Pilotenassistemzsystems ([Honecker & Schulte, 2017b], [Brand, Rudnick, & Schmitt, 2018])

4.5 Versuchspersonen

An der Experimentalkampagne nahmen acht Helikopterpiloten und -kommandanten teil, welche durch die Bundeswehr ausgebildet wurden und fast durchgängig Einsatzerfahrung in ihrer Rolle mitbrachten. Diese hochspezialisierte Expertengruppe bestand aus einem aktiven und sechs ehemaligen Militärpiloten, die somit über das notwendige taktische Wissen und militärische Einsatzerfahrung für die realitätsgetreue Durchführung der Messflüge verfügen.

Zur Durchführung der Kampagne wurden die Teilnehmer in vier Crews, bestehend aus jeweils einer Piloten- und Kommandantenrolle, eingeteilt. Dabei wurde innerhalb jeder Crew vorab die Rollenverteilung im Cockpit vorgegeben. Damit wurden die Rolle des Kommandanten (*Pilot -in-Command*, *PIC*) und die Rolle des Piloten (*Pilot Flying*, PF) festgelegt. Diese Rollenverteilung wurde aufgrund der Komplexität des Versuchs über den gesamten Verlauf beibehalten. In der Rolle des Kommandanten wurden nur Versuchsteilnehmer eingesetzt, welche über Einsatzerfahrung verfügten.

Tabelle 12 zeigt die Merkmale, welche die Probandengruppe charakterisiert.

Merkmal	**Min.**	**Max.**	$\bar{x}$	σ
Alter Probanden (Jahre)	31	59	50,4	9,2
Flug- und Einsatzerfahrung (PF + PIC) (Stunden)	535	6850	3933	1807
Einsatzerfahrung Kommandanten (Stunden)	2930	4920	3937	804
Einsatzerfahrung Piloten (Stunden)	0	3000	2180	708

Tabelle 12: Merkmale der Probandengruppe.

Die zur Führung der UAVs zum Aufklärungseinsatz notwendigen Fähigkeiten und Anforderungen, welche dem Kommandanten durch den MUM-T Kontext zusätzlich auferlegt wurden, stellten für alle Versuchsteilnehmer neue Aufgaben dar. Diese wurden vorab im Rahmen eines vor den Messmissionen stattfindenden Tutoriums geschult und antrainiert (siehe Kapitel. 4.6.1).

Die gesamte Durchführung des Experiments wurde an diese hochspezialisierte Expertengruppe angepasst. Es wurde sichergestellt, dass die Probandengruppe alle im Rahmen der Kampagne auftretenden Darstellungen und Fachbegriffe versteht und keine Unsicherheiten hinsichtlich der Versuchsdurchführung bestehen.

4.6 Ablauf der Experimentalkampagne

Im Folgenden werden der Aufbau und der Ablauf der gesamten Experimentalkampagne beschrieben.

Abbildung 4.24 zeigt das schematische Vorgehen und den Ablauf der experimentellen Evaluierung.

Dabei wurde den Teilnehmern vor Beginn der Kampagne ein Benutzerhandbuch [Weinmann et al., 2016] zum Selbststudium übersandt, welches die angebotenen Funktionalitäten sowie die Darstellungsformate der Aufklärungsdaten (Kapitel 3.5 und 3.7) im Helikoptercockpit detailliert beschreibt.

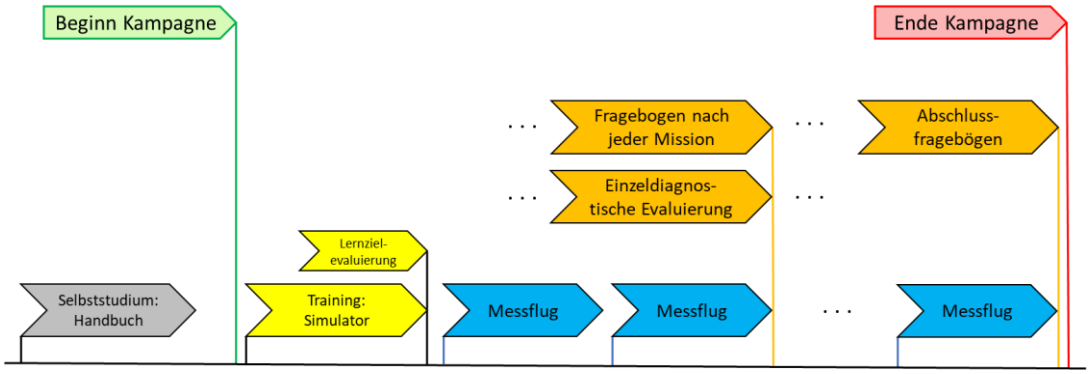


Abbildung 4.24: Vorgehen der experimentellen Evaluierung.

Zu Anfang der Experimentalkampagne wurde jede Crew durch ein praktisches Training [Weinmann, 2017] geschult, dessen Erfolg mit einer Lernzielkontrolle bestätigt wurde (Kapitel 4.6.1). Anschießend erfolgte die Durchführung der Messflüge. Nach jedem der Messflüge erfolgte zur Evaluierung eine Datenerhebung mittels Fragebögen als auch eine videobasierte, einzeldiagnostische Evaluierung einzelner, relevanter Situationen des jeweiligen Messflugs. Zum Ende der Kampagne wurden weitere Daten durch Abschlussfragebögen Fragebögen erhoben. Die im Experiment erfassten Daten und verwendeten Fragebögen werden in Kapitel 4.7 erläutert.

Für alle Besatzungen und Versuchsteilnehmer wurde die gleiche Reihenfolge der Experimentalmissionen gewählt. Nach einem Training und mehreren, kürzeren Übungsmissionen fanden insgesamt sechs Experimentalflüge statt. Jede Messung beinhaltete das Absolvieren eines Szenarios (siehe Kapitel 4.3.3) und umfasste die Phasen der

- Missionsvorbesprechung (*Briefing*),
- Missionsdurchführung (*Experimentalflug*) und
- Missionsnachbesprechung (*Debriefing*)

mit abschließender paralleler Befragung und Auswertung. Nach der letzten Experimentalmission wurde mit jeder teilnehmenden Crew eine Befragung zu den *Variablen Automationsgraden zur Routenaufklärung* durchgeführt. Weitere Details dazu werden in Kapitel 4.7 dargestellt.

4.6.1 Training

Zur Vorbereitung der Crews auf die MUM-T Messflüge wurde ein zweitägiges Training mit schriftlicher Lernzielkontrolle entwickelt [Weinmann, 2017], welches jeder Proband durchlief. Das Training umfasste ein Tutorial sowie vier kompakte Trainingsmissionen mit ansteigender Komplexität.

Alle Kommandanten erhielten im Rahmen des Trainings eine dedizierte Schulung zum Einsatz der *Variablen Automationsgrade zur Routenaufklärung*, wobei sie interaktiv über alle Cockpitfunktionen, Automationsgrade, deren Anwendung sowie die komplette Bedienung der Sensorführung unterrichtet wurden [Weinmann, 2017]. Ebenso erfolgte eine detaillierte Schulung der Datenformate und Darstellungsmodalitäten der Aufklärungsdaten, wie in Kapitel 3.5 und 4.4.6 beschrieben.

4.6.2 Briefing

Die Missionsvorbesprechung wurde in Form einer Präsentation mit Zwischenfragen gehalten. Dabei wurde nach militärischem Vorbild für jede Mission die momentane Lage, mögliche Bedrohungen, der Auftrag, Einzelheiten der Durchführung, die Wetterlage sowie benötigte Funkfrequenzen kommuniziert. Die Briefings [Winkler, 2016] dienten der Einleitung des Auftrags, der Vermittlung der Ziele und des gewünschten Ablaufs sowie zusätzlich der Steigerung der Immersion.

4.6.3 Durchführung der Experimentalflüge

Während des Fluges wurde das Cockpit durch einen lichtdichten Vorhang vom Labor getrennt, um Störungen der Immersion zu vermeiden. Durch eine Sprechfunkgegenstelle wurden der simulierte Flugfunk und der Kontakt mit Bodentruppen abgewickelt. Über diesen Kanal konnten bei Bedarf auch Anweisungen der Experimentatoren an die Crew weitergegeben werden.

Die Durchführung und der Ablauf eines einzelnen Experimentalflugs wurden in Kapitel 4.4.6.1 dargestellt.

4.6.4 Debriefing

Im Anschluss an jede Mission wurden beide Piloten zuerst gemeinsam über den Gesamteindruck und allgemeine Missionseigenschaften und anschließend einzeln zu spezifischen Situationen innerhalb der Mission befragt. Dabei standen im Bereich der Variablen Automationsgrade zur Routenaufklärung besonders der Erkenntnisgewinn über Aspekte der Adaptivität des Automationssystems und dessen Adaptierbarkeit im speziellen durch die *manuellen Eingriffe* im Vordergrund.

4.7 Erfasste Daten

Währen der Durchführung des Experimentalkampagne wurden sämtliche Daten und Systemnachrichten zwischen den Softwaremodulen in Datenloggern aufgezeichnet. Der gesamte Versuchsaufbau wurde zusätzlich von zwei externen Kameras abgefilmt, um im Nachgang die Auswertungsmöglichkeit aus einer externen Perspektive zu schaffen.

Die aufgezeichneten Status- und Systemdaten wurden dann bereits während der laufenden Kampagne zur retrospektiven, videobasierten Auswertung in den Debriefings (Kapitel 4.6.4) genutzt, wobei einzelne Situationen gezielt aufgerufen und gemeinsam mit den Kommandanten rekapituliert wurden. Dies erfolgte mittels einer Zeitleiste, bei welcher sämtliche Video-, Audio- und Interaktionsdaten für einen interessanten Zeitpunkt synchronisiert ausgegeben und in einem Analysetool auf Bildschirmen dargestellt werden konnten.

Die Daten umfassen dabei:

- Blickbewegungsmessung und Interaktionen der Crew mit den Systemen (berührungssensitive Benutzeroberflächen, Knöpfe, Displays),
- Angezeigte Datenformate der Aufklärungsdaten (Produkte der Automationsgrade),
- Zustände und Ausgaben des variablen Automationssystems, Zustand der Bedienoberflächen
- Positionen und Zustand der taktischen Elemente (insbesondere die visualisierten Symbole der Produkte der Automationsgrade),
- Videoaufzeichnung der Bildschirminhalte und Außensicht, des Cockpits und der beiden Einzelarbeitsplätze.

Eine Bewertung des Variablen Automationssystems zur Routenaufklärung durch die Kommandanten erfolgte nach jeder geflogenen Experimentalmission, zusätzlich wurden durch individuelle, gezielte Befragungen Details zum spezifischen Nutzungsverhalten in der jeweiligen Mission ermittelt.

Am Ende der Versuchswoche erfolgte die subjektive Bewertung des Automationssystems durch Kommandanten mittels einem Gesamtfragebogen zur Einstufung und Bewertung der Systemfunktionen und insbesondere der visuellen Repräsentationen der Aufklärungsdaten. Zusätzlich dazu erfolgte die Ermittlung und Bewertung der Benutzerschnittstelle getrennt davon, um eventuelle Schwächen bei deren Gestaltung und Umsetzung von den Untersuchungsaspekten abzukoppeln.

Die Fragebögen zur Evaluierung der variablen Automationsgrade umfassen

- Beanspruchung nach NASA-TLX [Hart & Staveland, 1988], nach jeder Mission
- Einen individuell erstellten, ausführlichen Abschlussfragebogen zur Evaluierung der Variablen Automation am Ende der Kampagne (Anhang E1)
- Einen individuell erstellten, ausführlichen Abschlussfragebogen zur Evaluierung der Benutzerschnittstelle im Cockpit am Ende der Kampagne (Anhang E2)
- Einen individuell erstellten, kompakten Fragebogen zur Evaluierung jeder geflogenen Mission (Anhang E3).

Kapitel 5

Evaluierung und Ergebnisse

Im Folgenden werden die Ergebnisse der in Kapitel 4 erläuterten Experimentalkampagne dargelegt. Eingangs werden die herangezogenen Evaluierungs- und Visualisierungswerkzeuge genannt. Danach wird zunächst die Erfüllung Rahmenbedingungen abgefragt, um die Verwertbarkeit und Vergleichbarkeit der Messungen zu bestätigen. Anschließend werden die Untersuchungsergebnisse der Operationalisierung (aus Kapitel 4.1) sowie der Evaluierung der Systemergonomie dargestellt.

5.1 Evaluierungs- und Visualisierungswerkzeuge

Die Aufbereitung der Messdaten und deren Visualisierung erfolgte mittels der Programmiersprache *Python* [Python Core Team, 2019; Van Rossum & Drake Jr, 1995] und den Softwarebibliotheken *Matpoltlib* [Hunter, 2007], *NumPy* [Harris et al., 2020], *Pandas* [McKinney, 2010] sowie *SciPy* [Virtanen et al., 2020].

Zur Visualisierung der statistischen Daten wird überwiegend das Box-Plot bzw. die Kastengrafik (*Box-Whisker-Diagramm*) ([McGill, Tukey, & Larsen, 1978], [Wickham & Stryjewski, 2012]) verwendet. Dabei werden die Verteilung der Merkmale und deren Ausprägungen mit Streuungs- und Lagemaßen grafisch durch

- Rohdaten (rote Kreuze),
- drei Quartile (die mittleren beiden sind Box mit 50% der Stichproben, grüne Box),
- Median $\tilde{x}$ (Zentralwert),
- arithmetische Mittel $\bar{x}$,
- Streuungsmaß durch Antennen (*Whisker*),
- minimalen und maximalen Werten x_{min} und x_{max},
- Ausreißer (nicht Ableitung der Kenngrößen mit einbezogen, blaue Punkte)

dargestellt.

Zur subjektiven Einstufung von Sachverhalten durch die Probanden werden *Likert-Skalen* ([Rost, 1996], [Döring & Bortz, 2016]) mit 5 und 7 Punkten herangezogen, deren Daten werden tabellarisch und anhand von Balkendiagrammen aufbereitet und visualisiert.

5.2 Bestätigung der Rahmenbedingungen

Im ersten Schritt wurden die Vorgaben und Eigenheiten der einzelnen Missionen sowie die Eignung der Simulationsumgebung durch die Crews bewertet, um sicherzustellen, dass diese ein realistisches Gesamtempfinden hatten und eine hohe Immersion während der Experimentaldurchführung erfuhren. Zusätzlich wurde die Belastung zwischen den einzelnen Missionen und den Crews abgefragt, um nachfolgend die einzelnen Situationen und Ereignisse der Szenare miteinander vergleichen und aufrechnen zu können. Anhand der Bewertung der Missionen durch die Crews werden nachfolgend die Aspekte einer ausreichend hohen Immersion, der handhabbaren Schwierigkeit des Gesamtexperiments sowie einer dabei nicht ausufernden Beanspruchungssituation evaluiert.

5.2.1 Realismus und Immersion

Die Szenarios wurden im Hinblick auf ihren Realismus einzeln durch die Versuchsteilnehmer bewertet. Zusätzlich wurden der generelle Ablauf der Missionen und die Realitätstreue der Simulation mittels Fragebögen ermittelt. Dabei kamen Likert-Skalen [Döring & Bortz, 2016] im Wertebereich von 1 (negativ) bis 7 (positiv) zum Einsatz.

Abbildung 7.11 zeigt das Ergebnis der Bewertung des Realitätsgrades sowie der erfahrenen Immersion durch die Crews. Die Szenarien wurden durchgehend als sehr gut und realistisch bewertet ($\bar{x}$=5,6 / σ=0,7). Die gleiche Wertung wurde für den Missionsablauf abgegeben ($\bar{x}$=5,3 / σ=0,8). Die Güte der Simulationsumgebung erhielt durchschnittlich ebenfalls noch eine gute Bewertung ($\bar{x}$=5,0 / σ=1,0), was die Zweckerfüllung des Experiments sicherstellt.

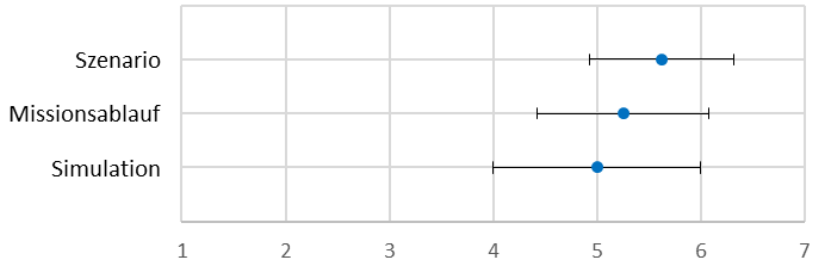


Abbildung 7.11: Einschätzung des Grades des Realismus der Simulationswelt durch die Crews.

Hinzu kam eine separate Bewertung des Missionsbriefings (vgl. Abschnitt 7.1.4), als zentraler und wichtiger Teil der Immersion und des Missionsablaufs. Das Briefing wurde dabei generell als geeignet erachtet ($\bar{x}$=6,1 / σ=0,6), jedoch teilweise als etwas zu kurz ($\bar{x}$=4,25 / σ=0,4). Größtenteils wurde das Briefing als ausreichend vollständig ($\bar{x}$=5,38 / σ=1,1) und in der dargebrachten Form zweckmäßig für die Durchführung und Erfüllung der Experimentalmissionen betrachtet ($\bar{x}$=5,75 / σ=0,66).

Die Simulationswelt, die Szenare inklusive der Missionen sowie die zur Durchführung der Missionen zur Verfügung gestellten Informationen wurden von den Crews überwiegend als realistisch betrachtet. Dabei ermöglichte die Simulations- und Cockpitumgebung der Experimentalumgebung einen ausreichend hohen Grad an Immersion.

5.2.2 Vergleichbarkeit

Zur Sicherstellung der Vergleichbarkeit der Daten aus den einzelnen Missionen ist es aufgrund der kleinen Stichprobe von lediglich vier Kommandanten (Kapitel 4.5) notwendig, etwaige Abweichungen zu erkennen und gegebenenfalls bei der weiteren Auswertung der Daten zu berücksichtigen.

Abbildung 5.1 zeigt die subjektiv empfunden Belastung aller Versuchsteilnehmer (Kommandanten), einzeln aufgeschlüsselt für alle Missionen. Der ermittelte Beanspruchungsindex nach NASA-TLX [Hart & Staveland, 1988] lag im Mittel zwischen 51,0 % und 59,4 % und weist keine signifikanten Unterschiede auf.

Laut den Einschätzungen der Probanden wurden die gestellten Experimentalmissionen im Nachhinein als ähnlich belastend wahrgenommen.

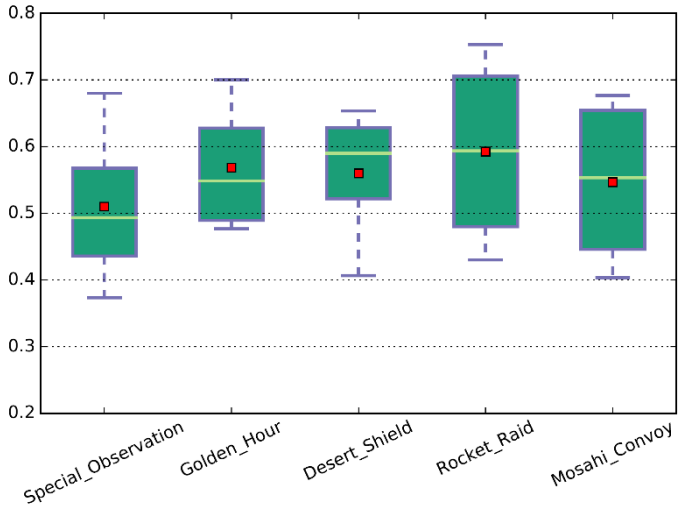


Abbildung 5.1: Prozentualer Beanspruchungsindex für alle Kommandanten nach NASA-TLX über alle Missionen hinweg.

Zusätzlich wurde der jeweilige Beanspruchungsindex der einzelnen Kommandanten über alle Missionen hinweg ermittelt (Abbildung 5.2). Dieser lag ebenfalls im moderaten Bereich zwischen 52 % und 58 %. Auch hier war kein signifikanter Unterschied zwischen den Versuchspersonen feststellbar; ein Besatzungsmitglied der Crew2 gab eine hohe Technikaffinität an, was sich offensichtlich positiv in dessen Einschätzung der erfahrenden Beanspruchung niederschlägt.

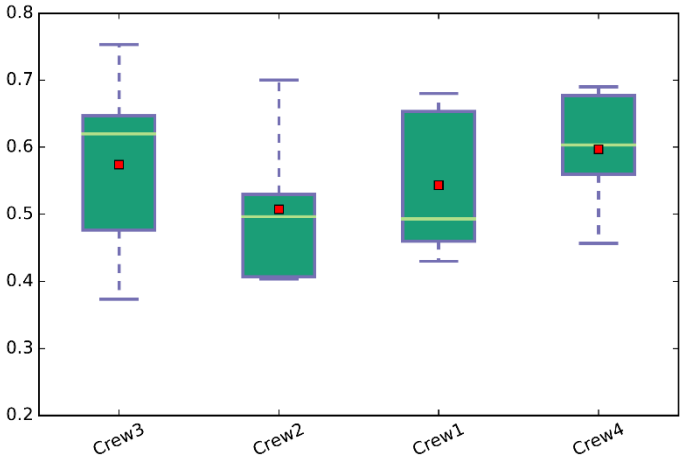


Abbildung 5.2: Beanspruchungsindex nach NASA-TLX für die Kommandanten über alle Missionen.

Der NASA-TLX Beanspruchungsindex lag über alle Versuchsteilnehmer und Missionen im mittleren Bereich von ca. 50 % bis 60 %, dabei traten keine signifikanten Ausreißer auf. Die ähnlichen Einschätzungen der Probanden zeigen, dass die Crews nach eigenen Angaben eine noch moderate und gleichmäßige Beanspruchung erfuhren.

Die Befragungen ergaben eine sowohl über die Probanden als auch die Experimentalmissionen hinweg akzeptable Beanspruchung nach NASA-TLX, was die Annahmen aus Kapitel 4.5 über die Probanden (hochspezialisierte Expertengruppe) bestätigt und die Voraussetzung für die ungewichtete Vergleichbarkeit der Experimentalflüge erfüllt.

5.3 Evaluierung der abhängigen Experimentvariablen

Im folgenden Unterkapitel werden die spezifischen Ergebnisse der Experimente zur Untersuchung der Variablen Automationsgrade vorgestellt. Dabei wird explizit auf die Variablen aus der Operationalisierung (Kapitel 4.1) Bezug genommen, um diese mittels messbarer Größen durch einzelne Kennzahlen zu evaluieren.

Dabei wurden zum einen mittels Datenloggern aufgezeichnete Datensätze (Kapitel 4.7) ausgewertet. Bei der Aufzeichnung erfolgte für jeden Zeitschritt der Simulation die Speicherung aller relevanten veränderlichen Größen mit deren aktuellem Wert. Dazu zählen beispielsweise die vom Operateur getätigten Interaktionen (visuell und haptisch), der Zustand und Betriebsmodus der Automation, die Aufklärungsergebnisse und im Cockpit visualisierte Daten sowie die taktische Lage mit den Positionen aller Akteure und Entitäten in der Simulation.

Zum anderen erfolgte eine subjektive Befragung. Dafür wurde sowohl ein individueller Gesamtfragebogen zur Abfrage der Einschätzung der Akzeptanz der Variabilität der Automation verwendet, welche nach der Durchführung aller Missionen von jeder Crew ausgefüllt wurde. Ebenso erfolgte die missionsspezifische Auswertung mittels Fragebögen nach jeder Mission, wobei ein individueller Fragebogen zu missionsspezifischen Situationen sowie der standardisierte NASA-TLX - Fragebogen zur Ermittlung der subjektiven Beanspruchung angewendet wurden (Kapitel 4.7).

Die Auswertung der Ergebnisse (extrahiert aus Logdaten und aus Auswertung der Fragebögen) bezieht sich alle 6 Missionen, welche jeweils von allen 4 Crews eigenständig durchgeführt wurden. Daraus ergeben sich 24 Messflüge.

Abbildung 5.3 zeigt dabei beispielhaft eine Momentaufnahme eines solches Messfluges auf einer taktischen Karte.

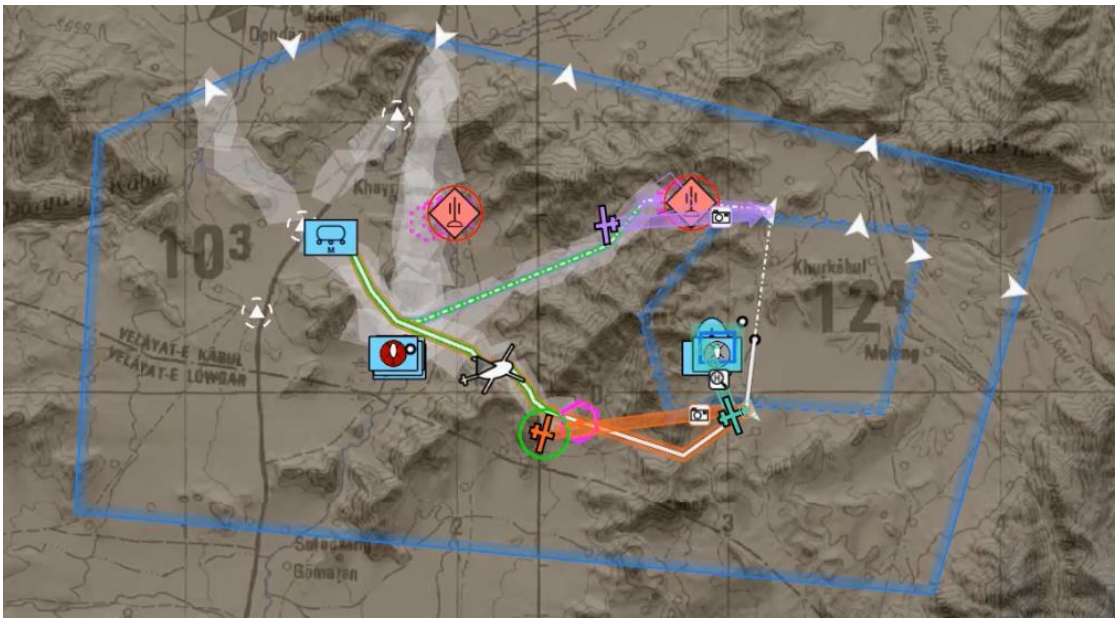


Abbildung 5.3 *Full-Mission*-Szenario mit drei UAVs und automatisierter Routenaufklärung.

Dabei sind der MUM-T - Verband, bestehend aus drei UAVs sowie dem Helikopter, bei der Routenaufklärung vorab des Helikopters zu sehen. Die schattierten Flächen zeigen dabei die durch die UAVs aufgeklärten Bereiche, welche durch die Variablen Automationsgrade zur Routenaufklärung zur Laufzeit erzeugt wurden.

5.3.1 Objektive Evaluierung aus Messdaten

Über die Messflüge hinweg wurde eine umfangreiche Statistik ermittelt, welche die wichtigsten Kenngrößen über die Varianzen zwischen den Missionen (Missionsdauer, Flugwege, Fluggeschwindigkeit) normiert und durch vergleichbare Kennzahlen darstellt.

Die Auswertung der erzielten Aufklärungsleistung durch Einsatz der variablen Automationsgrade sowie deren Effekte auf die Crew wird auf statistische Kenngrößen zurückgeführt und erfolgte durch maschinelles Post-Processing der Logdaten, welche bei der Durchführung der Missionen mitgeschrieben wurden. Die Maße steht dabei, falls möglich, in Relation zum Helikopter bzw. dessen Position.

Die Bedeutung der Entfernungs-, Zeit- und Leistungsmaße wird anhand Abbildung 5.4 beispielhaft und anschaulich verbildlicht. Abbildung 5.5 zeigt die zugehörige Legende.

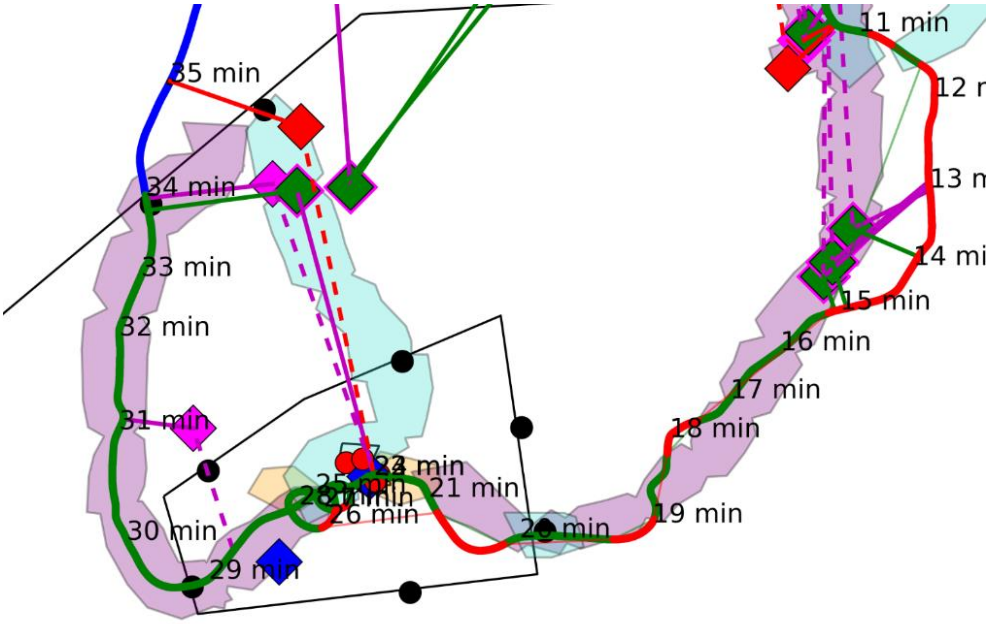


Abbildung 5.4: Visualisierung der Kenngrößen für die Bewertung und Vergleich der Missionen.

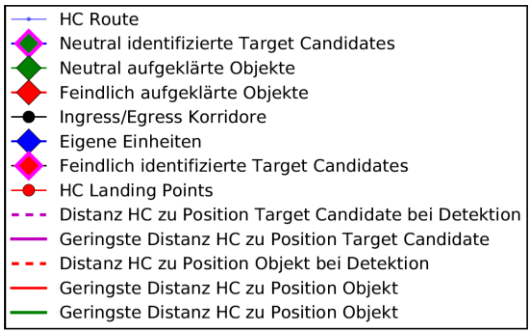


Abbildung 5.5: Grafiklegende zur Erklärung der Visualisierungen.

Im Einzelnen haben diese die folgenden Bedeutungen:

- Die aufgeklärten Flächen der UAVs werden als farbige Teppiche (orange, violett, türkisfarben) dargestellt.

- Der Flugweg des Helikopters außerhalb der HOA (*Helicopter Operation Area*) ist blau dargestellt, innerhalb der HOA für Flug über aufgeklärtem Gebiet grün und neben aufgeklärten Bodenflächen rot eingefärbt.
- Durch die Aufklärungsautomation entdeckte und ggf. identifizierte Bodenobjekte werden durch farbige Rauten dargestellt. Dabei stehen magentafarbene Rauten für noch nicht identifizierte *Target Candidates* und rote Rauten für automatisiert aufgeklärte und vom System identifizierte Bedrohungen. Rote oder grüne Rauten mit magentafarbenem Rand sind *Target Candidates*, welche während der Mission durch den Kommandanten als feindlich (rot) bzw. ungefährlich (grün) klassifiziert wurden.
- Die farbigen Linien, welche die Orte der Objekte mit der Helikopterroute verbinden, zeigen die Position des Helikopters (Linienende auf Route) bei der Detektion des zugehörigen Objekts (Linienende bei Objekt). Die Linienlänge steht für die Distanz in der georeferenzierten Visualisierung. Die Farben magenta, grün und rot der Verbindungslinie zwischen Objekt und Helikopterposition zeigen dabei Entfernungen zu *Target Candidates* sowie automatisiert identifizierten freundlichen, neutralen und feindlichen Objekten an.
- Eine gestrichelte Linie zeigt auf die Helikopterposition bei der Objektdetektion, eine durchgezogene Linie zeigt die minimale Distanz des Helikopters zum Objekt.
- Eigene Einheiten werden als blaue Rauten dargestellt, die Landepunkte des Helikopters als rote gefüllte Kreise, die HOAs und HOBs (*Helicopter Operating Areas* und *Helicopter Operating Boxes*) als schwarze Umrandungen der Gebiete, welche durch die Ein- bzw. Ausflugpunkte (schwarz gefüllte Kreise) angeflogen werden.

5.3.1.1 Aufklärungsleistung des Mensch-Maschine-Teams (AV1)

Abbildung 5.6 zeigt **die Erhebung der aufgeklärten Objekte** für alle 24 Messflüge, bezogen auf einen Messflug. Dabei wurden eine Anzahl von 4 bis 24 Objekten durch die Automation aufgespürt (1. Zeile: „Detektierte Objekte“ in Abbildung 5.6), welche anteilig als bereits vollständig identifiziert oder als unsichere Erkennung in Gestalt von *Target Candidates* präsentiert wurden. Durch die Automation eigenständig klassifiziert (2. Zeile: „Automatisierte Identifikationen“) wurden keines bis maximal 11 Objekte. Zwischen 3 und 16 Objekte wurden als *Target Candidates* präsentiert, welche noch durch den Kommandanten identifiziert werden mussten (3. Zeile: „*Target Candidates*“). Davon wurden zwischen 3 und 14 Objekte manuell durch den Kommandanten klassifiziert (4. Zeile: „Manuelle Identifikationen“), und am Ende einer Mission sind keines bis 6 Objekte als un-identifiziert übrigblieben (5. Zeile: „Ausgelassene Identifikationen“).

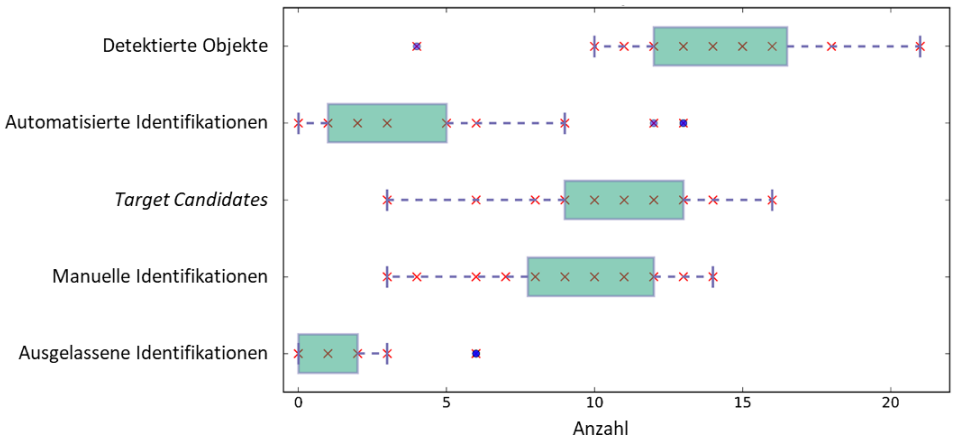


Abbildung 5.6: Anzahl der detektierten Objekte, deren Eigenschaften zur Präsentation sowie der Handhabung durch den Kommandanten während einzelner Messflüge.

Gesamt wurden über alle Messflüge 351 Objekte durch die Aufklärungssysteme entdeckt, von denen 260 manuell identifiziert werden mussten, wobei 29 davon durch die Kommandanten ausgelassen wurden. Diese *Target Candidates* wurden meist absichtlich ignoriert, weil sie beispielsweise auf

einer nicht mehr benötigten, aufgeklärten Route lagen und deshalb nicht mehr überflogen werden mussten oder für den Helikopter auf Grund der Entfernung als nicht relevant eingestuft wurden. Insgesamt 91 Objekte wurden bereits als vorklassifiziert präsentiert. Das entspricht einem Anteil von 74,07 % an rein detektierten *Target Candidates* und 25,9 % maschinell identifiziert präsentierten Objekten. Die Anzahl der von den Kommandanten erfolgreich nachidentifizierten Objekte beträgt 241, was einem Anteil von 92,69 % aller *Target Candidates* entspricht.

Die **Größe der aufgeklärten Flächen**, welche durch die UAVs automatisiert abgesucht und voraufgeklärt wurden, ist in Abbildung 5.7 dargestellt. Die Gesamtgröße aller aufgeklärter Bereiche beträgt im Durchschnitt je Messflug ca. 140 km^2, was auf die einzelnen UAVs heruntergebrochen werden kann.

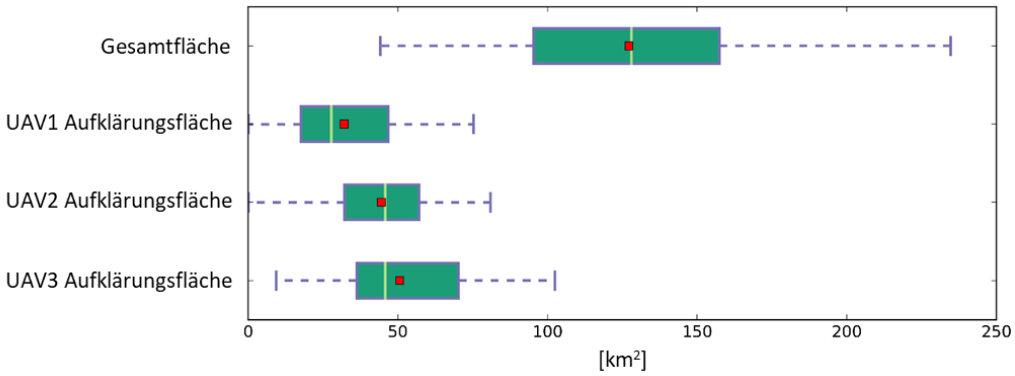


Abbildung 5.7: Größe der automatisiert aufgeklärten Bereiche einzelner Messflüge.

Die ungleiche Verteilung zwischen den UAVs lässt sich mit der verschiedenartigen Beauftragung mittels auftragsbasierter Führung, zeitweiser manueller Nutzung und Leerlaufphasen begründen. UAV3 wurde beispielsweise häufig mit der Suche von Landezonen im entfernten Zielgebiet der Mission beauftragt und hat auf dem Anflugweg zum Landegebiet die Anflugroute aufgeklärt. Auch konnte ein UAV, auf dem der Kommandant *manuelle Eingriffe* ausführte, während dieser Zeit automatisiert keine Suche betreiben, was dessen Anteil an der aufgeklärten Gesamtfläche schmälerte.

Die erreichten **Vorwarndistanzen des Helikopters zu Objekten zum Zeitpunkt der Detektion** zeigt Abbildung 5.8. Die Abstände sind die Distanzen zwischen dem Helikopter und den detektierten Objekten bei deren Detektion. Die Entfernungen [km] beziehen sich dabei auf die Luftliniendistanz zwischen dem Helikopter und dem detektierten Objekt bei dessen Erkennung und Meldung im Cockpit.

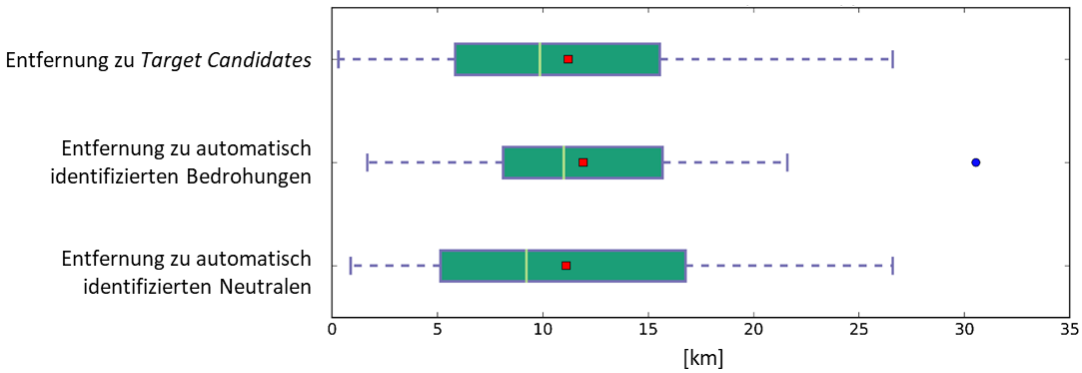


Abbildung 5.8: Vorwarndistanzen zu Objekten am Detektionszeitpunkt.

Die Abbildung zeigt, dass die Vorwarndistanz zu unidentifizierten Funden (*Target Candidates*) in 50 % der Fälle zwischen 5 und 15 km Betrug, für die automatisch identifizierten Bedrohungen lag dieser Wert sogar noch darüber. Die Verteilungen beruhen auf 246 Entfernungsdaten zu *Target Candidates* und 119 Entfernungen zu Bedrohungen.

Die erflogenen **Minimaldistanzen zwischen dem Helikopter und Objekten** zeigt Abbildung 5.9. Diese Distanzen zeigen, wie nah der Helikopter sich den jeweiligen Objekttypen tatsächlich angenähert hat.

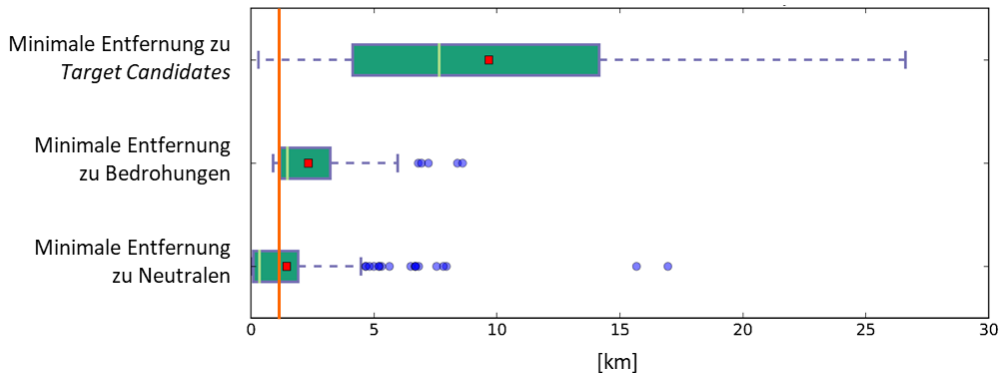


Abbildung 5.9: Minimaldistanzen zu Objekten.

Dabei ist zu sehen, dass wiederum für 50 % der Fälle die Annäherungsdistanz an noch unbekannte Objekte mindestens ca. 4 km betrug, bis diese durch den Kommandanten identifiziert wurden. Die Distanzen zu klassifizierten neutralen Objekten fallen sehr gering aus, da der Helikopter solche überflog. Die minimale Distanz zu klassifizierten Bedrohungen lag in 50 % der Fälle über 2 km, weitere Annäherungen sind nur aufgrund von Geländebeschränkungen oder zeitlichen Rahmenbedingungen aufgetreten. Die Verteilungen beruhen auf 246 minimalen Entfernungsdaten zu *Target Candidates* und 119 minimalen Entfernungen zu Bedrohungen.

Dabei zeigt Abbildung 5.9 den im Experiment angenommenen Waffenwirkradius eines *Man Portable Air Defense Systems* (*MANPADS*) als orangefarbenen Strich. Dieser wurde auf der Karte mit 1 km visualisiert (s. Abschlussbericht Teil I, [Schulte et al., 2018]), wurde allerdings im Nachgang von einem Kommandanten realistischer auf etwa 3km[76] beziffert.

Unter Betracht des visualisierten Radius von 1 km ergibt sich eine Anzahl von Unterschreitungen des Sicherheitsmindestabstandes von 2 Annäherungen an *Target Candidates* und 14 bedrohliche Objekte. Der Helikopter hatte sich also für 0,8% der *Target Candidates* und 11,8% der Bedrohungen innerhalb deren Waffenwirkradius befunden, das ergibt eine Verletzung des zu haltenden Mindestabstands bei 16 von 365 potentiellen Bedrohungen.

Die **Anteile des Fluges des HC über aufgeklärtem Gebiet** zeigt Abbildung 5.10. Die Ermittlung der Anteile erfolgte dabei zum einen anhand der zeitlichen Verteilung des Fluges sowie andererseits anhand der Strecke des Flugpfades innerhalb der HOAs. Die gesamte Flugzeit des Helikopters in den Einsatzgebieten (HOAs) beträgt 564,33 Minuten, die Gesamtpfadlänge in den HOAs beträgt 1018,839 NM.

Daraus ergeben sich über alle 24 Messflüge mindestens ca. 75 % Prozent der Zeit und 72,5 % der Strecke über aufgeklärtem Gebiet. Die niedrigen Werte (jeweils bedingt durch jeweils 4 Flüge, siehe rote Kreuze in Abbildung 5.10) resultieren hauptsächlich von der Transportmission des Verletztentransports, bei der sich die Kommandanten zugunsten der Kritikalität des Verletztentransports gegen die Anweisung entschieden, nur über aufgeklärtem Gebiet zu fliegen. Im

[76] Angabe eines Kommandanten, entnommen aus Interview

Mittel liegen die Messwerte bei ca. 92 und 93 %, in vielen Messflügen konnten noch höhere Raten, mehrmals sogar 100 % erreicht werden.

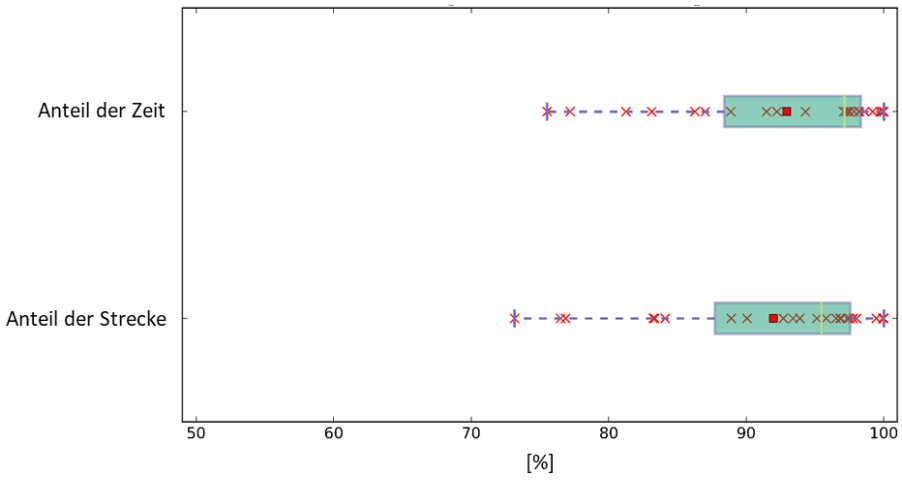


Abbildung 5.10: Anteile des Helikopterfluges über aufgeklärtem Gebiet.

Die **Performanz der Aufklärung** bzw. Multi-UAV-Performanz im MUM-T-Verband wird mit dem *Surplus* (Überschuss) der produzierten aufgeklärten Routenstücke als dimensionsloser Faktor dargestellt. Er wird durch den Quotienten der summierten Länge aller aufgeklärter Strecken (inklusive möglicher, paralleler Alternativen) und der Länge des tatsächlichen Flugpfades des Helikopters innerhalb aller Einsatzgebiete bestimmt. Abbildung 5.11 zeigt die erzielten Werte.

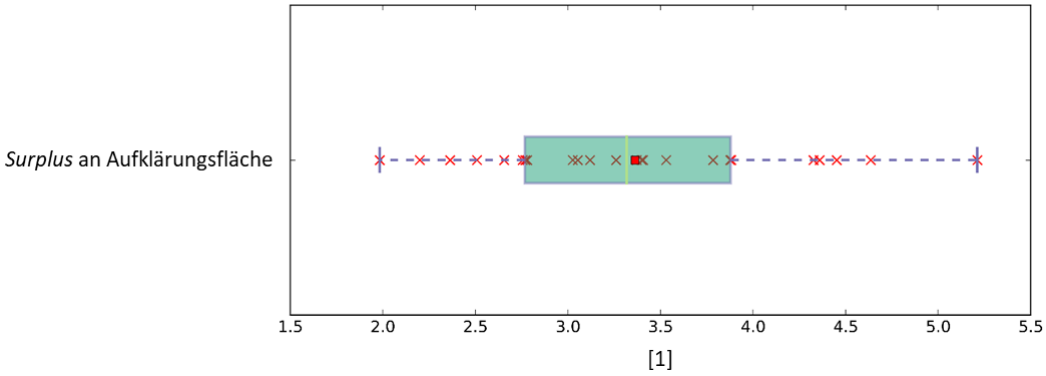


Abbildung 5.11: Überschuss (Surplus) an Aufklärungsfläche.

Der Median von ~3,4 zeigt dabei an, dass die 3,4-fache Länge der letztlich genutzten aufgeklärten Flugpfade durch die UAVs automatisiert aufgeklärt wurde. Das bedeutet, dass von der Betrachtung der Suchleistung her, der Überschuss an aufgeklärten Pfadlängen in allen Fällen für mindestens eine parallele Flugpfadalternative ausreichte (x_{min} = 2,0). Der Median und die untere Grenze des 50%-Anteils der Verteilung liegen bei Werten von über 3 bzw. bei 2,7. Damit könnten in 50% der Fälle sogar eine dritte Anflugalternative oder zwei Anflugalternativen und ein mindestens teilweise ein Rückflugpfad parallel aufgeklärt werden.

Die Streuung der Werte in der *Surplus*-Kenngröße zeigt allerdings auch, dass die Erzielung der Werte sowohl von den zeitlichen Koordinierungsfähigkeiten des Operateurs als auch von dessen Belastungssituation und den dynamischen und räumlichen Gegebenheiten der Mission abhängt. Zudem reichen in besonders weitläufigen Szenarien mit langen Pfadalternativen die drei UAVs nicht für wesentlich mehr parallele Aufklärung. Um in solchen Konstellationen mehr Aufklärungsfläche

zu erzielen, könnten mehr UAVs mitgeführt werden, was anderweitig jedoch Mehraufwand bedeutet.

Bewertung

Die Variable der Aufklärungsleistung kann anhand der erzielten Vorwanddistanzen sowie des erzielten *Surplus* an Aufklärungsfläche quantifiziert und bewertet werden. Die erzielten Vorwarndistanzen (der *Target Candidates*) lagen im Mittel bei ca. 10 km, was den Kommandanten eine stressfreie und rechtzeitige Bearbeitung der ihnen zugewiesenen Aufgabenteile ermöglichte. Da kein Überflug von unbekannten Objekten erfolgte, kann dieses Maß als vollständig erfüllt angesehen werden. Der deutliche Überschuss an aufgeklärten Flächen, der während den Missionen erzielt werden konnte (*Surplus* von ca. 3,4 im Mittel), spricht mit seinem absoluten Mindestmaß von 2,0 für eine vollständig erfüllte Systemleistung. Dadurch standen den Crews in jedem Messflug mindestens eine vollständige, abgesuchte Alternativroute zur Verfügung, was einen Anteil des Helikopterfluges von 93 % über aufgeklärtem Gebiet ermöglichte. Den Zusammenhängen liegen dabei je Messflug durchschnittlich ca. 140 km^2 abgesuchte Bodenfläche (entspricht über 20.100 Fußballfeldern) und insgesamt weit über 9 Stunden Flugzeit des Helikopters zugrunde, was die Reliabilität der Leistungsdaten unterstreicht.

Der Aufklärungsleistung des Variablen Systems liegt zugrunde, dass unsichere Detektionen mit einer Quote von ca. 74 % an die Kommandanten herangetragen wurden, welche von einem starr automatisierten System zumindest anteilig verworfen worden sein könnten. Die unvollständige Perzeptionskette wurde in 241 Fällen durch den Kommandanten erfolgreich restauriert, was einer Quote von über 92 % und damit einer nahezu vollständigen Erfüllung der Ziele entspricht.

Insgesamt kann zusammengefasst werden, dass das variabel automatisierte System eine hohe Aufklärungsleistung erzielen und die Kompensation maschineller Defizite erfolgreich demonstrieren konnte. Zudem wurde ersichtlich, dass durch den Ansatz die Ausbeute an vollständig aufgeklärten Objekten durch das gezielte Einbringen kognitiver menschlicher Leistung gesteigert werden kann.

5.3.1.2 Belastung des Kommandanten (IV3)

Um die zusätzliche Aufgabenbelastung des Kommandanten rekonstruieren zu können, werden die Anzahl an Identifizierungsaufgaben in Relation zu den Flugzeiten und Streckenlängen des Helikopters in den Operationsgebieten (*Helicopter Operation Areas*, HOAs) gesetzt. Dabei ergibt sich eine Abschätzung der zusätzlichen **Aufgabenbelastung** (*Taskload*), welche durch die Aufgaben der Identifizierungsprozesse sowie der Handhabung der Ergebnisdaten verursacht wird. Diese Dichte wird zum einen mit den Flugstrecken und zum anderen mit der Flugzeit sowie der Anzahl an Identifizierungsvorgängen pro Messflug bestimmt.

Die mittlere Länge des Flugpfades innerhalb der HOA zwischen den Identifizierungstätigkeiten betrug 2,24 nautische Meilen (NM), die Spanne reichte von 0,70 bis 5,04 NM.

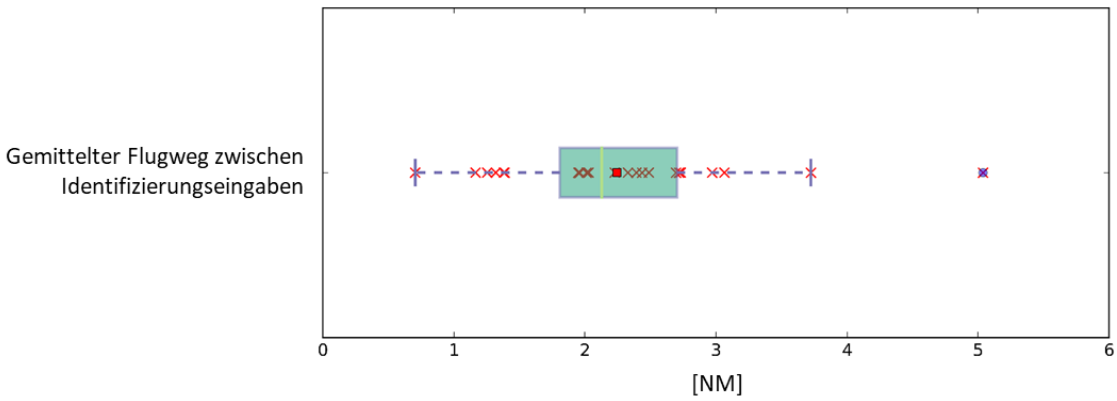


Abbildung 5.12: Gemittelte Entfernungen pro Identifizierungstätigkeit über alle Messflüge.

Abbildung 5.12 zeigt die Verteilung der gemittelten Entfernungen über alle Messflüge hinweg.

Die durchschnittliche mittlere Zeitdauer zwischen den zusätzlichen Identifizierungstätigkeiten des Kommandanten betrug 2,33 Minuten, der Bereich reichte von 1,1 bis 5,03 Minuten (Abbildung 5.13).

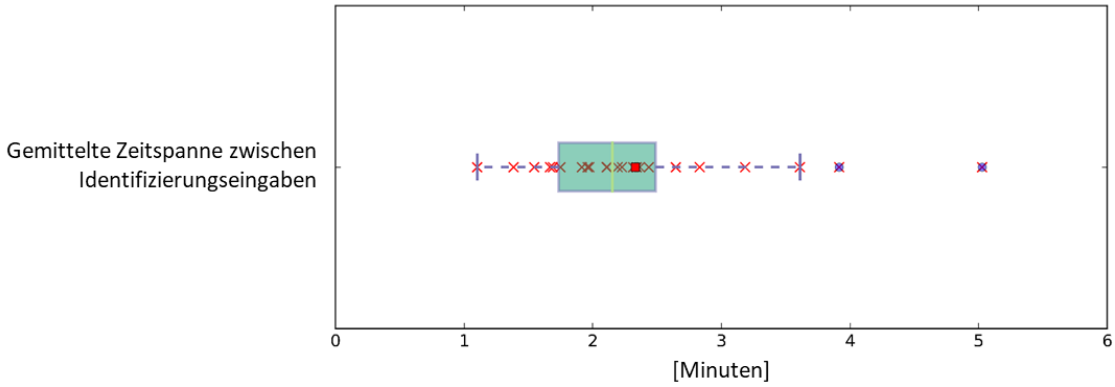


Abbildung 5.13: Gemittelte Zeitdauern zischen den Identifizierungstätigkeiten über alle Messflüge.

Besonders in Missionen mit einem hohen Objektvorkommen in Relation zur Missionslänge musste der Kommandant im Durchschnitt alle 66 Sekunden ein unsicher aufgeklärtes Objekt identifizieren.

Die **Reaktions- und Bearbeitungszeiten von Ergebnissen durch den Kommandanten** werden in Abbildung 5.14 dargestellt. Dazu wurden die Zeitdauern der Perzeption und Identifikation von *Target Candidates* durch den Kommandanten maschinell ermittelt. Die Zeitspannen stellen dabei die Differenz zwischen der Detektion (sowie der Anzeige im *MFD*) und der visuellen Perzeption (erstmalige Betrachtung) bzw. Bearbeitung (Identifikationsprozess mit Systemeingabe) durch den Kommandanten dar.

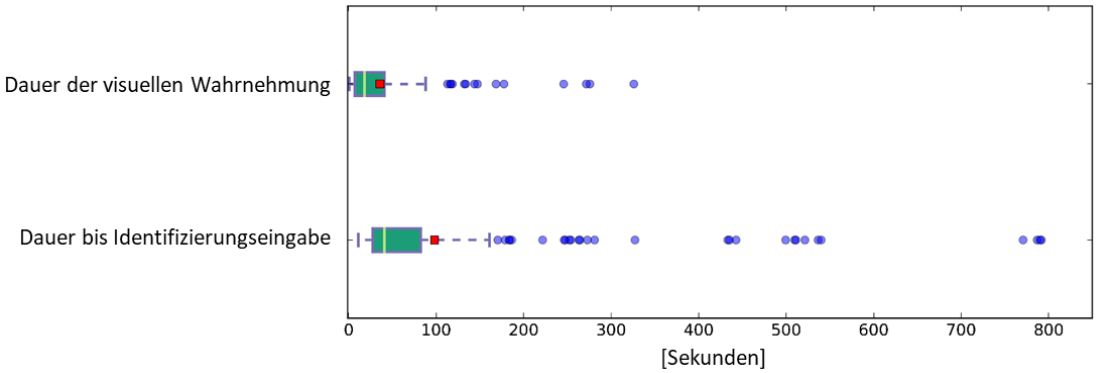


Abbildung 5.14: Zeitdauern der Perzeption und Identifikation von *Target Candidates* durch den Kommandanten.

Die Dauer bis zur Wahrnehmung der *Target Candidates* durch den Kommandanten lag dabei im Mittel bei 31 Sekunden (Median 18,2 Sekunden), bis zur manuellen Identifikationsaktion vergingen im Durchschnitt ca. 60 Sekunden (Median 40,9 Sekunden). Der Verteilung liegen 155 Messwerte der Dauer der visuellen Wahrnehmung und 231 Messwerte der Identifizierungsdauer zugrunde.

Die Erhebung der Zeitdauern-Werte der visuellen Perzeption (Abbildung 5.14, oben) erfolgte dabei anhand der Auswertung der Blickbewegungsdaten des Kommandanten auf den MFDs und ist deshalb tendenziell mit einem Fehler bzw. Unschärfe und Unvollständigkeit behaftet. Insgesamt

ergeben sich Werte von gemittelt 68 % (Median 77 %) der erfolgreichen Messbarkeit durch das Blickbewegungssystems. Zum anderen erfassen die Messungen nicht in jedem Fall die erstmalige Perzeption des Symbols auf der Karte, da aufgrund von Dynamik, Unschärfe oder impliziter negativer Beeinflussung der Blickbewegungsmessung durch den Probanden (Bewegung des Kopfes, Liedschlag, Zwinkern, Augenkneifen) auch eine erst spätere Betrachtung als messtechnisch erste registriert werden konnte. Dies schlägt sich in den blauen Punkten (Ausreißer) des Boxplots der visuellen Perzeptionsdauern nieder. Diese Ausreißer vereinigen die Mengen an messtechnisch nicht registrierten Erstbetrachtungen bzw. erstmaligen Wiederbetrachtungen und tatsächlich verspäteten Erstbetrachtungen, welche z.B. aufgrund der Betätigung des Kommandanten in anderen Aufgabenfeldern oder einer Displayeinstellung, welche die Symbole nicht enthalten hat, aufgetreten sind.

Bei dieser Auswertungsmethodik umfasst die Box mit 50 % aller Messgrößen Werte von 10 bis 30 Sekunden (Abbildung 5.14), bis die Kommandanten unidentifizierte Objekte auf dem MFDs erstmalig visuell wahrnehmen.

Die Bestimmung der Zeitspannen vom Auftreten der *Target Candidates* bis zur Identifikation durch den Kommandanten (Abbildung 5.14, unten) ist scharf und vollständig, da diese nicht auf der tendenziell fehlerbehafteten Blickbewegungsmessung basiert. Die Ausreißer (blauen Kreise) beim Boxplot der Zeitdauern der Identifikation liegen in Muster der Bearbeitung durch den Kommandanten begründet. Während des Experiments konnten Verhaltensmuster beobachtet werden, in denen die Kommandanten Identifikationsaufgaben wichtigeren Aufgaben, wie der Missionsmanagement oder dem Initiieren der Vorabaufklärung, hierarchisch unterordneten bzw. die Identifikationsaufgaben bewusst in Missionsphasen geringerer Aufgabenbelastung (*Taskload*) verschoben wurden. Zudem wurde in manchen Fällen die gebündelte Abarbeitung der angehäuften Identifikationsaufgaben präferiert, um weniger Kontextwechsel im Aufgabenumfeld vollziehen zu müssen. Objekte, die auf Alternativrouten detektiert wurden, wurden teilweise durch die Kommandanten ignoriert, wenn sie für den Verlauf der Mission keine weitere Rolle spielen, beispielsweise aufgrund deren Lokalisierung fernab zum Missionsverlauf. Manche Objekte wurden erst kurz vor dem Erreichen der Heimatbasis und nach dem eigentlichen Missionsgeschehen „aus Gründen der Neugier“[77] oder des „Pflichtbewusstseins“[78] oder ohne Vorliegen von missionstaktischen Gründen identifiziert.

Die 50 %-Box der Zeitdauern bis zur Identifizierungseingabe (Abbildung 5.14, unten) umfasst dabei Werte zwischen 25 und 80 Sekunden, bis die Kommandanten die auf den MFDs visualisierten Detektionsergebnisse verifiziert und identifiziert hatten. Darin wird auch abgebildet, dass manche Kommandanten auch die Abarbeitung der Identifikationen angesammelt haben, um diese gebündelt auszuführen. Dadurch konnten anstrengende Wechsel zwischen den Aufgaben vermieden werden. Die Verteilung der Werte zeigt, dass es den Kommandanten möglich war, zeitnah auf die Aufklärungsergebnisse reagieren zu können. Die Ergebnisse bestätigen die leichte Wahrnehmbarkeit der *Target Candidates* durch ihre saliente Symbolik ebenso wie die Flexibilität der Ergebnisdarstellung auf der taktischen Karte und die tiefe, nahtlose Integration der Aufklärungsfunktionalitäten in die Cockpitumgebung.

Bewertung

Die Belastung der Kommandanten (IV3) lässt sich anhand der aufgetretenen Aufgabendichte durch einen Zeitabstand von mindestens 66 bis 150 Sekunden pro Bewertungs- und Identifizierungsprozess im Mittel quantifizieren. Unter dem Situationsabbild sowie dem mentalen Abbild, welches die Operateure dabei ausprägten, ergab die mittlere Dauer der visuellen Wahrnehmung der *Target Candidates* von ca. 30 Sekunden, bis zur manuellen Identifikationsaktion vergingen im durchschnittlich ca. 60 Sekunden. Es zeigt sich, dass die Anforderungen des Ansatzes hinsichtlich der Aufgabendichte an die Operateure situativ durchaus hoch ausfallen können, und ein

[77] Zitat von Aussagen aus Interview
[78] Zitat von Aussagen aus Debriefings

akzeptables Maß für die Integrierbarkeit in ein bestehendes Aufgabenumfeld von über 2 Minuten im Mittel rekonstruiert werden konnte.

5.3.2 Subjektive Evaluierung mittels Fragebögen

Die subjektive Bewertung der variablen Automationsgrade bei der Routenaufklärung durch die Crews erfolgte mittels Fragebögen. Dabei wurde explizit die Evaluierung des Automationssystems von der Evaluierung der Mensch-Maschine-Schnittstelle getrennt, um eine Bewertung für die eigentliche Funktionalität der Automation von eventuellen Hürden der Bedienung abzugrenzen.

Die Befragung nimmt dabei explizit Bezug auf die Interaktionen des Kommandanten mit den Variablen Automationsgraden sowie die Darstellung der Aufklärungsprodukte im Cockpit und während des Fluges. Dazu zählen die Wahrnehmung der Darstellung der aufgeklärten Flächen, von Detektionen der UAVs, das Identifizieren unbekannter Objekte sowie die taktische Interpretation der Aufklärungsergebnisse für den weiteren Verlauf der Mission.

5.3.2.1 Beanspruchung des Kommandanten (AV3)

Tabelle 13 zeigt kompakt die wichtigsten statistischen Maße aller abgegebenen Einschätzungen subjektiv erfahrene, gesamtheitliche **Beanspruchung** durch die Probanden, welche mit dem NASA-TLX-Beanspruchungsmaß [Hart & Staveland, 1988] erhoben wurden.

	Mittel	Minimum	Maximum
Task Load Index [%]	55,3	37,3	75,3

Tabelle 13: Statistische Maße der TLX-Werte.

Die grafische Darstellung und getrennte Aufschlüsselung nach Missionen und Crews erfolgte bereits in Kapitel 5.2.2. Den Angaben der Probanden nach scheint es so, als sei die zusätzliche Beanspruchung durch die Führung der UAVs sowie den Empfang und die Bearbeitung der Aufklärungsergebnisse im Gesamtkontext an Beanspruchung vertretbar.

Dies wurde im Folgenden jedoch durch weitere Auswertungen hinterfragt.

Die Interaktion des Kommandanten mit den Automationsfunktionen erforderte Aufwendungen an **Anstrengung**, **Konzentration** und **Aufmerksamkeit**, welche zu **Beanspruchung** führen. Die folgende Ermittlung dieser Größen bezieht sich auf die Tätigkeiten, welche für die **Durchführung von Aufklärungsaufgaben** im Cockpit durchgeführt werden mussten. Dabei steht jeder Punkt für die Bewertung eines Kommandanten. Aussagen wie „gar nicht“ bzw. „voll“ geben dabei die Ablehnung oder Zustimmung der Testpersonen zur jeweiligen Hypothese an. Grün hinterlegte Felder bekräftigen eine positive Systembewertung, rot hinterlegte Felder decken Schwachstellen auf. Nicht farblich markierte Fragen sind Kontrollfragen, mit welchen die Abfragen plausibilisiert wurden.

Abbildung 5.15 zeigt die Einschätzung der Aufwendung an **Anstrengung** und **Konzentration** durch den Kommandanten, welche bei der Durchführung der Aufklärungstätigkeit im Cockpit empfunden wurde.

Dabei wurde die zur Aufgabenbewältigung geforderte Anstrengung als positiv eingestuft, für die geforderte Konzentration erfolgte eine gemischte Einstufung. Es zeigt sich aber, dass in diesem Themenblock eine kontroverse Einstellung über das generelle Vorhandensein einer Anforderung an Konzentration vorherrscht, was die gemischte Einstufung erklärt. Außerdem haben die Aufgaben, welche bei der Ergebnisrückführung in Cockpit anfallen, wie beispielsweise das Identifizieren unbekannter Objekte während des Fluges, stark involvierenden Charakter, und lassen sich schwer parallel mit anderen ausführen.

	gar nicht		*neutral*		*voll*
Anstrengung					
Die Erledigung der Aufgaben habe ich als anstrengend empfunden.	●	●●	●		
Die Erledigung der Aufgaben ist mir leicht gefallen.			●	●●	●
Konzentration					
Die angemessene Erledigung der Aufgaben erforderte Konzentration.	●		●	●●	
Die Erledigung der Aufgaben erforderte durchgehende Konzentration.	●		●	●●	
Es hat Konzentration erfordert, sich für Aufgabe relevante Informationen zu merken.	●	●	●	●	

Abbildung 5.15: Einschätzung der Aufwendung an Anstrengung und Konzentration durch den Kommandanten bei der Durchführung von Aufklärungsaufgaben.

Abbildung 5.16 zeigt die Einstufung der Aufwendung an **Aufmerksamkeit** bei der Durchführung der Aufklärungstätigkeiten.

	gar nicht		*neutral*		*voll*
Aufmerksamkeit					
Für die Erledigung der Aufgaben war aktive Aufmerksamkeit nötig.		●		●●●	
Um die Aufgaben zu erledigen, habe ich nicht viel Aufmerksamkeit aufwenden müssen.	●	●●●			
Mir ist es leicht gefallen, die für die Aufgabe relevanten Informationen herauszufiltern/wahrzunehmen.				●●●	●
Mir ist es leicht gefallen, mir alle für die Aufgabe relevanten Informationen zu merken.			●	●●●	
Mir ist es leicht gefallen, die Aufmerksamkeit auf die Aufklärungsaufgaben zu verlagern.				●●	●●

Abbildung 5.16: Einschätzung der Aufwendung an Aufmerksamkeit.

Der Aufwand an Aufmerksamkeit wurde von den Kommandanten mehrheitlich als hoch eingestuft, was sich durch den Charakter der Aufgaben begründen lässt. Die Bewältigung der Aufgaben geschah visuell und kognitiv, was bedeutet, dass die gesamte Aufmerksamkeit darauf gelenkt werden musste. Als positiv wurden jedoch die Aufwendungen für den Umgang mit den neuartigen Funktionen sowie die notwendige Verlagerung des Aufmerksamkeitsfokus darauf bewertet. Dies deutet auf eine hohe Bedienergonomie der Benutzerschnittstelle zum technischen System, ein hohes Situationsbewusstsein des Kommandanten über die Automation sowie einen gut handhabbaren Umgang in der Multi-Aufgabensituation im Cockpit hin. Offensichtlich fiel es den Probanden leicht, die neuen Funktionen im Cockpitumfeld einzusetzen.

Bewertung

Die durch die Aufgabenteilung gestellten Anforderungen ergaben eine geringe Anstrengung sowie ein moderater Bedarf an Konzentration bei der Durchführung von Aufklärungsaufgaben. Dabei wurde der Bedarf durchgängiger Konzentration als negativ empfunden. Der Ansatz erforderte jedoch auch ein moderat bis hohes Maß an Aufmerksamkeit der Probanden. Diese Aufwendung an Aufmerksamkeit kann als der essentielle Beitrag der Operateure zur Restauration der unvollständigen Perzeptionskette identifiziert werden.

5.3.2.2 Vertrauen in die Datenformate und Systemfunktionen (AV2)

Das entgegengebrachte **Vertrauen** in die automatisierte Aufklärung (*Trust in Automation*) im simulierten Experimentalsystem wurde durch die Crews pauschal zwischen 55 % und 90 % beziffert (Abbildung 5.17).

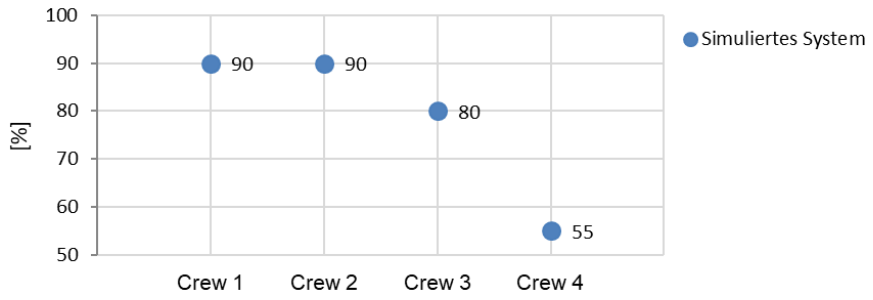


Abbildung 5.17: Einstufung des entgegengebrachten Vertrauens durch die Kommandanten.

Dabei ist anzumerken, dass dieser Wert auch unter dem Aspekt gesehen werden muss, dass die Kommandanten keine Rückversicherung der Aufklärungsergebnisse durch Dritte erhielten oder selbst die Ressourcen hatten, diesen Wert anhand Fakten festzumachen.

Das spezifische, entgegengebrachte Vertrauen der Kommandanten in die Produkte der Automationsgrade und damit die unterschiedlich stark vorverarbeiteten Ergebnisse aus der *Perzeptionskette* zeigt Abbildung 5.18.

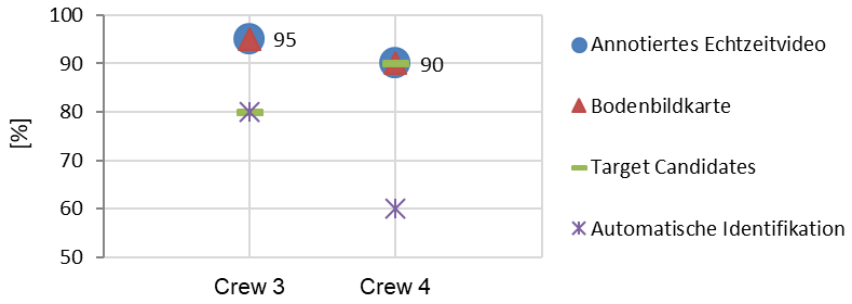


Abbildung 5.18: Spezifisches, ausgeprägtes Vertrauen der Kommandanten in die Datenformate der Produkte der Automationsgrade.

Dabei erfolgte die Abfrage hinsichtlich der auf den Displays dargestellten Daten, die Zuordnung zu den Automationsgraden kann Abbildung 5.19 entnommen werden.

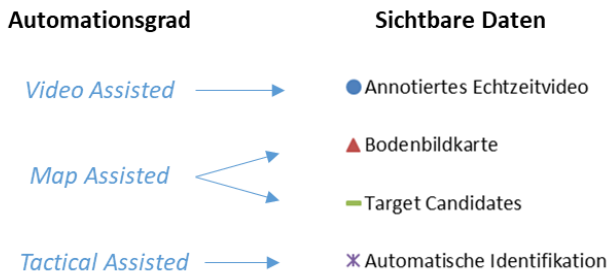


Abbildung 5.19: Zuordnung der sichtbaren Daten zu den Automationsgraden.

Dabei fällt auf, dass nur zwei der vier Kommandanten beim Umgang mit den unterschiedlichem Repräsentationsformen der Aufklärungsdaten überhaupt ein unterschiedliches Vertrauen in diese ausprägten oder eine Quantifizierung abgaben. Das zeigt, wie sehr die Kommandanten auf die Berücksichtigung der Unsicherheiten durch technische Unterstützungssysteme sowie Maßnahmen zu deren Kompensation angewiesen sind. Die angegebenen Einstufungen in Abbildung 5.18 zeigen aber auch Tendenzen, dass das entgegengebrachte Misstrauen der Operateure in einen höherem Abstraktionsgrad der Daten leicht zunimmt, was prinzipiell auf ein *kalibriertes* Vertrauensverhältnis (Kapitel 2.6.1) bei zwei der vier Kommandanten hindeutet.

Das geforderte Leistungsvermögen (Erkennungsrate) eines operationellen, realen Systems wird in Abbildung 5.20 dargestellt. Dabei schwankten die Erwartungen zwischen 70 % und 90 %, ein Kommandant enthielt sich der Bewertung wegen zu geringer Vergleichsmöglichkeit bei realen Einsätzen.

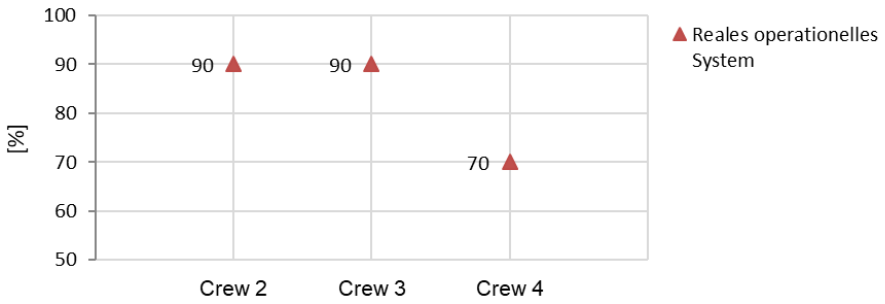


Abbildung 5.20: Geforderte Erkennungsrate eines realen, operationellen Systems.

Bewertung

Durch das Experiment konnte gezeigt werden, dass mit einer höheren Automatisierung erwartungsgemäß auch das Misstrauen in die Objekterkennung zunimmt. Durch den variablen Ansatz konnte zudem ermittelt werden, dass Operateure durch die Bereitstellung weniger vorverarbeiteter Daten ein kalibriertes Vertrauensverhältnis ausprägen. Dieser realitätsnahe Aspekt, bei dem die Erwartungshaltung der Probanden den tatsächlichen Fähigkeiten des Systems nahekommt, kann als sinnvolle Maßnahme zur Herstellung eines gesunden Vertrauensverhältnisses zwischen Menschen und Maschinen abgeleitet werden. Zusätzlich konnte das zuvor unbekannte Vertrauen in die Datenformate quantifiziert werden.

5.3.2.3 Elemente des Mentalen Modells (MV2)

Die funktionale **Transparenz** des Automationssystems, also die Wahrnehmbarkeit des Betriebszustands der Automation, wurde als überwiegend vorhanden und hoch eingestuft (Abbildung 5.21). Dabei zeigt die Einstufung die Zustimmung zu bzw. das geäußerte Verständnis der Aussagen.

	gar nicht		*neutral*		*voll*
Transparenz der Automation					
Target Candidates werden beim Eintritt von degradierter Erkennungsleistung präsentiert.				●	●●●
Es sind neue Target Candidates aufgetaucht.			●	●●	●
Es wird ein menschlicher Entscheider gebraucht, um Target Candidates zu identifizieren.				●●●	●

Abbildung 5.21: Einstufung der Transparenz der Automation.

Dies korreliert mit den Beobachtungen des Experimentators, dass keine Fälle sogenannter *Mode-Confusion*, also der Verwirrung der Probanden durch Verwechslung von Funktionen oder sich zum mentalen Bild des Operateurs abweichend verhaltender Automation, verzeichnet werden konnten. Die hohe Einstufung der Transparenz zeigt zudem, dass keine Korrelation zwischen der Transparenz des Automationsansatzes und der Glaubwürdigkeit der Aufklärungsergebnisse vorliegt.

Bewertung

Es zeigt sich, dass Probanden dem vorgestellten Ansatz eine hohe Transparenz bescheinigten. Damit wird bestätigt, dass der Ansatz den Aufbau und die Aufrechterhaltung des mentalen Modells bei den Operateuren erleichtert und begünstigt und ein hohes Situationsbewusstsein ermöglichen kann.

5.4 Evaluierung der Systemergonomie

Zur Evaluierung der Systemergonomie kamen die Fragebögen nach jeder Mission, am Ende der Kampagne als auch die Befragungen im Rahmen der Durchführung der einzeldiagnostischen Evaluierungen zum Einsatz.

Die Auswertung der Ergebnisse nimmt dabei wieder auf alle 24 Messflüge der 6 Missionen Bezug. Die einzeldiagnostische Evaluierung erfolgte selektiv anhand einzelner relevanten Situationen, welche im Laufe des Experiments in den jeweiligen Situationen durch den Experimentator identifiziert und ausgewählt wurden.

5.4.1 Visuelle Ergonomie der Ergebnisdarstellung

Hinsichtlich der **Ergonomie** der visuellen Darstellung der Aufklärungsergebnisse wurde die Wahrnehmbarkeit und Verständlichkeit der verwendeten Datenformate sowie die *Salienz* neu aufgeklärter, unbekannter Objekte (*Target Candidates*) ermittelt.

Abbildung 5.22 zeigt dabei, dass über die verwendeten Datenformate weitestgehend Klarheit bestand, jedoch war offensichtlich ein etwas längerer Eingewöhnungsprozess an die neuen Darstellungsformate nötig.

	gar nicht		*neutral*		*voll*
Präsentationsformat der Daten					
Die Bedeutung der verwendeten Darstellungsweise der Aufklärungsdaten war mir klar.				●●	●●
Ich habe Zeit gebraucht, um mich an die unterschiedliche Darstellungsweise von Informationen zu gewöhnen.	●	●	●	●	
Es hat mich Anstrengung gekostet, mit mehreren Darstellungsformen der Informationen zu arbeiten.	●●	●●			
Es hat mich Anstrengung gekostet, zwischen den verschiedenen Darstellungsformen der Informationen zu wechseln.		●●●●			

Abbildung 5.22: Bewertung der Wahrnehmbarkeit und Verständlichkeit der verwendeten Datenformate.

Neu auftretende, unbekannte Objekte (*Target Candidates*) waren für die Kommandanten aufgrund der verwendeten Symbolik leicht als solche erkennbar, wie in Abbildung 5.23 ersichtlich.

	gar nicht		neutral		voll
Darstellungsweise der "Target Candidates"					
Die symbolische Darstellung der Target Candidates hebt sich von den anderen Symbolen auf der taktischen Karte ab.				●	●●●
Form und Farbgebung der Target Candidates machen diese eindeutig erkennbar.				●●	●●
Die Symbolik der Target Candidates ist leicht wahrnehmbar.				●	●●●
Die Symbolik der Target Candidates ist eingängig und einprägsam.				●●	●●
Neu auftretenden Target Candidates fallen auf der taktischen Karte schnell auf.				●●●	●

Abbildung 5.23: Bewertung der Darstellungsweise neu auftretender, unbekannter Objekte auf den Helikopterrouten.

Mit der Bestätigung der Klarheit und guten Wahrnehmbarkeit der Aufklärungsergebnisse kann festgehalten werden, dass keine Korrelation zwischen dem Verständnis der Daten und der Einschätzung der **Glaubwürdigkeit** vorliegt.

Die Einstufung der Notwendigkeit und **Nützlichkeit der Datenformate** für eine erfolgreiche Missionsdurchführung zeigt Abbildung 5.24.

	gar nicht		neutral		voll
Nützlichkeit der Datenformate für Missionsdurchführung					
Die Darstellung von taktischen Symbolen von Gefährdungen nach STANAG in der Karte ist für die erfolgreiche Durchführung der Mission nötig.			●	●	●●
Die Darstellung von potentiellen Gefährdungen durch Target Candidates in der Karte ist für die erfolgreichen Durchführung der Mission nötig.					●●●●
Die Darstellung der aufgeklärten Routen in der Karte ist für die erfolgreichen Durchführung der Mission hilfreich.			●	●	●●
Die Darstellung der Bodenbilder der aufgeklärten Routen in der Karte ist für die erfolgreichen Durchführung der Mission hilfreich.			●	●●	●
Der Zugriff auf die Videostreams der UAVs mit Objektdetektion in Echtzeit ist für die erfolgreichen Durchführung der Mission hilfreich.				●●	●●

Abbildung 5.24: Einstufung der Nützlichkeit der Datenformate für die Missionsdurchführung.

Dabei ist zu sehen, dass besonders der Darstellung potentieller Gefährdungen (*Target Candidates*) für den Missionsverlauf der höchste Stellenwert zugeschrieben wurde. Dies liegt darin begründet, dass jede der unsicheren Detektionen eine potentielle Bedrohung für den Helikopter darstellen kann. Auch die vorhandene Möglichkeit des Direktzugriffs auf Echtzeit-Videodaten hat eine hohe Zustimmung erfahren. Warum ein Kommandant die Anzeige von NATO-Symbolen nur neutral bewertet hat, konnte nicht erschlossen werden; ebenso die Einstufung, die Nützlichkeit der Darstellung der aufgeklärten Routen sei nur neutral.

5.4.2 Ergonomie der Benutzerschnittstelle

Mittels Fragebögen erfolgte die Beurteilung der **Ergonomie der Benutzerschnittstelle zur Systembedienung der Aufklärungsfunktionen aus dem Cockpit** durch die Kommandanten. Mit dieser getrennten Befragung wurde sichergestellt, dass die Bewertung der Systemfunktionalitäten an sich isoliert von der Benutzerschnittstelle erfolgt, was den Probanden auch vorher kommuniziert wurde. Damit lässt sich die Beurteilung der Kommandanten in die Kategorien der Kernfunktionen des Systems sowie dem Zugang dazu einteilen.

Abbildung 5.25 zeigt die Beurteilung der Gestaltung, der Bedienbarkeit sowie der Integrationsgüte der Benutzeroberflächen.

	gar nicht		neutral		voll
Design, Bedienbarkeit und Integrationsgüte					
Die Bedienbarkeit (Haptik) der Benutzeroberflächen empfinde ich für den Anwendungsfall als voll tauglich.				●●●●	
Die Gestaltung der Benutzeroberflächen (Optik) empfinde ich als voll tauglich.				●●●	●
Die Darstellung von Aufklärungsergebnissen empfinde ich als gut wahrnehmbar und tauglich für den Missionseinsatz.				●●●	●
Aus der Benutzerschnittstelle und der Darstellung der Aufklärungs-ergebnisse lassen sich alle relevanten Informationen leicht entnehmen.				●●●	●
Die Präsentation der Aufklärungsdaten fügte sich nahtlos in die Arbeitsabläufe im Cockpit ein.				●●●	●
Die Präsentation der Aufklärungsdaten ist leicht erfassbar.				●	●●●
Die Präsentation der Aufklärungsdaten ist eingängig.				●●	●●
Die Benutzerschnittstelle für den Einsatz der automatisierten Aufklärungskomponente (Auftragsbedienelement: Recon etc.) empfinde ich als zielgerichtet umgesetzt.			●●		●●
Die Benutzerschnittstellen für den manuellen Durchgriff auf tiefere Systemebenen (Gimbal, Sensor) empfinde ich als zielgerichtet umgesetzt.				●●●●	

Abbildung 5.25: Bewertung von Design, Bedienbarkeit und Integrationsgüte der Benutzeroberflächen.

Dabei erfolgte eine überwiegend gute bis sehr gute Bewertung durch die Kommandanten, was die Ausgestaltung und Umsetzung der Bedienoberfläche betrifft. Das lässt darauf schließen, dass die Bewertung der Kernfunktionen der variabel automatisierten Aufklärung nicht durch deren Zugang mittels der Benutzeroberfläche beeinflusst wurde. Auch der Zugang und die Interaktionen bei der manuellen Bedienung (*manuelle Eingriffe*) und Nutzung der Sensorsysteme auf den UAVs zu Zwecken der Eigensicherung wurde überwiegend als weitgehend zielgerichtet und einfach bewertet.

Die geäußerten Kritikpunkte nehmen hauptsächlich Bezug auf das Auftragsbedienelement, welches aufgrund seines gebotenen Umfangs an Funktionen und Schaltflächen, die je dynamisch für das ausgewählte Kartenelement angepasst werden, bei manchen Probanden (in der Anfangsphase) zu leichten Unklarheiten bei der Nutzung geführt hat.

Die Erfassbarkeit der Aufklärungsergebnisse aus dem Display wurde in der gesamten Cockpitumgebung leicht kritisiert, da neben diesen Informationen auch andere optische und dynamisch auftretende Meldungen und Daten angezeigt wurden. Die eigentliche, isolierte kognitionsergonomische Wahrnehmbarkeit der Aufklärungsdaten wurde indes als durchweg positiv bestätigt, was die Verständlichkeit der Darstellung, die Klarheit sowie die erforderliche Anstrengung dabei betrifft. Die Visualisierung, deren Güte und Design sowie die Bedienergonomie der Funktionalitäten wurde mehrheitlich als gut bis sehr gut und damit als richtungsweisend für eine mögliche weitergehende Verwendung eingestuft.

5.4.3 Effekte der proaktiven Adaptivität

Nach dem mündlichen *Debriefing* (siehe Kapitel 4.6.4) jeder geflogenen Messmission erfolgte die diagnostische Bewertung einzelner, isolierter Situationen mit den Crews anhand von Videos und aufgezeichneten Daten, welche anhand einer Zeitleiste in einem eigens erstellten Auswertetool grafisch untersucht werden konnten. Dabei wurden einzelne, während des Messfluges aufgetretene Anwendungsfälle selektiert und gemeinsam mit den Crews rekapituliert, analysiert und ausgewertet.

Zur Ermittlung der Effekte der Adaptivität des Systems auf die Crews wurden Fälle ausgewählt, in welchen eine systeminitiierte, **proaktive Involvierung** des Kommandanten (Kapitel 4.4.6.3) erfolgte. Im Rahmen dessen wurden 14 Fälle (Use-Cases) der Aufgabenvereinfachung durch das proaktive Systemverhalten analysiert und bewertet, wobei die die Ermittlung der Akzeptanz des adaptiven Systemverhaltens im Vordergrund stand.

Die Reduktion der Arbeitsbelastung erfolgte dabei bei der proaktiven Involvierung durch den Wegfall der folgenden Tätigkeiten des Kommandanten:

- Aufmerksamkeitsaufwand: Verlagerung und Bindung der Aufmerksamkeit auf die taktische Karte.
- Visuelle Suchroutinen: Absuchen der taktischen Karte nach neuen Detektionen der UAVs.
- Kognitive, analytische Einordnung: Räumliches Verwalten und Management neuer Detektionen.
- Haptische Systembedienung und Einsparung von Aufmerksamkeit und Konzentration: einzelne Aus- und Anwahl der Detektionen (i.A. von Entfernung und Relevanz zum Helikopter).

Dazu wurde der in Abbildung 5.26 gezeigte Bildspeicher beim Auslösen des Triggers (detaillierte Beschreibung in Kapitel 4.4.6) proaktiv geöffnet, um vor sich anbahnenden kritischen Situationen (mögliche unbemerkte Annäherung des Helikopters an unidentifizierte Objekte) eine direkte Involvierung des Kommandanten zu erzielen.

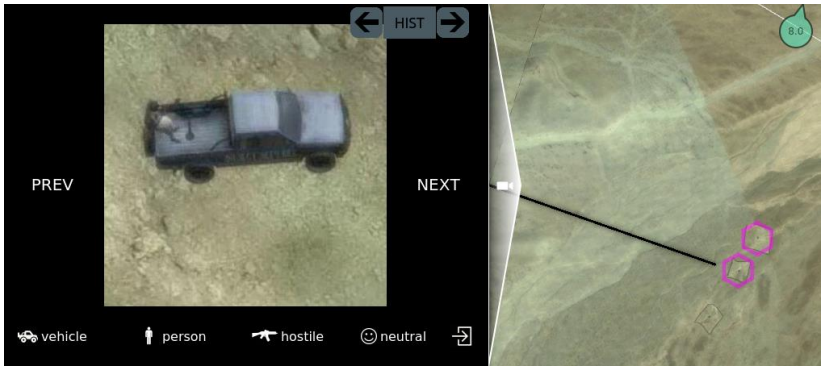


Abbildung 5.26: Proaktive Präsentation des Bildspeichers zur Aufgabenvereinfachung.

Abbildung 5.27 zeigt die Einstufung des proaktiven Systemverhaltens am Fallbeispiel der Aufgabenvereinfachung durch die gezielte Involvierung des Kommandanten zur Objektidentifikation. Als Bewertungsgrundlage dient dabei eine 5-Punkt Likert Skala [Rost, 1996]. Dabei ergab sich die folgende prozentuale Verteilung der Einschätzungen über die 14 Fälle hinweg:

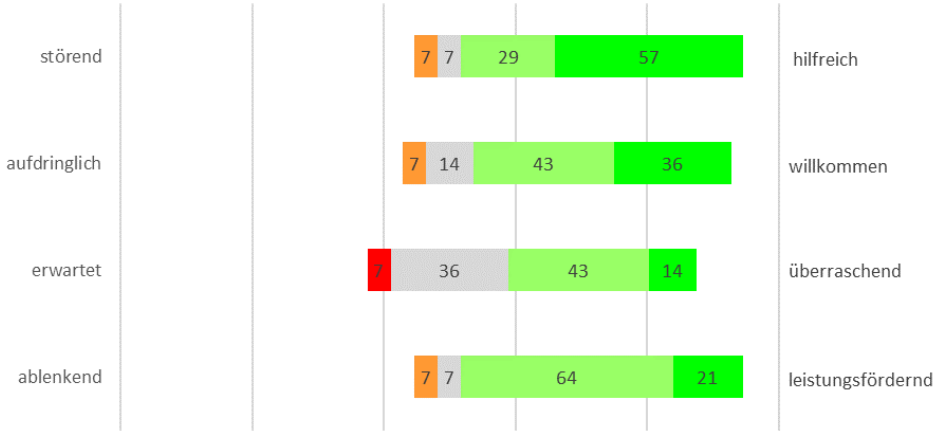


Abbildung 5.27: Einstufung des proaktiven Systemverhaltens am Fallbeispiel der Aufgabenvereinfachung der Identifizierungseingaben.

Wie in Abbildung 5.27 zu sehen, erhielt der proaktive Eingriff in die Arbeitsabläufe der Kommandanten überwiegend gute Bewertungen. Die Vereinfachung der Aufgabe wurde größtenteils als "*hilfreich*", "*willkommen*" und "*leistungsfördernd*" eingestuft. Die Einstufung des Systemverhaltens mit der ausgeprägten Tendenz zu "*überraschend*" zeigt, dass der Auslöser für den Eingriff im Systemdesign sinnvoll gewählt wurde, da "*erwartete*" Systemeingriffe in diesem Anwendungsfall für eine nicht zielführende und damit überflüssige Funktionalität sprechen würden. Insgesamt kann das adaptive Systemverhalten zur Aufgabenvereinfachung also überwiegend als produktiv bezeichnet werden. Dennoch zeigt die Auswertung auch, dass in 7 % der Fälle (unteres Ende der Skala, Farben orange und rot in Abbildung 5.27) ein kontraproduktiver Effekt verzeichnet werden muss. Die Kommandanten gaben an, in 35,7 % (entspricht fünf) der Fälle die Kritikalität nicht selbst bemerkt zu haben, für die restlichen 64,3 % (neun der 14 Fälle) dagegen schon. Das bedeutet, dass das gebotene adaptive Systemverhalten die Arbeitsabläufe der Kommandanten teilweise gestört hat, was eine weitere Überarbeitung dieses Automationstriggers erfordert.

5.4.4 Adaptierbarkeit und Autorität

Die Flexibilität und **Adaptierbarkeit** der Automation an eigene Bedürfnisse wurde ebenfalls durch die Kommandanten bewertet. Abbildung 5.28 bestätigt eine durchweg höchste Einstufung der Adaptierbarkeit der Automation an unvorhersehbare Ereignisse. Die Möglichkeiten des direkten Zugriffs und die *manuelle Führung* des Sensors werden ebenfalls als unverzichtbar und als nötige Ergänzung zum automatisierten Betrieb erachtet. Die davon bereitgestellte Umsetzung im Experimentalsystem, welche dem Experiment unterzogen wurde, erhielt ebenso durchweg die höchste Einstufung als nützliche Ergänzung zum automatisierten Betrieb.

Flexibilität / Adaptierbarkeit an Nutzer	*gar nicht*		*neutral*		*voll*
Direkter Zugriff und manuelle Führung des Sensors ermöglichen, unvorhergesehene Ereignisse in der Mission selbst zu betrachten.					●●●●
Die Möglichkeit, die Kontrolle über den Sensor (manuelle Eingriffsmöglichkeit) zu haben, erachte ich als notwendig.					●●●●
Die manuelle Führung des Aufklärungssensors erachte ich als notwendige Ergänzung zum automatisierten Betrieb.					●●●●
Der manuelle Eingriff und die manuelle Führung des Sensors ergänzen das automatisierte Einsatzspektrum sinnvoll.					●●●●

Abbildung 5.28: Einstufung der Flexibilität und Adaptierbarkeit der Automation an eigene Bedürfnisse.

Die Entscheidungsgewalt über der variablen Automation obliegt weitestgehend, wie die erfahrende Einstufung der **Autorität** über die Automation belegt, dem Operateur (Abbildung 5.29).

Nutzerhoheit und -kontrolle	*gar nicht*		*neutral*		*voll*
Das Automationssystem erfüllt meine Anforderungen hinsichtlich geforderter Nutzerkontrolle und -kontrollierbarkeit von Automation.			●	●●	●
Die tieferen Eingriffs- und Zugriffsmöglichkeiten (manuelle Bedienung, manuelles Übersteuern) erachte ich als nützlich und hilfreich.			●	●	●●

Abbildung 5.29: Einstufung der Erfüllung der Nutzeranforderungen an Hoheit und Kontrollierbarkeit.

Die überwiegend positive Wertung zeigt die Erfüllung der Nutzeranforderungen an **Kontrollhoheit** (Kapitel 3.7). Die neutrale Bewertung rührt von der Einschätzung des gesamten UAV-Systems, dessen Eingriffsmöglichkeiten hinsichtlich der Flugführung durch einen Kommandanten als nicht zufriedenstellend bewertet wurde (vgl. Abschlussbericht Teil I, [Schulte et al., 2018]).

Kapitel 6

Zusammenfassung, Diskussion und Ausblick

Mittels der Evaluierung des variablen Automatisierungsansatzes zur Routenaufklärung in der Experimentalkampagne konnten die in Kapitel 5 dargestellten Ergebnisse und Erkenntnisse abgeleitet werden.

Damit erfolgen nun abschließend eine kurze Zusammenfassung und Diskussion der Ergebnisse und die Beantwortung der eingangs formulierten Forschungsfragen. Danach erfolgt eine kritische Auseinandersetzung mit dem vorgeschlagenen Automationssystem und der vorgenommenen Evaluierung, wobei Kritikunkte und Verbesserungsmöglichkeiten aufgezeigt werden. Anschließend folgt ein kurzes Fazit, wonach das Kapitel und die Arbeit mit einem Ausblick und Empfehlungen abgeschlossen werden.

6.1 Zusammenfassung und Diskussion der Ergebnisse

Um die Einflüsse der Variabilität der Automatisierung auf die Leistungsfähigkeit des Gesamtsystems, die Beanspruchung der Operateure sowie deren Vertrauen in die Automationsgrade zu untersuchen, wurde eine umfangreiche Experimentalkampagne (Kapitel 4) im institutseigenen Flug- und Missionssimulator durchgeführt. Dabei absolvierten 4 Helikoptercrews jeweils 6 Experimentalmissionen, wobei die vorgeschlagene Automatisierungslösung von den Kommandanten in 24 Messflügen in insgesamt über 9,4 Stunden isolierter Operationszeit in der Laborumgebung eingesetzt und erprobt wurde. Die Ergebnisse wurden dabei mit einer hochspezialisierten Expertengruppe (Kapitel 4.5) erzielt.

Wie die Evaluierung der Ergebnisse in Kapitel 5.3 zeigt, konnten bezüglich der Leistungsfähigkeit des Gesamtsystems (Mensch-Maschine-Team) hohe Kennzahlen sowie positive Effekte verzeichnet werden (Kapitel 5.3.1.1). Der vorgeschlagene Ansatz, Operateure im Rahmen der Variabilität in den Auswertungsprozess mit einzubeziehen, wurde insgesamt als verträglicher Aufwand für den erfahrenen Mehrwert eingestuft.

Dabei wurde die Belastung und Beanspruchung der Operateure bei der Durchführung von Aufklärungsaufgaben rekonstruiert und durch die Probanden eingeschätzt. Aus der Evaluierung geht hervor, dass die Operateure durch die vorgeschlagene Aufgabenteilung im Rahmen der Automationsgrade im Extremfall eine durchaus hohe Belastung erfuhren, im Mittel jedoch eine akzeptable zeitliche Aufgabendichte vorherrschte (Kapitel 5.3.1.2). Die Beanspruchung wurde anhand der erbrachten Aufwendungen an Anstrengung, Konzentration und Aufmerksamkeit ermittelt, welche insgesamt noch verträglich ausfielen (Kapitel 5.3.2.1).

Im Rahmen der Experimentalflüge bildeten die Operateure dabei ein kalibriertes Vertrauensverhältnis zu dem technischen System aus, dabei konnte eine Quantifizierung des Vertrauens in die einzelnen Automationsgrade ermittelt werden (Kapitel 5.3.2.2).

Die Erwartungen im angedachten Wirkungsprinzip (Kapitel 3.6) des Lösungskonzepts (Kapitel 3.1) wurden hinsichtlich des Funktionsprinzips sowie der Effekte und Auswirkungen auf die Operateure im Rahmen der Evaluierung erfüllt, des weiteren konnten Quantifizierungen für die Abhängigen Variablen im Rahmen der Operationalisierung (Kapitel 4.1) und Bewertungen der Systemergonomie gewonnen werden.

Die Erklärung für die Erfüllung des Wirkprinzips liegt in der vorab durchgeführten Metastudie (Kapitel 4.2.2), im Rahmen derer die Tauglichkeit der Automationsgrade zur Reduktion der Beanspruchung der Operateure untersucht wurde. Dabei konnten bereits unterscheidbare Anforderungen an die Beanspruchung von Operateuren verzeichnet werden, welche im Rahmen der Experimentalkampagne nun implizit bestätigt wurden.

Die Evaluierung fand mit einer spezialisierten Probandengruppe (Kapitel 4.5) in einer für die Experimentalkampagne erstellten und angepassten Arbeitsumgebung (Kapitel 4.3) sowie anhand der vorgestellten Experimentalmissionen und -szenarien (Kapitel 4.3.3) statt, die Ergebnisse sind daher hinsichtlich ihrer Gültigkeit auf diese Konstellation beschränkt.

6.2 Beantwortung der Forschungsfragen

Im Folgenden werden die in Kapitel 1.5 gestellten Forschungsfragen spezifisch beantwortet:

Frage 1):

„Welchen Einfluss auf die Leistungsfähigkeit des Gesamtsystems hat ein mit adaptiver Automation ausgestattetes Mensch-Maschine-System zur sensorischen Aufklärung?“

Die Ermittlung der Leistungsfähigkeit des Gesamtsystems anhand der Experimentalkampagne (Kapitel 4) erfolgt über die Abhängige Variable AV1 aus der Operationalisierungsstufe (Kapitel 4.1). Durch die Ergebnisse der experimentellen, objektiven Evaluierung (Kapitel 5.3.1.1) konnte eine weitestgehende beziehungsweise in einigen Aspekten volle Erfüllung der Leistungskennzahlen und damit ein positiver Einfluss festgestellt werden.

Ermittelt wurden dabei folgende Sachverhalte, nachgewiesen wurden:

- Die vollständige Vermeidung von Gefährdungen durch Überflüge unbekannter Objekte (*Target Candidates*, Kapitel 3.5.2).
- Hohe Vorwarnzeiten vor unbekannten Objekten von durchschnittlich 10 km.
- Die Erzielung eines deutlichen Überschusses (*Surplus*) an aufgeklärten Flächen (mit einem Faktor von ca. 3,4 im Mittel), und immer einer garantierten, abgesuchten Alternativflugroute (Mindestmaß von 2,0).
- Ein anteiliger Überflug des Helikopters von 93 % über aufgeklärtem Gebiet.
- Eine Quote der Restaurierung der unvollständigen Prozesskette durch den Kommandanten von über 92 %, bezogen auf eine gesamte Rate von 74 % an unsicheren Detektionen aus einer Gesamtheit von 351 Objektvorkommen.

Dabei wurde ermittelt, dass die gesamte Ausbeute an vollständig aufgeklärten Objekten durch die angewendete Aufgabenteilung (Kapitel 3.5) mit drei Automationsgraden durch das gezielte Einbringen kognitiver Leistung von insgesamt 25,93 % (rein maschinell aufgeklärten) Objekten auf 91,74 % (durch das Mensch-Maschine-Team aufgeklärt) gesteigert werden konnte. Das entspricht einer absoluten, effektiven Steigerung von 65,85 %, welche durch die situative Abfrage von Identifizierungsleistung der Operateure durch das variable System zielgerichtet eingeholt wurde.

Die im Rahmen der variablen Automationsgrade angewandte proaktive Interventionsstrategie (Kapitel 4.4.6.3) zur optimierten, gebündelten Abfrage angehäufter und notwendiger,

zeitkritischer Identifizierungen als Vereinfachung der Aufgabe erfuhr subjektive eine größtenteils "*hilfreiche*", "*willkommene*" und "*leistungsfördernde*" Bewertung (Kapitel 5.4.3) durch die Probanden.

Im Experiment (Kapitel 4) stellte sich somit heraus, dass durch die vorgeschlagene Lösung (Kapitel 3.5) eine hohe Leistungsfähigkeit des Gesamtsystems erzielt wurde und damit ein positiver Einfluss verzeichnet werden kann.

Frage 2):

„Wie prägen sich das Vertrauen und die Akzeptanz der Operateure bei der Interaktion mit einem adaptiv automatisierten Mensch-Maschine-System aus und wie lässt sich dieses Vertrauen quantifizieren?“

Die abhängige Experimentvariable AV2 (Kapitel 4.1) beschreibt das Vertrauen (*Trust in Automation*) (Kapitel 2.6.1) der Operateure in die drei Automationsgrade des Experimentalsystems beziehungsweise deren visualisierte Produkte auf den Displays im Helikoptercockpit (Kapitel 3.5, 4.4.6.2). Dabei bestätigte sich die erwartungsgemäße Tendenz, dass das Misstrauen (Kapitel 2.6.1) der Operateure mit einer höheren Automatisierung der Objekterkennung zunimmt. Gesamt lag das entgegengebrachte Vertrauen in die Automationsgrade bei allen Kommandanten pauschal zwischen 55 % und 90 %, es konnten jedoch unterschiedliche Quantifizierungen für die einzelnen Automationsgrade ermittelt werden (Kapitel 5.3.2.2). So bezifferten zwei der Kommandanten das ausgeprägte Vertrauen in den Automationsgrad

- *VideoAssisted* (Kapitel 3.5.1) mit durchschnittlich 92,5 %,
- *Map Assisted* (Kapitel 3.5.2) mit durchschnittlich 92,5 % für die Bodenbildkarte und 85 % für die *Target Candidates*,
- *TacticalAssited* (Kapitel 3.5.3) mit durchschnittlich 70 %.

Dabei wurde ein *kalibriertes Vertrauensverhältnis* (Kapitel 2.6.1) mit einer durchaus realistischen Erwartungshaltung der Probanden identifiziert (Kapitel 5.3.2.2).

Der Aufbau des dabei zugrundeliegenden mentalen Modells (Kapitel 2.5.4.3), welches die Probanden bei der Interaktion ausprägten (MV2 der Operationalisierung aus Kapitel 4.1), wurde dabei durch die hochbewertete Transparenz des variablen Systems (Kapitel 5.3.2.3) sowie die hochbewertete visuelle Ergonomie der Produkte der Automationsgrade begünstigt (Kapitel 5.4.1). Dies korrelierte mit den Beobachtungen des Experimentators, dass Fälle der *Mode-Confusion* (Kapitel 2.6.1) ausblieben, welche insbesondere variable Systeme betrifft und das Vertrauen sowie die Akzeptanz des Ansatzes massiv beeinträchtigt hätte. Die Akzeptanz des Systems wurde hingegen durch die durchweg höchstbewertete Adaptierbarkeit (Kapitel 5.4.4) gefestigt.

Durch das Experiment (Kapitel 4) konnte somit die Art des aufgebauten Vertrauensverhältnisses der Operateure zum vorgeschlagenen Ansatz (Kapitel 3) ermittelt und eine Quantifizierung des Vertrauens in die Automationsgrade (Kapitel 3.5) erfolgen.

Frage 3):

„Welche Beanspruchung in Form von Anstrengung, Konzentration und Aufmerksamkeit erfahren Operateure bei der Aufgabendurchführung in einem adaptiven Mensch-Maschine-System zur sensorischen Aufklärung?“

Die *mentale Beanspruchung* (Kapitel 2.5.1.2) der Operateure bei der Vervollständigung der Perzeptionskette wurde hauptsächlich durch visuelle *informatorische Belastung* (Kapitel 2.5.1.1) induziert. Die Beanspruchung (AV3 der Operationalisierung in Kapitel 4.1) wurde dazu anhand und mit der tatsächlich zugrundeliegenden, vermessenen Belastung (IV3 in Kapitel 4.1) rekonstruiert.

In Kapitel 5.3.1.2 erfolgte die Erhebung der Belastung (IV3) anhand der zeitlichen Dichte der Identifizierungseingaben, wobei eine mittlere Zeitdauer von 2,3 Minuten zwischen den Identifizierungstätigkeiten ermittelt wurde. Die minimalen und maximalen Abstände lagen bei 66 Sekunden bis 5,03 Minuten (Kapitel 5.3.1.2), die minimale Zeitspanne stellt dabei im Kontext der Cockpitumgebung eine überaus hohe Belastung dar. Die entstandene Beanspruchung (AV3) wurde subjektiv durch die Operateure anhand deren Aufwendungen an *Anstrengung*, *Konzentration* und *Aufmerksamkeit* einzeln über alle Missionen hinweg eingeschätzt (Kapitel 5.3.2.1). Die zur situativen Aufgabenbewältigung durch die Probanden aufgewendete

- *Anstrengung* wurde als gering und damit positiv,
- *Konzentration* wurde als mäßig bis hoch und damit leicht negativ und die
- *Aufmerksamkeit* mehrheitlich als hoch und damit negativ

eingestuft, wobei die Aufwendungen an Anstrengung und Konzentration kontroverse Einschätzungen erfuhren. Die Menge an zusätzlicher Aufmerksamkeit, welche für den Umgang mit den neuen Aufgaben im Cockpit aufgewendet werden musste, wurde als gering und damit positiv eingeschätzt, ebenso wie die Menge an Aufmerksamkeit für die notwendige dynamische und häufige Verlagerung des Aufmerksamkeitsfokus auf die Identifizierungsaufgaben (Kapitel 5.3.2.1). Dies wurde durch die hochbewertete visuelle Ergonomie der Ergebnisdarstellung (Kapitel 5.4.1) sowie die hochbewertete Ergonomie der Benutzerschnittstelle (Kapitel 5.4.2) begünstigt.

Die zusätzliche Beanspruchung durch die Aufgabendurchführung (Vervollständigung der Prozesskette) zeigte auf einer ganzheitlichen, subjektiven Betrachtungsebene über die Missionen hinweg einen unauffälligen und höchstens moderaten Einfluss auf die erfahrene Gesamtbeanspruchung der Kommandanten. Diese Gesamtbeanspruchung wurde anhand des NASA - Task Load Index im Mittel mit 55,3 % (minimal 37,3 %, maximal 75,3 %) quantifiziert (Kapitel 5.3.2.1), die vorgeschlagene Lösung hat sich in diesem Kontext als gut erwiesen.

Nach der Beantwortung der Forschungsfragen wird nun das Vorgehen und die Durchführung der experimentellen Evaluierung einer kritischen Einschätzung unterzogen, dabei werden Verbesserungspotentiale herausgearbeitet und aufgezeigt.

6.3 Kritik und Verbesserungspotentiale

In dieser Arbeit erfolgte die Annäherung und die Erschließung der Thematik der Unsicherheitsbehaftung maschineller Datenauswertung effektbezogen von der Seite der Mensch-Maschine-Systeme, menschzentrierten Automation und Systemergonomie aus. Daher wurden einige komplexe Aspekte, wie beispielsweise die maschinelle Sensordatenverarbeitung und -fusion, funktionell nur rudimentär und stark vereinfacht betrachtet. Ebenso konnten viele Aspekte einer realen Arbeitsumgebung in der Laborumgebung nur rudimentär nachgebildet werden oder waren gar nicht vorhanden. Im Folgenden werden daher Kritikpunkte und Verbesserungsmöglichkeiten herausgearbeitet und aufgezeigt.

6.3.1 Kritikpunkte

Tabelle 14 listet die hauptsächlichen Kritikpunkte auf, aufgeschlüsselt nach deren Domäne, den Aspekt des Kritikpunkts sowie den wesentlichen Gegebenheiten. Diese beruhen zumeist auf

Annahmen und Festlegungen, die zur Isolierung der Untersuchungsaspekte und Herstellung von kontrollierten und über das Experiment hinweg stabilen Versuchen getroffen wurden.

Domäne	**Aspekt**	**Gegebenheit**
UAV-Sensorik	Sensorauswahl	Nur elektro-optische Kamera.
Umwelterkennung	Algorithmen	Algorithmen mehrheitlich emuliert.
Umwelterkennung	Sensordatenfusion	Großteils nicht berücksichtigt.
Umwelterkennung	Verlässlichkeit/ Konfidenz	Als bestimmbar und eindimensional angenommen.
Simulation	Realismus	Reduzierung auf Messeffekte. Realismus der Szenarien beschränkt durch Simulationssoftware. Vereinfachte, exemplarische Aufklärungssituationen.
Cognitive Engineering	Mentale Belastung des Operateurs	Angenähertes, primitives Modell. Teilweise empirisch ermittelt.
Experimentelle Evaluierung	Ermittlungsmethode mentale Beanspruchung	Nur subjektive Ermittlung durch Befragung.

Tabelle 14: Hauptsächliche Kritikpunkte, aufgeschlüsselt nach deren Domäne, dem Aspekt des Kritikpunkts sowie den wesentlichen Gegebenheiten.

Als erster Kritikpunkt muss genannt werden, dass Erkennungsalgorithmen pauschal emuliert wurden, damit wurden vergleichbare Bedingungen für alle Probanden durch eine Reduktion der möglichen Freiheitsgrade hergestellt. Somit konnten annähernd gleiche, deterministische Repräsentationen der Aufklärungsdaten erzeugt und im Cockpit evaluiert werden. Ebenfalls wurden keine Multi-Sensorik sowie Sensordatenfusion explizit berücksichtigt. Mehrere Algorithmen und selektive Algorithmen-Auswahl waren nicht Gegenstand der Arbeit, sondern wurden in [Hellert, 2019] parallel evaluiert.

Im Folgenden wird detailliert auf den Punkt der Verlässlichkeit der automatisiert verarbeitenden Ergebnisse eingegangen. Wie in Kapitel 2.1 (Maschinelle Bilddatenauswertung zur luftgestützten Objekterkennung) und insbesondere in den Kapiteln 2.1.3 und 2.1.3.4 (Imperfektion und Zuverlässigkeit, Quantifizierung der Verlässlichkeit) aufgezeigt, kommen für Detektionsverfahren üblicherweise mehrschichtige/ mehrdimensionale Metriken zum Einsatz, welche die Fehlerarten (Fehldetektionen, Fehler durch Auslassen, Falschklassifikationen) explizit, aber offline quantifizieren. Eine solche Granularität wurde im Verlauf der Arbeit nicht untersucht. Hier erfolgte die Fokussierung und Methodenwahl einer bestehenden, eindimensionalen online-fähigen Verlässlichkeit, wie in [Hellert, 2019] beschrieben.

Ein anderer wesentlicher Kritikpunkt betrifft die Modellierung der mentalen Beanspruchung des Operateurs sowie deren Evaluierung. Diese erfolgte im Rahmen der Arbeit mit Modellen aus der Literatur (Kapitel 2.5) und einer parallel laufenden Forschungsarbeit zur Abschätzung der Workload in Cockpitumgebungen mit einer nicht-intrusiven Messmethode (anhand von Blickbewegungen und haptischen Interaktionen) [Honecker, 2021]. Dabei wurde in der hier vorliegenden Arbeit nur ein

pauschales, nicht vollständiges Beanspruchungsmodell beispielhaft für die Interaktion eines Operateurs mit den Produkten der Automationsgrade erstellt und verwendet (Kapitel 4.2.2, Anhang A).

6.3.2 Verbesserungsmöglichkeiten

Mögliches Verbesserungspotential besteht aus dem Blickwinkel der Sensoreinsatzautomatisierung bei der Umwelterkennung (Kapitel 2.1). Mit dem Einsatz von realen Algorithmen und modernen Detektionsverfahren (beispielsweise Verfahren, die *Maschinelles Lernen* in Form von künstlichen neuronalen Netzen zur Objektdetektion einsetzen) können aus den Themenkomplexen *Machine Vision* und *Machine Learning* reale Algorithmen mit realen Unsicherheitsbehaftungen eingebracht werden. Ebenso könnten neuartige Verfahren mit höherer Erkennungsleistung generell Unsicherheiten minimieren.

Mit dem Aspekt der Sensordatenfusion könnten weitere Sensorarten (IR, LIDAR, RADAR) und entsprechende Algorithmen zur Sensordatenauswertung eingebracht werden. Dabei könnten dann beispielsweise mehrdimensionale oder mehrschichtige Unsicherheitsmodelle der Datenverarbeitungsketten erforscht, entwickelt und integriert werden.

Ebenso könnten die Visualisierungsformen der Aufklärungsdaten um weitere Darstellungen aus zusätzlichen Sensorarten und *Perzeptionsketten* erweitert werden. Für Ergebnisse anderer Gestalt, beispielsweise aus weiteren Datenverarbeitungsketten, könnten die Automationsgrade abgeändert und erweitert werden.

Der eigentliche Adaptionsprozess der Automation mittels Automationsgraden könnte dann anhand von realen Ergebnissen aus einer Sensordatenfusion erfolgen. Dabei könnten auch andere oder zusätzlich weitere Kriterien als die in dieser Arbeit herangezogenen *Critical-Event* - Strategie Anwendung finden. Beispielsweise könnten weitere Kriterien zur Beschreibung und Methoden zur Erkennung von Unsicherheiten der Detektionsalgorithmen erforscht oder bei Bedarf weitere Aktivierungsstrategien (Kapitel 2.4.2) zur Automationsadaption oder Involvierung des Operateurs aufgestellt und eingebracht werden.

Aus dem Blickwinkel der Kognitionspsychologie könnten hinsichtlich der Evaluierung der Beanspruchung der Operateure beim Aufklärungseinsatz und bei der Interaktion mit Aufklärungsprodukten komplexere Messmethoden, beispielsweise aus der Neurologie, Anwendung finden. Dadurch könnten umfangreichere, realistischere Modelle und ebenso individuelle Beanspruchungsmodelle für einzelne Operateure untersucht und erstellt werden.

Durch eine erweiterte experimentelle Evaluierung mit erweiterten Messmethoden könnten zudem tiefere, realistischere Zusammenhänge zwischen der Repräsentationsform von Aufklärungsdaten und den tatsächlichen Effekten bei der Wahrnehmung und Bearbeitung seitens der Operateure untersucht und erforscht werden.

6.4 Fazit

Durch die Experimentalkampagne konnte ganzheitlich bestätigt werden, dass der in dieser Arbeit ausgearbeitete Ansatz der Variablen Automation sowie die damit verbundenen variablen Interaktions- und Präsentationsstrategien der Aufklärungsdaten in Gestalt der drei Automationsgrade als probabler Lösungsvorschlag anwendbar sein können.

Es konnte gezeigt werden, dass und wie prinzipiell den Schwächen maschineller Datenauswertung durch die gezielte Involvierung menschlicher Fähigkeiten und dem zielgerichteten Zusammenwirken von Menschen und Maschinen begegnet werden kann. Ebenso wurde deutlich, dass die Prozesskette zur maschinellen Objektaufklärung prinzipiell bei defektiver oder unvollständiger maschineller Abarbeitung durch Operateure zur Laufzeit restauriert werden kann.

Die Demonstration der zielgerichteten Involvierung des Kommandanten erfolgte dabei in dynamischen, simulierten MUM-T- Missionsflügen, wobei die Kommandanten Produkte der Automationsgrade während des laufenden Flugs auf den *Multi-Function-Displays* des Helikoptercockpits empfingen und diese nahezu ganzheitlich erfolgreich bearbeiteten.

Im vorliegenden Fall konnte dadurch die Aufklärungsleistung des MUM-T - Verbandes aufrechterhalten und über alle Missionen hinweg sichergestellt werden. Ebenso konnten positive Effekte hinsichtlich der Leistungsfähigkeit des Gesamtsystems bei einer vertretbaren zusätzlichen Beanspruchung der Operateure belegt und zusätzlich das ausgeprägte Vertrauen der Operateure quantifiziert werden.

6.5 Empfehlungen und Ausblick

Abschließend werden Empfehlungen sowie ein Ausblick formuliert.

6.5.1 Empfehlungen

Empfehlungen können zunächst klar hinsichtlich der Weiterentwicklung und Erhöhung der Robustheit von Funktionalitäten der automatisierten Datenauswertung und Objekterkennung ausgesprochen werden. Dabei steht die automatisierte, robuste Erkennung und Identifizierung von Fahrzeugen und Personen im Vordergrund, da diese zu den hauptsächlichen Bedrohungen des Transporthelikopters zählen.

Als sinnvolle Weiterentwicklungen des *Sensors- und Perzeptionsmanagements* werden die automatisierte und dynamische Nachführung kritischer Betriebsparameter (Freiheitsgrade) der Sensoren, der schwenkbaren Sensoraufhängung sowie der Positionierung des UAVs selbst betrachtet, um bestehende Objekterkennungsalgorithmen in den optimalen Bereichen derer Betriebsbänder zu betreiben.

Beginnend könnte und sollte die Entwicklung von spezialisierten Verfahren aus dem Bereich der Objekterkennung und Datenfusion immer erst für einen Teilbereich des Gesamtproblems forciert werden, um daraus anfangs für wenige Anwendungsfälle möglichst robuste und funktional deterministische (hinsichtlich der Fehlerrate und Zuverlässigkeit möglichst exakt beschreibbare) Automationsfunktionen zu erhalten.

Weitere Empfehlungen können zudem hinsichtlich einer kontinuierlichen, online-fähigen Leistungsbewertung solcher und generell weiterer maschineller, fehlerbehafteter Prozesse ausgesprochen werden. Wie in dieser Arbeit erfolgreich demonstriert wurde, können mittels einer solchen „Selbstkritikfähigkeit“ erfolgreich Maßnahmen zur Mitigation degradierender maschineller Prozesse eigenständig durch ein technisches System initiiert werden.

Die Variabilität und Eigenschaft der Handlungsfähigkeit kann als Grundcharakteristik automatisierter Systeme empfohlen werden, die mit ähnlichen gelagerten Herausforderungen konfrontiert sind. Dazu zählen zum einen die Unsicherheitsbehaftung einer automatisierten Datenauswertung unbekannter Eingangsdaten und zum anderen ein menschlicher Operateur oder Endanwender, welche eine Kontroll- oder Führungsschleife schließen soll. Als praktikabel hat sich in der vorliegenden Anwendung die zielorientierte, dynamische Aufgabenteilung zwischen dem Menschen und der Maschine herausgestellt. Damit konnte der komplexe Objektklassifizierungsprozess im Falle der Degradierung der maschinellen Fähigkeiten zielgerichtet mit menschlicher Kognition angereichert und vervollständigt werden.

Daher kann das generelle Konzept des zielgerichteten Einbezugs menschlicher Fähigkeiten in Prozessketten und speziell in das *Sensor- und Perzeptionsmanagement* hinsichtlich der Erweiterung dessen Fähigkeiten und Einsatzmöglichkeiten empfohlen auch auf andere Anwendungsfelder übertragen werden.

6.5.2 Ausblick

Die Objekterkennung in der Umwelt bzw. die Umweltwahrnehmung gilt derzeit generell in vielen Bereichen der Automatisierung (Luftfahrt, Robotik, „*Autonomes Fahren*“ im Straßenverkehr) als nicht komplett gelöstes Problem bzw. beständige Herausforderung.

Mittelfristig werden sich jedoch viele technische Umsetzungen noch aufgrund

- der vielen Freiheitsgrade der Algorithmen (Skalierung, Ansichtswinkel, Bildauflösung, Belichtung, etc.),
- den sich daraus ergebenden charakteristischen, für die jeweiligen Algorithmen spezifischen Betriebsbändern sowie
- den veränderlichen Einsatzbedingungen in einer dynamischen Umwelt (Kapitel 2.1.2 und 2.1.3)

als risikobehaftet erweisen und werden wohl für einen unabsehbaren Zeitrahmen weiterhin nachgelagerte Maßnahmen zur Handhabung der Unsicherheiten erfordern.

Das Prinzip der Adaptivität in Kombination mit mehreren Automationsgraden und partieller, situativer Integration eines Operateurs oder Nutzers kann auf andere Domänen, in welchen diese mit potentiell unsicherheitsbehaftetem Prozesse konfrontiert werden, übertragen werden.

Als aktuelles, praxisbezogenes und alltägliches Beispiel wird hier die Automatisierung des Straßenverkehres, das sogenannte *„Autonome Fahren“*, herangezogen. Im Fokus steht insbesondere die Primarfunktionen des eigenständigen Fahrens des Fahrzeugs, diese ist jedoch maßgeblich von der maschinellen Umweltwahrnehmung und -interpretation abhängig. Dabei befindet sich der derzeitige technische Reifegrad sogenannter ADAS-Systeme (*Advanced Driver Assistance Systems*) am Übergang zwischen dem *Fahrmodus* der *Teilautomatisierung* sowie der *Bedingten Automatisierung* (SAE[79]-Levels 2 und 3). Dieser Übergang ist deshalb besonders kritisch und anspruchsvoll, weil oberhalb des SAE-Levels 2 alleinig dem automatisierten Fahrsystem (und damit dem Computer) die (potentiell fehlerbehaftete) Umweltbeobachtung vollständig obliegt.

Ein derzeit bedauerlicherweise gebräuchlicher und im Alltagseinsatz etablierter Ansatz im Automotive-Umfeld bei Fehlfunktionen technischer sensorgestützter Systeme besteht im Deaktivieren oder Ausschalten der Systeme, wobei die Rückgabe der Ausführungshoheit schlagartig und unvermittelt an den Fahrer zurückgegeben wird (beispielsweise in Baustellen, bei unklaren Fahrbahnmarkierungen oder uneindeutiger Beschilderung). Dort könnte beispielsweise eine temporäre gemeinschaftliche Durch- beziehungsweise Weiterführung und damit Aufrechterhaltung der Aufgabe zur Überbrückung von Phasen der Unsicherheit angewendet werden, ohne die eigentliche Führungsfunktion schlagartig komplett abzuschalten. Stattdessen wird der Fahrer durch technische Vorrichtungen wie Berührungssensoren im Lenkrad zur ständigen Bereitschaft gezwungen, die Führungsfunktion schlagartig zu übernehmen und komplett manuell durchzuführen.

In dieser Arbeit wurde deshalb für solche Fälle ein entsprechender Ansatz im Sinne menschzentrierter Automation vorgeschlagen.

* * *

[79] SAE J3016: Norm, Erstfassung aus 2016. [SAE international, 2016]

Bibliographie

Ähnlichkeits- und Distanzmaße. (2007). In *Multivariate Statistik in der Ökologie: Eine Einführung* (pp. 47–55). Berlin, Heidelberg: Springer Berlin Heidelberg. doi:10.1007/978-3-540-37706-1_4

Allen, R. J., Baddeley, A. D., & Hitch, G. J. (2006). Is the binding of visual features in working memory resource-demanding? *Journal of Experimental Psychology. General*, *135*(2), 298–313. doi:10.1037/0096-3445.135.2.298

Allen, R. J., Hitch, G. J., Mate, J., & Baddeley, A. (2012). Feature binding and attention in working memory: A resolution of previous contradictory findings. *The Quarterly Journal of Experimental Psychology*, *65*(March 2015), 2369–2383. doi:10.1080/17470218.2012.687384

Alty, J. L. (2003). Cognitive Workload and Adaptive Systems. In E. Hollnagel (Ed.), *Handbook of Cognitive Task Design* (1st ed., pp. 129–146). Lawrence Erlbaum Publishers.

Ammar, A., Koubaa, A., Ahmed, M., & Saad, A. (2019). Aerial Images Processing for Car Detection using Convolutional Neural Networks: Comparison between Faster R-CNN and YoloV3. Retrieved from http://arxiv.org/abs/1910.07234

Arquilla, J. (2011). *INSURGENTS, RAIDERS, AND BANDITS: How Masters of Irregular Warfare Have Shaped Our World*. Ivan R. Dee; 56635th edition (June 16, 2011).

Audebert, N., Le Saux, B., & Lefèvre, S. (2017). Segment-before-detect: Vehicle detection and classification through semantic segmentation of aerial images. *Remote Sensing*, *9*(4). doi:10.3390/rs9040368

Baddeley, A. (2003). Working memory: Looking back and looking forward. *Nature Reviews Neuroscience*, *4*(10), 829–839. doi:10.1038/nrn1201

Baddeley, A. D., Allen, R. J., & Hitch, G. J. (2011). Binding in visual working memory: The role of the episodic buffer. *Neuropsychologia*, *49*(6), 1393–1400. doi:10.1016/j.neuropsychologia.2010.12.042

Bainbridge, L. (1983). Ironies of Automation. *Automatica*, *19*(6), 775–779.

Baker, A. L., Phillips, E. K., Ullman, D., & Keebler, J. R. (2018). Toward an Understanding of Trust Repair in Human-Robot Interaction. *ACM Transactions on Interactive Intelligent Systems*, *8*(4), 1–30. doi:10.1145/3181671

Bejiga, M. B., Zeggada, A., Nouffidj, A., & Melgani, F. (2017). A convolutional neural network approach for assisting avalanche search and rescue operations with UAV imagery. *Remote Sensing*, *9*(2). doi:10.3390/rs9020100

Beleznai, C., & Bischof, H. (2009). Fast Human Detection in Crowded Scenes by Contour Integration and Local Shape Estimation. *2009 IEEE Computer Society Conference on Computer Vision and Pattern Recognition Workshops, CVPR Workshops 2009*, 2246–2253. doi:10.1109/CVPRW.2009.5206564

Billings, C. E. (1996). *Human-Centered Aviation Automation: Principles and Guidelines (NASA Technical Memorandum 110381)*. Moffett Field, California.

Billings, C. E. (1997). *Aviation Automation: The Search for a Human-Centered Approach*. *Aviation Automation: The Search for a Human-Centered Approach*. Lawrence Erlbaum Associates.

Billings, C., Lauber, J., Funkhouser, H., Lyman, E. G., & Huff, E. (1976). *NASA TECHNICAL MEMORANDUM (TM X-3445)*. Moffett Field, CA, USA.

Birolini, A. (2010). *Reliability Engineering: Theory and Practice* (6th ed.). Springer-Verlag Berlin Heidelberg. doi:10.1007/978-3-642-14952-8

Blasch, E. (2006). Level 5 (user refinement) issues supporting information fusion management. *2006 9th International Conference on Information Fusion, FUSION*, *5*. doi:10.1109/ICIF.2006.301581

Blasch, E., & Plano, S. (2005). DFIG level 5 (user refinement) issues supporting situational assessment reasoning. *2005 7th International Conference on Information Fusion, FUSION*, *1*(July). doi:10.1109/ICIF.2005.1591828

Boehm-Davis, D. A., Curry, R. E., Wiener, E. L., & Harrison, R. L. (1983). Human Factors of Flight-Deck Automation - NASA lndustry Workshop. *Ergonomics*, *26*(January 1981), 953–961.

Boehm, F., & Schulte, A. (2012). Scalable COTS Based Data Processing and Distribution Architecture for UAV Technology Demonstrators. In *European Telemetry and Test Conference (ETC)*. Munich, Germany.

Boost. (2019). Boost C++ Libraries. Retrieved from https://www.boost.org/

Borst, C. (2016). Shared Mental Models in Human-Machine Systems. *IFAC-PapersOnLine*, *49*(19), 195–200. doi:10.1016/j.ifacol.2016.10.517

Brand, Y., Rudnick, G., & Schmitt, F. (2018). Assistenz und Delegation mit kognitiver Automation in der luftgestützten Multi-UAV Führung. In *7. Interdisziplinärer Workshop Kognitive Systeme: Mensch, Teams, Systeme und Automaten.* Braunschweig.

Brand, Y., Schmitt, F., Heilemann, F., & Schulte, A. (2019). Adaptive Assistenzsysteme für den Einsatz in Manned-unmanned Teaming Missionen. In *Wehrwissenschaftliche Forschung Jahresbericht 2018. Bundesministerium der Verteidigung.*

Brand, Y., & Schulte, A. (2018). Design and Evaluation of a Workload-Adaptive Associate System for Cockpit Crews. In D. Harris (Ed.), *Engineering Psychology and Cognitive Ergonomics - 15th International Conference, EPCE 2018, Held as Part of HCI International 2018* (Vol. 10906 LNAI, pp. 3–18). Cham: Springer, Cham. doi:10.1007/978-3-319-91122-9_1

Breznitz, S. (1984). *Cry Wolf: The Psychology of False Alarms*. (P. Press, Ed.). New York.

Brown, J. (1958). Some Tests of the Decay Theory of Immediate Memory. *Quarterly Journal of Experimental Psychology*, *10*(1), 12–21. doi:10.1080/17470215808416249

Brown, L. A., & Brockmole, J. R. (2010). The role of attention in binding visual features in working memory: evidence from cognitive ageing. *The Quarterly Journal of Experimental Psychology*, *63*(10), 2067–2079. doi:10.1080/17470211003721675

Bubb, H. (2006). A consideration of the nature of work and the consequences for the human-oriented design of production and products. *Applied Ergonomics*, *37*(4 SPEC. ISS.), 401–407. doi:10.1016/j.apergo.2006.04.004

Bubb, H., Bengler, K., Grünen, R. E., & Vollrath, M. (2015). *Automobilergonomie*. doi:10.1007/978-3-8348-2297-0

Budiyono, A. (2007). Advances in Unmanned Aerial Vehicles. *Advances in Unmanned Aerial Vehicles*, (January 2007). doi:10.1007/978-1-4020-6114-1

Bundeswehr. (2011). *COMBAT OPERATING PROCEDURES AIR MANOEUVRE (COP AM) - Einsatzgrundsätze und -verfahren luftbeweglicher Kräfte 03/2011*. Bundeswehr (Kdr LBwglBrig 1), VS-NfD.

Byrne, E. A., & Parasuraman, R. (1996). Psychophysiology and adaptive automation. *Biological Psychology*, *42*(3), 249–268. doi:10.1016/0301-0511(95)05161-9

Cain, B. (2007). A Review of the Mental Workload Literature. *Defence Research and Development Toronto (Canada)*, (1998), 4-1-4–34. Retrieved from http://www.dtic.mil/cgi-bin/GetTRDoc?Location=U2&doc=GetTRDoc.pdf&AD=ADA474193

Canonical Ltd. (2018). Ubuntu Linux 18.04 LTS. Retrieved from https://ubuntu.com/

Cao, X., Lan, J., Yan, P., & Li, X. (2011). KLT Feature Based Vehicle Detection and Tracking in Airborne Videos. *2011 Sixth International Conference on Image and Graphics*, 673–678. doi:10.1109/ICIG.2011.92

Card, S. K., Mackinlay, J. D., & Schneiderman, B. (1999). *Readings in Information Visualization: Using Vision to Think*. San Francisco: Morgan Kaufmann. Retrieved from http://www.researchgate.net/publication/248879117_Readings_in_Information_Visualization_Using_Vision_to_Think._San_Francisco_Morgan_Kaufmann

Carmenta. (2020). Carmenta Engine SDK. Retrieved from https://carmenta.com/en/geospatial-technologies/carmenta-engine/

Chen, X., & Meng, Q. (2016). Robust vehicle tracking and detection from UAVs. *Proceedings of the 2015 7th International Conference of Soft Computing and Pattern Recognition, SoCPaR 2015*, 241–246. doi:10.1109/SOCPAR.2015.7492814

Chen, X. Y., Xiang, S. M., Liu, C. L., & Pan, C. H. (2014). Vehicle Detection in Satellite Images by Hybrid Deep Convolutional Neural Networks. *Ieee Geoscience and Remote Sensing Letters*, *11*(10), 1797–1801. doi:10.1109/Lgrs.2014.2309695

Chun, M. M. (2011). Visual working memory as visual attention sustained internally over time. *Neuropsychologia*, *49*(6), 1407–1409. doi:10.1016/j.neuropsychologia.2011.01.029

Clough, B. T. (2002). Metrics, schmetrics! How the heck do you determine a UAV's autonomy anyway? *AIAA 1st Technical Conference and Workshop on Unmanned Aerospace Vehicles, Systems, Technologies, and Operations.*, (990), 313–319. Retrieved from http://oai.dtic.mil/oai/oai?verb=getRecord&metadataPrefix=html&identifier=ADA515926

Cohen, M. S., Parasuraman, R., & Freeman, J. T. (1998). Trust in decision aids: A model and its training implications. In *Proceedings of the Command and Control Research and Technology Symposium*. Citeseer.

Colomina, I., & Molina, P. (2014). Unmanned aerial systems for photogrammetry and remote sensing: A review. *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing*, *92*, 79–97. doi:10.1016/j.isprsjprs.2014.02.013

Cowan, N. (2011). The focus of attention as observed in visual working memory tasks: Making sense of competing claims. *Neuropsychologia*, *49*(6), 1401–1406. doi:10.1016/j.neuropsychologia.2011.01.035

Cummings, M. L., Bruni, S., Mercier, S., & Mitchell, P. J. (2007). Automation Architecture for Single Operator, Multiple UAV Command and Control. *The International C2 Journal | Automation Architecture for Single Operator, Multiple UAV Command and Control*, *1*(No 2), 1–24.

DaimlerAG. (1975). "Tempomat" aus Registerauskunft Deutsches Patent- und Markenamt. Deutschland. Retrieved from https://register.dpma.de/DPMAregister/marke/register/932012/DE

Dalal, N., & Triggs, B. (2005). Histograms of Oriented Gradients for Human Detection. In *2005 IEEE Computer Society Conference on Computer Vision and Pattern Recognition (CVPR'05)* (Vol. 1, pp. 886–893). San Diego, CA, USA: IEEE. doi:10.1109/CVPR.2005.177

De Visser, E., & Parasuraman, R. (2011). Adaptive Aiding of Human-Robot Teaming:Effects of Imperfect Automation on Performance, Trust, and Workload. *Journal of Cognitive Engineering and Decision Making*, *5*(2), 209–231. doi:10.1177/1555343411410160

De Waard, D. (1996). *The Measurement of Drivers' Mental Workload*. Ph.D. Thesis. University of Groningen.

Debernard, S., Vanderhaegen, F., & Millot, P. (1993). Experimental investigation of dynamic allocation of tasks between air traffic controller and A.I.Systems. *IFAC Symposia Series*, *25*(5), 95–100. doi:10.1016/S1474-6670(17)50176-7

DeGreene, K. B. (1970). *Systems Psychology*. New York: The McGraw-Hill Companies.

Dekker, S. W. a., & Woods, D. D. (2002). MABA-MABA or Abracadabra? *Cognition, Technology & Work*, *4*(4), 240–244. doi:10.1007/s101110200022

DIN/EN/ISO 10075-1:2000. (2000). Ergonomische Grundlagen bezüglich psychischer Arbeitsbelastung. Teil 1: Allgemeines und Begriffe. Normenausschuss Ergonomie im Deutschen Institut für Normung.

DIN/EN/ISO 10075-1:2017. (2017). Ergonomische Grundlagen bezüglich psychischer Arbeitsbelastung Teil 1: Allgemeines und Begriffe. *Deutsche Fassung*. Berlin: Normenausschuss Ergonomie im Deutschen Institut für Normung e.V.

DIN 40041. (1990). Zuverlässigkeit.

Director of Army Doctrine, D.-5-4. (2004). *Intelligence, Surveillance, Target Acquisition and Reconnaissance (Istar) (English). B-Gl-352-001/Fp-001*.

Dixon, S. R., & Wickens, C. D. (2006). Automation Reliability in Unmanned Aerial Vehicle Control: A Reliance-Compliance Model of Automation Dependence in High Workload. *Human Factors: The Journal of the Human Factors and Ergonomics Society*, *48*(3), 474–486. doi:10.1518/001872006778606822

Dixon, S. R., Wickens, C. D., & Chang, D. (2004). Unmanned Aerial Vehicle Flight Control: False Alarms versus Misses. In *Proceedings of the Human Factors and Ergonomics Society Annual Meeting* (Vol. 48, pp. 152–156). Santa Monica. doi:10.1177/154193120404800133

Dixon, S., & Wickens, C. (2003). Imperfect automation in unmanned aerial vehicle flight control. *Institute of Aviation, Savoy, IL*, (August), 0–79. Retrieved from http://scholar.google.com/scholar?hl=en&btnG=Search&q=intitle:Imperfect+Automation+in+Unmanned+Aerial+Vehicle+Flight+Control#0

Dominguez, C. (1994). *Can SA be defined?* (M. Vidulich, C. Dominguez, E. Vogel, & G. McMillan, Eds.)*Situation awareness: Papers and annotated bibliography, Interim Report AL/CF-TR-1994- 0085*. Air Force Systems Command Wright Patterson AFB, OH.

Dorsch, L. der P. (2020). Salienz. Retrieved January 4, 2021, from https://dorsch.hogrefe.com/stichwort/salienz

Draper, J. V. (1995). Teleoperators for advanced manufacturing: Applications and human factors challenges. *International Journal of Human Factors in Manufacturing*, *5*(1), 53–85. doi:10.1002/hfm.4530050105

Dudgeon, D., & Lacoss, R. (1993). An Overview of Automatic Target Recognition. *The Lincoln Laboratory Journal*, *6*(1), 3–10.

Dzindolet, M. T., Pierce, L. G., Beck, H. P., & Dawe, L. A. (2005). The Perceived Utility of Human and Automated Aids in a Visual Detection Task. *Human Factors: The Journal of the Human Factors and Ergonomics Society*, *44*(1), 79–94. doi:10.1518/0018720024494856

Eid, M., Gollwitzer, M., & Schmitt, M. (2010). *Statistik und Forschungsmethoden*. *Grundlagen Psychologie* (1st ed.). Weinheim, Basel: Beltz Verlag. Retrieved from https://www.beltz.de/fachmedien/psychologie/buecher/produkt_produktdetails/8413-statistik_und_forschungsmethoden.html

Elsley, J. V, & Parmentier, F. B. R. (2009). Is verbal-spatial binding in working memory impaired by a concurrent memory load? *Quarterly Journal of Experimental Psychology (2006)*, *62*(9), 1696–705. doi:10.1080/17470210902811231

Endsley, M. R. (1987). The application of human factors to the development of expert systems for advanced cockpits. *Human Factors Society 31st Annual Meeting*, 1388–1392.

Endsley, M. R. (1995). Toward a Theory of Situation Awareness in Dynamic Systems. *Human Factors: The Journal of the Human Factors and Ergonomics Society*, *37*, 32-64(33). doi:doi:10.1518/001872095779049543

Endsley, M. R., & Kaber, D. B. (1999). Level of automation effects on performance, situation awareness and workload in a dynamic control task. *Ergonomics*, 462–492. Retrieved from http://www.tandfonline.com/doi/abs/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: The Journal of the Human Factors and Ergonomics Society*, *37*(2), 381–394. doi:10.1518/001872095779064555

Erdelj, M., Natalizio, E., Chowdhury, K. R., & Akyildiz, I. F. (2017). Help from the Sky: Leveraging UAVs for Disaster Management. *IEEE Pervasive Computing*, *16*(1), 24–32. doi:10.1109/MPRV.2017.11

Frohm, J., Lindström, V., Stahre, J., & Winroth, M. (2008). Levels of automation in manufacturing. *Ergonomia - International Journal of Ergonomics and Human Factors*, *30*(3).

Gerrig, R. J., & Zimbardo, P. G. (2008). *Psychologie* (18th ed.). München: Pearson Studium.

Gleason, J., Nefian, A., Bouyssounousse, X., Fong, T., & Bebis, G. (2011). Vehicle Detection from Aerial Imagery. *IEEE International Conference on Robotics and Automation (ICRA)*, 2065–2070. Retrieved from http://ieeexplore.ieee.org/xpls/abs_all.jsp?arnumber=5979853

Greensteins, J. S., & Lam, S. T. (1985). An experimental study of dialogue-based communication for dynamic human-computer task allocation. *International Journal of Man-Machine Studies*, *23*(6), 605–621. doi:10.1016/S0020-7373(85)80061-4

Grote, G, Weik, S., Wäfler, T., & Zölch, M. (1995). Complementary allocation of functions in automated work systems. In Y. Anzai, K. Ogawa, & H. Mori (Eds.), *Symbiosis of Human and Artifact* (Vol. 20, pp. 989–994). Elsevier. doi:https://doi.org/10.1016/S0921-2647(06)80342-4

Grote, Gudela, Ryser, C., Wafler, T., Windischer, A., & Weik, S. (2000). KOMPASS: A method for complementary function allocation in automated work systems. *International Journal of Human Computer Studies*, *52*(2), 267–287. doi:10.1006/ijhc.1999.0289

Hadley, J., Prinzel, L. J., Freeman, F. G., & Mikulka, P. J. (1999). Behavioral, subjective, and psychophysiological correlates of various schedules of short-cycle automation. In M. Scerbo & M. Mouloua (Eds.), *Automation technology and human performance: Current research and trends* (pp. 139–143). Mahwah NJ: Erlbaum.

Hajehasani, S. (2017). Investigating different methods of vehicle detection from aerial images. *Bulletin de La Société Royale Des Sciences de Liège [En Ligne]*, *86*(Special issue), 518–527. Retrieved from https://popups.uliege.be/0037-9565/index.php?id=6856

Hall, M. J. M., Hall, C. S. A., & Tate, T. (2000). Removing the HCI Bottleneck: How the Human-Computer Interface (HCI) Affects the Performance of Data Fusion Systems. In *Proceedings of the 2000 MSS National Symposium on Sensor and Data Fusion* (Vol. II, pp. 89–104). Retrieved from http://scholar.google.com/scholar?hl=en&btnG=Search&q=intitle:Removing+the+HCI+Bottleneck:+How+the+Human-Computer+Interface+(HCI)+Affects+the+Performance+of+Data+Fusion+Systems#0%5Cnhttp://dsp-book.narod.ru/HMDF/2379ch19.pdf%5Cnhttp://www.mendeley.com/res

Harris, C. R., Millman, K. J., van der Walt, S. J., Gommers, R., Virtanen, P., Cournapeau, D., … Oliphant, T. E. (2020). Array programming with NumPy. *Nature*, *585*(7825), 357–362. doi:10.1038/s41586-020-2649-2

Hart, S. G. (2006). Nasa-Task Load Index (NASA-TLX); 20 Years Later. *Proceedings of the Human Factors and Ergonomics Society Annual Meeting*, *50*(9), 904–908. doi:10.1177/154193120605000909

Hart, S. G., & Staveland, L. E. (1988). Development of NASA-TLX (Task Load Index): Results of Empirical and Theoretical Research. *Advances in Psychology*, *52*, 139–183. doi:10.1016/S0166-4115(08)62386-9

Hellert, C. (2019). *Algorithmenauswahl für den adaptiven Sensoreinsatz an Bord unbemannter Luftfahrzeuge*. Dissertation. Universität der Bundeswehr München (UniBwM).

Hellert, C., Smirnov, D., Russ, M., & Stuetz, P. (2012). A High Level Active Perception Concept For UAV Mission Scenarios. In *Deutscher Luft- und Raumfahrtkongress 2012*. Berlin, Germany: Deutsche Gesellschaft für Luft- und Raumfahrt - Lilienthal-Oberth e.V.

Hellert, C., & Stütz, P. (2017). Performance Prediction and Selection of Aerial Perception Functions during UAV Missions. In in press (Ed.), *AeroConf 2017*. Big Sky, Montana.

Hellert, C., & Stütz, P. (2018). Adaptive Algorithmenauswahl für die Fahrzeugdetektion auf Luftbildaufnahmen. In *Forum Bildverarbeitung* (p. 12).

Herczeg, M. (2014). *Prozessführungssysteme: Sicherheitskritische Mensch-Maschine-Systeme und interaktive Medien zur Überwachung und Steuerung von Prozessen in Echtzeit* (1st ed.). Oldenbourg: De Gruyter.

Hero, A. O., Castañón, D. A., Cochran, D., & Kastella, K. (2008). *Foundations and Applications of Sensor Management*. New York: Springer. doi:10.1007/978-0-387-49819-5

Hero, A. O., & Cochran, D. (2011). Sensor Management: Past, Present, and Future. *IEEE Sensors Journal*, *11*(12), 3064–3075. doi:10.1109/JSEN.2011.2167964

Hicks, J. S., Durbin, D. B., & Sperling, L. T. C. B. (2009). AH-64D Apache Longbow / Video from UAS for Interoperability Teaming Level II (VUIT-2) Aircrew Workload Assessment, (April).

Hillesheim, A. J., & Rusnock, C. F. (2016). Predicting the effects of automation reliability rates on human-Automation team performance. In *Proceedings - Winter Simulation Conference 2016*.

Hoffman, M. (1997). Multi-Sensor Track Classification in Rotorcraft Pilot's Associate Data Fusion. *ANNUAL FORUM PROCEEDINGS-AMERICAN …*. Retrieved from http://www.atl.external.lmco.com/papers/895.pdf

Hollnagel, E., & Woods, D. (2006). Chapter 10: Automation Surprises. *Joint Cognitive Systems: Patterns in Cognitive Systems Engineering*, *10*, 113–142.

Honecker, F. (2021). *Aufgabenzentriertes Pilotenassistenzsystem mit maschineller Tätigkeitserkennung und Workload-Abschätzung*. Dissertation. Fakultät für Luft- und Raumfahrttechnik, Universität der Bundeswehr München (UniBwM).

Honecker, F., Brand, Y., & Schulte, A. (2016). A Task-centered Approach for Workload-adaptive Pilot Associate Systems. In *32nd European Association for Aviation Psychology Conference (EEAP32)*. Cascais, Portugal: European Association for Aviation Psychology.

Honecker, F., & Schulte, A. (2017a). Automated Online Determination of Pilot Activity Under Uncertainty by Using Evidential Reasoning. In D. Harris (Ed.), *Engineering Psychology and Cognitive Ergonomics: Cognition and Design* (pp. 231–250). Cham: Springer, Cham. doi:10.1007/978-3-319-58475-1_18

Honecker, F., & Schulte, A. (2017b). *Kognitive und Workload-adaptive Unterstützung von Hubschrauberpiloten in Multi-UAV Missionen*. (D. S. & A. Kluge, Ed.)*Kognitive Systeme 2017-1*. Duisburg-Essen: DuEPublico.

Honecker, F., & Schulte, A. (2019). Full-Mission Human-in-the-Loop Experiments to Evaluate an Automatic Activity Determination System for Adaptive Automation. In W. Karwowski & T. Ahram (Eds.), *2nd. International Conference on Intelligent Human Systems Integration* (Vol. 903, pp. 731–737). San Diego, CA: Springer Cham. doi:10.1007/978-3-030-11051-2_111

Hunter, J. D. (2007). Matplotlib: A 2D graphics environment. *Computing in Science \& Engineering*. IEEE Computer Society.

IEA. (2021). The International Ergonomics Association. Retrieved from https://iea.cc/what-is-ergonomics/

Inagaki, T. (2003a). Adaptive automation: Design of authority for system safety. *IFAC Proceedings Volumes*, *36*(14), 13–22. doi:10.1016/S1474-6670(17)32389-3

Inagaki, T. (2003b). Adaptive Automation: Sharing and Trading of Control. In *Handbook of Cognitive Task Design* (Vol. 20031153, pp. 147–169). doi:10.1201/9781410607775

Interview Europäische Sicherheit & Technik (ES&T). (2019). Manned – Unmanned Teaming gehört derzeit zu den faszinierendsten Bereichen im Flugzeugbau – Interview mit Mark R. Henning. Retrieved December 31, 2020, from https://esut.de/2019/09/fachbeitraege/industrie-fachbeitraege/15424/manned-unmanned-teaming-gehoert-derzeit-zu-den-faszinierendsten-bereichen-im-flugzeugbau-interview-mit-mark-r-henning/

Iriarte, M. (2017). MUM-T operations on the U.S. Army's UAS roadmap. Retrieved March 1, 2021, from http://mil-embedded.com/articles/mum-t-armys-uas-roadmap/

Jameson, S., Stoneking, C., Cooper, D. G., Gerken, P., Garrett, C., & Hughes, A. (2005). Data Fusion for the Apache Longbow: Implementation and Experiences. *Annual Forum Proceedings-American Helicopter Society*, *61*(1), 585.

Jankovich, J. P. (1973). *HUMAN FACTORS ENGINEERING DESIGN OF AMMUNITION PRODUCTION LINE ROCKEYE MK20 John*. Crane, Indiana.

Johannsen, G. (1993). *Mensch-Maschine-Systeme* (1st ed.). Springer-Verlag Berlin Heidelberg. doi:10.1007/978-3-642-46785-1

Johnson, J. S., Hollingworth, A., & Luck, S. J. (2008). The role of attention in the maintenance of feature bindings in visual short-term memory. *Journal of Expimental Psychology-Human Pception and Pformance*, *34*(1), 41–55. doi:10.1037/0096-1523.34.1.41

Jordan, N. (1963). Allocation of functions between man and machines in automated systems. *Journal of Applied Psychology*, *47*(3), 161–165. doi:10.1037/h0043729

Kaaniche, K., Champion, B., Pegard, C., & Vasseur, P. (2005). A vision algorithm for dynamic detection of moving vehicles with a UAV. *International Conference on Robotics and Automation*, (April), 1878–1883. Retrieved from http://ieeexplore.ieee.org/xpls/abs_all.jsp?arnumber=1570387

Kaber, D. B., & Riley, J. M. (1999). Adaptive Automation of a Dynamic Control Task Based on Secondary Task Workload Measurement. *International Journal of Cognitive Ergonomics*, *3*(3), 169–187. doi:10.1207/s15327566ijce0303_1

Kaber, D. B., Wright, M. C., Prinzel, L. J., & Clamann, M. P. (2005). Adaptive Automation of Human-Machine System Information-Processing Functions. *Human Factors: The Journal of the Human Factors and Ergonomics Society*, *47*(4), 730–741. doi:10.1518/001872005775570989

Kanistras, K., Martins, G., Rutherford, M. J., & Valavanis, K. P. (2013). A survey of unmanned aerial vehicles (UAVs) for traffic monitoring. In *2013 International Conference on Unmanned Aircraft Systems (ICUAS)* (pp. 221–234). Atlanta, GA: IEEE. doi:10.1109/ICUAS.2013.6564694

Kanistras, K., Martins, G., Rutherford, M. J., & Valvanis, K. P. (2015). A Survey of Unmanned Aerial Vehicles for Traffic Surveillance. In K. P. Valavanis & G. J. Vachtsevanos (Eds.), *Handbook of unmanned aerial vehicles* (pp. 2643–2666). Springer Netherlands. doi:10.1007/978-90-481-9707-1_122

Kantowitz, B. H. (1987). Mental Workload. In P. A. Hancock (Ed.), *Human Factors Psychology* (Vol. 47, pp. 81–121). North-Holland. doi:https://doi.org/10.1016/S0166-4115(08)62307-9

Kantowitz, B. H., & Casper, P. A. (1988). Human Workload in Aviation. In Earl L. Wiener & D. C. Nagel (Eds.), *Academic Press series in cognition and perception. Human factors in aviation.* (pp. 157–187). San Diego, CA, US: Academic Press.

Karau, S. J., & Williams, K. D. (1993). Social loafing: A meta-analytic review and theoretical integration. *Journal of Personality and Social Psychology*, *65*(4), 681–706. doi:10.1037/0022-3514.65.4.681

Kidwell, B., Calhoun, G. L., Ruff, H. A., & Parasuraman, R. (2012). Adaptable and adaptive automation for supervisory control of multiple autonomous vehicles. *Proceedings of the Human Factors and Ergonomics Society*, (2007), 428–432. doi:10.1177/1071181312561096

King, D. E. (2009). Dlib-ml: A Machine Learning Toolkit. *Journal of Machine Learning Research*, *10*, 1755–1758.

Knoll, P. (2008). *Fahrerassistenzsysteme*. (Robert Bosch GmbH, Ed.).

Koch, K., McLean, J., Segev, R., Freed, M. A., Berry, M. J., Balasubramanian, V., & Sterling, P. (2006). How Much the Eye Tells the Brain. *Current Biology*, *16*(14), 1428–1434. doi:10.1016/j.cub.2006.05.056

Koga, Y., Miyazaki, H., & Shibasaki, R. (2018). A CNN-based method of vehicle detection from aerial images using hard example mining. *Remote Sensing*, *10*(1). doi:10.3390/rs10010124

Kovbasiuk, S., Kanevskyy, L., Chernyshuk, S., & Romanchuk, M. (2020). Detection of vehicles on images obtained from unmanned aerial vehicles using instance segmentation. In *2020 IEEE 15th International Conference on Advanced Trends in Radioelectronics, Telecommunications and Computer Engineering (TCSET)* (pp. 267–271). doi:10.1109/TCSET49122.2020.235437

Kozempel, K., Hausburg, M., & Reulke, R. (2011). Airborne Vehicle Detection Using SURF-Descriptors and Support Vector Machines. *Integrated and Sustainable Transportation System (FISTS), 2011 IEEE Forum On*, 73–78.

Kraiss, K.-F., & Schmidtke, H. (2001). Funktionsteilung Mensch-Maschine. In *Handbuch der Ergonomie : (HdE) ; mit ergonomischen Konstruktionsrichtlinien*. Steinebach/Wörthsee: Bundesamt für Wehrtechnik und Beschaffung.

Krump, M., Ruß, M., & Stütz, P. (2020). Deep Learning Algorithms for Vehicle Detection on UAV Platforms: First Investigations on the Effects of Synthetic Training. In J. Mazal, A. Fagiolini, & P. Vasik (Eds.), *Modelling and Simulation for Autonomous Systems* (pp. 50–70). Cham: Springer International Publishing.

Lange, S. (2003). SWP-Studie Flugroboter statt bemannter Militärflugzeuge? *SWP-Studie*, *S 29*, 31.

Langer, E. J. (1975). The illusion of control. *Journal of Personality and Social Psychology*, *32*(2), 311–328. doi:10.1037/0022-3514.32.2.311

Lee, J. D., & Moray, N. (1994). Trust, self-confidence, and operators' adaptation to automation. *International Journal of Human-Computer Studies*, *40*(1), 153–184. doi:10.1006/ijhc.1994.1007

Lee, J. D., & See, K. a. (2004). Trust in automation: designing for appropriate reliance. *Human Factors*, *46*(1), 50–80. doi:10.1518/hfes.46.1.50.30392

Lee, J., & Moray, N. (1992). Trust, control strategies and allocation of function in human-machine systems. *Ergonomics*. United Kingdom: Taylor & Francis. doi:10.1080/00140139208967392

Liu, K., & Mattyus, G. (2015). Fast multiclass vehicle detection on aerial images. In *IEEE Geoscience and Remote Sensing Letters* (Vol. 12, pp. 1–5). doi:10.1109/LGRS.2015.2439517

Llinas, J., Liggins, M. E., & Hall, D. L. (2000). Handbook of Multisensor Data Fusion: Theory and Practice. In *Proceedings of the 2000 MSS National Symposium on Sensor and Data Fusion* (Vol. II., pp. 89–104). San Antonio.

Luczak, H. (1998). *Arbeitswissenschaft* (2nd ed.). Berlin Heidelberg: Springer-Verlag Berlin GmbH.

doi:10.1007/978-3-662-05831-2

Luo, X., Wu, Y., Huang, Y., & Zhang, J. (2011). Vehicle flow detection in real-time airborne traffic surveillance system. *Transactions of the Institute of Measurement and Control*, *33*(7), 880–897. doi:10.1177/0142331209103042

Maiwald, F. (2013). *Maschinelle Beanspruchungsprädiktion zur ressourcengerechten Adaption eines Pilotenassistenzsystems*. Dissertation. Universität der Bundeswehr München.

Marques, M. M. (2015). STANDARDISATION AGREEMENT (STANAG) 4586: Standard Interfaces of UAV Control System (UCS) for NATO UAV Interoperability, *March*, 1–14.

Masalonis, A. J., & Parasuraman, R. (1999). TRUST AS A CONSTRUCT FOR EVALUATION OF AUTOMATED AIDS: PAST AND FUTURE THEORY AND RESEARCH. In *PROCEEDINGS of the HUMAN FACTORS AND ERGONOMICS SOCIETY 43rd ANNUAL MEETING* (pp. 184–188).

Matern, B. (1984). *Psychologische Arbeitsanalyse* (1st ed.). Springer-Verlag Berlin Heidelberg.

McBryan, B., & Hall, J. (1994). Engineering approach for Rotorcraft Pilot's Associate cognitive decision aiding systems development. *... Avionics Systems Conference, 1994. 13th ...*, 76–81. Retrieved from http://ieeexplore.ieee.org/xpls/abs_all.jsp?arnumber=369500

McGill, R., Tukey, J. W., & Larsen, W. A. (1978). Variations of box plots. *The American Statistician*, *32*(1), 12–16.

McKinney, W. (2010). Data Structures for Statistical Computing in Python. In S. van der Walt & J. Millman (Eds.), *Proceedings of the 9th Python in Science Conference* (pp. 51–56).

Meyer, J. (2004). Conceptual Issues in the Study of Dynamic Hazard Warnings. *Human Factors: The Journal of the Human Factors and Ergonomics Society*, *46*(2), 196–204. doi:10.1518/hfes.46.2.196.37335

Miller, C. A., & Hannen, M. D. (1999). Rotorcraft Pilot's Associate: Design and evaluation of an intelligent user interface for cockpit information management. *Knowledge-Based Systems*, *12*(8), 443–456. doi:10.1016/S0950-7051(99)00035-0

Miller, C. A., & Riley, V. (1995). Achieving the Associate Relationship; Lessons Learned from 10 Years of Research and Design. In R. M. Taylor & J. Reising (Eds.), *THE HUMAN-ELECTRONIC CREW: CAN WE TRUST THE TEAM? Proceedings of the 3rd International Workshop on Human-Computer Teamwork* (pp. 174–180). Cambridge, United Kingdom.

Miller, C., Guerlain, S., & Hannen, M. (1999). The Rotorcraft Pilot's Associate cockpit information manager: Acceptable behavior from a new crew member. *Annual Forum Proceedings- ...*. Retrieved from http://www.sys.virginia.edu/hci/papers/The Rotorcraft Pilot's Associate CIM.pdf

Miller, C., & Hannen, M. (1998). User acceptance of an intelligent user interface: a Rotorcraft Pilot's Associate example. *... 4th International Conference on Intelligent User ...*, 109–116. Retrieved from http://dl.acm.org/citation.cfm?id=291100

Miller, G. A. (1956). The magical number seven, plus or minus two: some limits on our capacity for processing information. *Psychological Review*, *63*(2), 81–97. doi:10.1037/h0043158

Miller, G. A. (1994). The magical number seven, plus or minus two: Some limits on our capacity for processing information. *Psychological Review*, *101*(2), 343–352. doi:10.1037/0033-295x.101.2.343

Mitchell, H. (2007). *Multi-Sensor Data Fusion: An Introduction* (1st ed.). Springer-Verlag Berlin Heidelberg. doi:10.1007/978-3-540-71559-7

Mitchell, H. (2012). *Data Fusion: Concepts and Ideas* (2nd ed.). Heidelberg New York Dordrecht London: Springer. doi:10.1007/978-3-642-27222-6_3

Moray, N., & Rotenberg, I. (1989). Fault management in process control: Eye movements and action. *Ergonomics*, *32*, 1319–1342. doi:10.1080/00140138908966910

Mosier, K. L., & Skitka, L. J. (1996). Human decision makers and automated decision aids: Made for each other? In R. Parasuraman & M. Mouloua (Eds.), *Automation and Human Performance: Theory and Applications* (pp. 201–220). New Jersey: Erlbaum. doi:10.1201/9781315137957

Muir, B M, & Moray, N. (1996). Trust in automation. Part II. Experimental studies of trust and human intervention in a process control simulation. *Ergonomics*, *39*(3), 429–60.

doi:10.1080/00140139608964474

Muir, Bonnie M. (1987). Trust between humans and machines, and the design of decision aids. *International Journal of Man-Machine Studies*, *27*(5–6), 527–539.

NASA. (1990). Proceedings of the Conference on Aviation Safety and Automation. In S. Morello (Ed.), *AIR TRANSPORTATION AND SAFETY: Aviation Safety/Automation Program Conference: NASA-CP-3090, L-16840, NAS 1.55:3090* (p. 270). Virginia Beach, VA; United States: NASA Langley Research Center; Hampton, VA, United States.

NATO Standardization Agency. (2012a). *STANAG 4586 Ed.3 Nov 2012, Standard Interfaces of UAV Control System (UCS) for NATO UAV Interoperability* (3rd ed.). Nato Standardization Agency.

NATO Standardization Agency. (2012b, October). STANAG 2999 - Use of Helicopters in Land Operations Doctrine ATP-49 (F). *Allied Tactical Publication*. Nato Standardization Agency (NSA).

Nawrat, A., & Kuś, Z. (2013). *Vision Based Systemsfor UAV Applications*. (A. Nawrat & Z. Kuś, Eds.) (Vol. 481). Springer International Publishing. doi:10.1007/978-3-319-00369-6

Nguyen, T. T., Grabner, H., Bischof, H., & Gruber, B. (2007). On-line Boosting for Car Detection from Aerial Images. *2007 IEEE International Conference on Research, Innovation and Vision for the Future, RIVF 2007*, 87–95. doi:10.1109/RIVF.2007.369140

Norman, D. A., & Bobrow, D. G. (1975). On data-limited and resource-limited processes. *Cognitive Psychology*, *7*(1), 44–64. doi:10.1016/0010-0285(75)90004-3

Norman, S., Billings, C. E., Nadel, D., Palmer, E., Wiener, E. L., & D, W. D. (1988). *Aircraft automation Philosophy: A source document.* CA.

Onken, R., & Schulte, A. (2010). *System-Ergonomic Design of Cognitive Automation: Dual-Mode Cognitive Design of Vehicle Guidance and Control Work Systems* (1st ed.). Springer-Verlag Berlin Heidelberg. doi:10.1007/978-3-642-03135-9

OpenCV. (2018). OpenCV: Open Source Computer Vision Library. Retrieved from http://opencv.willowgarage.com/wiki/

Oppermann, R. (Ed.). (1994). *Adaptive User Support: Ergonomic Design of Manually and Automatically Adaptable Software*. Hillsdale, NJ, USA: L. Erlbaum Associates Inc.

Oreifej, O., Mehran, R., & Shah, M. (2010). Human identity recognition in aerial images. *Proceedings of the IEEE Computer Society Conference on Computer Vision and Pattern Recognition*, 709–716. doi:10.1109/CVPR.2010.5540147

Osuna, E., Freund, R., & Girosit, F. (1997). Training support vector machines: an application to face detection. *Proceedings of IEEE Computer Society Conference on Computer Vision and Pattern Recognition*, 130–136. doi:10.1109/CVPR.1997.609310

Parasuraman, Raja. (1987). Human-Computer Monitoring. *Human Factors*, *29*(6), 695–706. doi:10.1177/001872088702900609

Parasuraman, Raja, Bahri, T., E. Deaton, J., G. Morrison, J., & Barnes, M. (1992). *Theory and Design of Adaptive Automation in Aviation Systems*. Warminster, PA.

Parasuraman, Raja, & Hancock, P. A. (2001). Adaptive control of mental workload. In *Stress, workload, and fatigue.* (pp. 305–320). Mahwah, NJ, US: Lawrence Erlbaum Associates Publishers.

Parasuraman, Raja, & Manzey, D. H. (2010). Complacency and bias in human use of automation: An attentional integration. *Human Factors*, *52*(3), 381–410. doi:10.1177/0018720810376055

Parasuraman, Raja, Molloy, R., & Singh, I. L. (1993). Performance Consequences of Automation Induced Complacency. *International Journal of Aviation Psychology*, *3*(1). doi:10.1207/s15327108ijap0301_1

Parasuraman, Raja, & 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. doi:10.1518/001872097778543886

Parasuraman, Raja, 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. Retrieved from http://www.ncbi.nlm.nih.gov/pubmed/11760769

Parasuraman, Raja, Sheridan, T. B., & Wickens, C. D. (2008). Situation Awareness,Mental Workload,and Trust in Automation:Viable,Empirically Supported Cognitive Engineering Constructs. *Journal of Cognitive Engineering and Decision Making*, *2*(2), 140–160. doi:10.1518/155534308X284417.

Paul Morris Fitts. (2017). *Human Engineering for an Effective Air-navigation and Traffic-control System*. (Paul Morris Fitts, Ed.). National Research Council, Division of Anthropology and Psychology, Committee on Aviation Psychology, Foundation, Ohio State University. Research, 1951.

Peper, M. (2013). Kognitive Modellierung. In M. A. Wirtz (Ed.), *Dorsch Lexikon der Psychologie* (p. 364). Verlag Hans Huber.

Perlovsky, L., Chernick, J., & Schoendorf, W. H. (1995). Multi-sensor ATR and identification of friend or foe using MLANS. *Automatic Target Recognition*, *8*(7–8), 1003–1358.

Peterson, L., & Peterson, M. J. (1959). Short-term retention of individual verbal items. *Journal of Experimental Psychology*, *58*(3), 193–198. doi:10.1037/h0049234

Pham, H. (2006). System Reliability Concepts. In *Springer Series in Reliability Engineering: System Software Reliability* (Vol. 1, p. 440). London: Springer-Verlag London. doi:10.1007/1-84628-295-0_2

Popp, C. H. (2013). Visuelles Arbeitsgedächtnis. *Radiologe*, *53*(7), 607–612. doi:10.1007/s00117-013-2479-4

Powers, D. (2011). Evaluation: From Precision, Recall and F-Measure to ROC, Informedness, Markedness & Correlation. *Journal of Machine Learning Technologies*, *2*(1), 37–63. Retrieved from http://www.bioinfo.in/uploadfiles/13031311552_1_1_JMLT.pdf

Price, H. E. (1985). Allocation of Functions in Systems. *Human Factors*, *27*(1), 33–45. doi:10.1177/001872088502700104

Putzer, H., & Onken, R. (2003). COSA - A generic cognitive system architecture based on a cognitive model of human behavior. *Cognition, Technology & Work*, *5*(2), 140–151. doi:10.1007/s10111-003-0120-4

Pyschkin, D. (2014). *Entwurf und prototypenhafte Implementierung eines exemplarischen Szenarios einer militärischen Hubschraubermission*. Bachelorarbeit. Universität der Bundeswehr München.

Pyschkin, D. (2015). *Großflächige, landestypische, georeferenzierte 3D Geländemodellierung für die Anwendung in VBS3 zur Simulation von Flugmissionen*. Projektarbeit. Universität der Bundeswehr München.

Python Core Team. (2019). Python: A dynamic, open source programming language. Retrieved from https://www.python.org/

Qt. (2020). Qt C++ Framework. Retrieved December 31, 2020, from https://www.qt.io/

Rasmussen, J. (1983). Skills, Rules, and Knowledge; Signals, Signs, and Symbols, and Other Distinctions in Human Performance Models. *IEEE Transactions on Systems, Man, and Cybernetics*, *13*(3), 257–266.

REFA Verband für Arbeitsgestaltung, Betriebsorganisation und Unternehmensentwicklung e. V. (2002). *Ausgewählte Methoden zur prozessorientierten Arbeitsorganisation*. Darmstadt.

Reindl, M. (2015). *Konzeption und Implementierung einer automatisierten Gimbalsteuerung zur Aufklärung von Routen und Gebieten in der VBS3-Simulation*. Studienarbeit. Universität der Bundeswehr München.

Rezatofighi, H., Tsoi, N., Gwak, J., Sadeghian, A., Reid, I., & Savarese, S. (2019). Generalized intersection over union: A metric and a loss for bounding box regression. *Proceedings of the IEEE Computer Society Conference on Computer Vision and Pattern Recognition*, *2019-June*, 658–666. doi:10.1109/CVPR.2019.00075

Ricker, T. J., Vergauwe, E., & Cowan, N. (2016). Decay theory of immediate memory: From Brown (1958) to today (2014). *Quarterly Journal of Experimental Psychology*, *69*(10), 1969–1995. doi:10.1080/17470218.2014.914546

Robert Bosch GmbH, Kraftfahrtechnisches Taschenbuch. (2018) (29th ed.). Springer Vieweg.

Rohmert, Walter. (1983a). Möglichkeiten und Grenzen menschengerechter Arbeitsgestaltung durch Ergonomie. In F. Fürstenberg, P. Hanau, H. Kreikebaum, & W. Rohmert (Eds.), *Menschengerechte Gestaltung der Arbeit* (Gesellscha., pp. 39–76). Mannheim, Wien, Zürich: B.I. Wissenschaftsverlag.

Rohmert, Walter. (1983b). Rationelle Arbeit. In W. Rohmert & J. Rutenfranz (Eds.), *Praktische*

Arbeitsphysiologie. Stuttgart: Thieme.

Rohmert, Walter. (1984). Das Belastungs-Beanspruchungs-Konzept. *Zeitschrift Für Arbeitswissenschaft*, *38*, 193–200.

Rost, J. (1996). *Lehrbuch Testtheorie, Testkonstruktion*. (J. Rost, Ed.). Huber.

Rouse, W. B., & Rouse, S. H. (1983). *A Framework for Research on Adaptive Decision Aids*.

Rouse, W B. (1991). *Design for Success: A Human-Centered Approach to Designing Successful Products and Systems*. Wiley. Retrieved from https://books.google.de/books?id=921RAAAAMAAJ

Rouse, William B. (1988). Adaptive aiding for human/computer control. *Human Factors*, *30*(4), 431–443.

Rovira, E., McGarry, K., & Parasuraman, R. (2007). Effects of Imperfect Automation on Decision Making in a Simulated Command and Control Task. *Human Factors: The Journal of the Human Factors and Ergonomics Society*, *49*(1), 76–87. doi:10.1518/001872007779598082

Rudnick, G., & Schulte, A. (2017). Experimental Evaluation of a Scalable Autonomy Concept for Cognitive Agents aboard Reconnaissance UAVs. *19th International Symposium on Aviation Psychology (ISAP)*, 1–6.

Rudol, P., & Doherty, P. (2008). Human Body Detection and Geolocalization for UAV Search and Rescue Missions Using Color and Thermal Imagery. *2008 IEEE Aerospace Conference*, 1–8. doi:10.1109/AERO.2008.4526559

Ruf, C., & Stuetz, P. (2015). Ergonomische Einbindung des Sensor-Operateurs in eine MUM-T/ Multi- UAV Umgebung: Problemanalyse, Konzeptdarstellung und erste Modellbildung. In M. Grandt & S. Schmerwitz (Eds.), *Kooperation und kooperative Systeme in der Fahrzeug- und Prozessführung (DGLR Bericht 2015-01)* (pp. 79–96). Bonn, Germany: Deutsche Gesellschaft für Luft- und Raumfahrt - Lilienthal-Oberth e.V. Retrieved from http://publikationen.dglr.de/?tx_dglrpublications_pi1[document_id]=54001008

Ruf, C., & Stuetz, P. (2017). Model-Driven Payload Sensor Operation Assistance for a Transport Helicopter Crew in Manned–Unmanned Teaming Missions: Assistance Realization, Modelling Experimental Evaluation of Mental Workload. In D. Harris (Ed.), *Engineering Psychology and Cognitive Ergonomics: Performance, Emotion and Situation Awareness* (pp. 51–63). Cham: Springer, Cham. doi:10.1007/978-3-319-58472-0_5

Ruf, C., & Stütz, P. (2016). Model-driven Sensor Operation Assistance for a Transport Helicopter Crew in Manned-Unmanned Teaming Missions: Selecting the Automation Level by Machine Decision-making. In P. Savage-Knepshield & J. Chen (Eds.), *Advances in Human Factors in Robots and Unmanned Systems. Advances in Intelligent Systems and Computing* (Vol. 499, pp. 253–265). doi:10.1007/978-3-319-41959-6_21

Ruf, C., & Stütz, P. (2018). Establishing a Variable Automation Paradigm for UAV-based Flight Path Reconnaissance in a Military Transport Helicopter Cockpit : Experimental Evaluation of Cockpit Automation. In H. Becherstorfer, J. Lasry, & M. Schwarz (Eds.), *33rd European Association for Aviation Psychology Conference (EEAP33)* (Vol. 784, pp. 291–309). Dubrovnik, Croatia: European Association for Aviation Psychology. doi:10.1007/978-3-319-94346-6_3

Ruf, C., von der Mülbe, S., & Stuetz, P. (2017). Assistenz beim Einsatz von Aufklärungssensorik für die Crew eines Transporthelikopters in MUM-T-Missionen: Gestaltung eines Automationssystems zur gezielten Reduktion der Mental Workload. *Kognitive Systeme 2017-1*, *1*. doi:ttps://doi.org/10.17185/duepublico/44613

Ruf, C., Zwick, M., Morawietz, S., & Stütz, P. (2019). Enhancing Automated Aerial Reconnaissance Onboard UAVs Using Sensor Data Processing-Characteristics and Pareto Front Optimization. In *AIAA Scitech 2019 Forum* (pp. 1–10). San Diego, USA: American Institute of Aeronautics and Astronautics. doi:doi:10.2514/6.2019-1541

Ruff, H. A., Narayanan, S., & Draper, M. H. (2002). Human Interaction with Levels of Automation and Decision-Aid Fidelity in the Supervisory Control of Multiple Simulated. *Technology*, *11*(4), 335–351. doi:10.1162/105474602760204264

Ruff, H., Calhoun, G., Frost, E., Behymer, K., & Bartik, J. (2018). Comparison of Adaptive, Adaptable, and Hybrid Automation for Surveillance Task Completion in a Multi-Task Environment. *Proceedings of the Human Factors and Ergonomics Society Annual Meeting*, *62*(1), 155–159.

doi:10.1177/1541931218621036

Rushby, J. (2002). Using model checking to help discover mode confusions and other automation surprises. *Reliability Engineering and System Safety*, *75*(2), 167–177. doi:10.1016/S0951-8320(01)00092-8

Russ, M., Schmitt, M., Hellert, C., & Stuetz, P. (2013). Airborne sensor and perception management: Experiments and Results for surveillance UAS. In *AIAA Infotech@Aerospace (I@A) Conference* (pp. 2–7). Boston, MA, USA: AIAA. doi:10.2514/6.2013-5144

Russ, M., Stuetz, P., Schmitt, M., Hellert, C., Stuetz, P., Stütz, P., … Stuetz, P. (2012). Airborne sensor and perception management: A conceptual approach for surveillance UAS. In *AIAA Infotech@Aerospace (I@A) Conference* (pp. 2–7). Boston, MA, USA: American Institute of Aeronautics and Astronautics. doi:doi:10.2514/6.2013-5144

S, G., Manohara Pai, M. M., Verma, U., & Pai, R. M. (2019). Semantic Segmentation of UAV Aerial Videos using Convolutional Neural Networks. In *2019 IEEE Second International Conference on Artificial Intelligence and Knowledge Engineering (AIKE)* (pp. 21–27). doi:10.1109/AIKE.2019.00012

SAE international. (2016). U.S. Department of Transportation's New Policy on Automated Vehicles Adopts SAE International's Levels of Automation for Defining Driving Automation in On-Road Motor Vehicles. *SAE International*, 1. Retrieved from https://www.sae.org/news/3544/

Salvendy, G. (2012). *Handbook of Human Factors and Ergonomics, Fourth Edition*. (G. Salvendy, Ed.)*Handbook of Human Factors and Ergonomics* (4th ed.). John Wiley & Sons, Inc. doi:10.1002/0470048204.ch27

Salvucci, D. D., & Taatgen, N. A. (2008). Threaded Cognition: An Integrated Theory of Concurrent Multitasking. *Psychological Review*, *115*(1), 101–130. doi:10.1037/0033-295X.115.1.101

Sanders, A. F. (1983). Towards a Model of Stress and Human. *Acta Psychologica*, *53*, 61–97. doi:10.1016/0001-6918(83)90016-1

Sarter, N. B., & Woods, D. D. (1994). Pilot Interaction with Cockpit Automation II: An Experimental Study of Pilot's Model and Awareness of the Flight Management System. *The International Journal of Aviation Psychology*, *4*(1), 1–28. doi:10.1207/s15327108ijap0401

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: The Journal of the Human Factors and Ergonomics Society*, *37*(1), 5–19. doi:10.1518/001872095779049516

Sarter, N., Woods, D., & Billings, C. (1997). Automation surprises. *Handbook of Human Factors …*, 1–25. Retrieved from http://www.class.uidaho.edu/psy562/Readings/Sarter1997.pdf

Scerbo, M. W. (1996). Theoretical perspectives on adaptive automation. *Automation and Human Performance: Theory and Applications*, (January 1996), 37–63. doi:10.1201/9781315137957

Scerbo, M. W. (2008). Adaptive Automation. In Raja Parasuraman & M. Rizzo (Eds.), *Neuroergonomics: The Brain at Work* (pp. 239–252). New York: Oxford University Press, Inc.

Schachter, B. J. (2020). *Automatic Target Recognition*. (B. J. Schachter, Ed.) (4th ed.). SPIE. The international society for optics and photonics.

Schlick, C., Bruder, R., & Luczak, H. (2010). *Arbeitswissenschaft* (3rd ed.). Springer-Verlag Berlin Heidelberg. doi:10.1007/978-3-540-78333-6

Schlick, C., Bruder, R., & Luczak, H. (2018). *Arbeitswissenschaft*. (C. Schlick, R. Bruder, & H. Luczak, Eds.) (4th ed.). Berlin, Germany: © Springer-Verlag GmbH Deutschland.

Schmidt, F., & Hinz, S. (2011). A Scheme for the Detection and Tracking of People Tuned for Aerial Image Sequences. In B. M. Stilla U., Rottensteiner F., Mayer H., Jutzi B. (Ed.), *Photogrammetric Image Analysis. PIA 2011. Lecture Notes in Computer Science, vol 6952.* (pp. 257–270). Springer Berlin, Heidelberg. doi:10.1007/978-3-642-24393-6_22

Schmitt, M., & Stuetz, P. (2018). Multi-UAV-based Reconnaissance and Assessment of Helicopter Landing Points in Manned-Unmanned-Teaming Missions: Experimental Evaluation and Results. In *Modelling and Simulation for Autonomous Systems Workshop (MESAS 2018)*. Prague, Czech Republic.

Schulte, A. (2012). Kognitive und kooperative Automation zur Führung unbemannter Luftfahrzeuge (Cognitive and Cooperative Automation for Guiding Unmanned Aerial Vehicles). *2. Interdisziplinärer*

Workshop Kognitive Systeme: Mensch, Teams, Systeme Und Automaten Verstehen, Beschreiben Und Gestalten Kognitiver (Technischer) Systeme, (September), 10.

Schulte, A., Brand, Y., Rudnick, G., Schmitt, F., & Donath, D. (2018). *CASIMUS - Cognitive Automated Sensor Integrated Mission System, Projektabschlussbericht Teil I (FMFF)*. Neubiberg, Germany.

Schulte, A., & Donath, D. (2018). A Design and Description Method for Human-Autonomy Teaming Systems. In W. Karwowski & T. Ahram (Eds.), *Intelligent Human Systems Integration* (Vol. 722, pp. 3–9). Cham: Springer International Publishing. doi:10.1007/978-3-319-73888-8

Schulte, A., Donath, D., & Lange, D. S. (2016). Design Patterns for Human-Cognitive Agent Teaming. In D. Harris (Ed.), *Engineering Psychology and Cognitive Ergonomics* (Vol. 8019, pp. 231–243). Cham: Springer International Publishing. doi:10.1007/978-3-642-39360-0

Schwalbe, G., & Schels, M. (2020). Concept Enforcement and Modularization as Methods for the ISO 26262 Safety Argumentation of Neural Networks. In *10th European Congress on Embedded Real Time Software and Systems (ERTS 2020)*. Toulouse, France.

Se, S., Shi, F., Liu, X., & Ghazel, M. (2015). Object and activity detection from aerial video. *Proceedings of SPIE - The International Society for Optical Engineering*, *9473*(July). doi:10.1117/12.2177094

Seymour, P. H. K. (1973). A MODEL FOR READING, NAMING AND COMPARISON. *British Journal of Psychology*, *64*(1), 35–49. doi:10.1111/j.2044-8295.1973.tb01324.x

Sharit, J. (1997). Allocation of functions. In G. Salvendy (Ed.), *Handbook of Human Factors and Ergonomics* (2nd ed.). New York: John Wiley.

Sheridan, T. B. (1976). Toward a General Model of Supervisory Control. In T. B. Sheridan & G. Johannsen (Eds.), *Monitoring Behavior and Supervisory Control* (pp. 271–281). Boston, MA: Springer US. doi:10.1007/978-1-4684-2523-9_22

Sheridan, T. B. (1992). *Telerobotics, Automation, and Human Supervisory Control*. Cambridge, MA, USA: MIT Press. doi:10.5555/134291

Sheridan, T. B. (2002). *Humans and Automation: System Design and Research Issues*. New York, NY, USA: John Wiley & Sons, Inc.

Sheridan, T. B. (2007). 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. doi:10.1109/TSMCA.2010.2093888

Sheridan, T. B., & Parasuraman, R. (2005). Human-Automation Interaction. *Reviews of Human Factors and Ergonomics*, *1*(1), 89–129. doi:10.1518/155723405783703082

Sheridan, T. B., & Verplank, W. L. (1978). Human and Computer Control of Undersea Teleoperators. *ManMachine Systems Lab Department of Mechanical Engineering MIT Grant N0001477C0256*, (DECEMBER 1978), 343.

Sherry, L., & Polson, P. G. (1999). Shared Models of Flight Management System Vertical Guidance. *The International Journal of Aviation Psychology*, *9*(2), 139–153. doi:10.1207/s15327108ijap0902_4

Shneiderman, B., & Plaisant, C. (2010). *Designing the user interface : strategies for effective human-computer interaction*. Boston: Addison-Wesley.

Sorkin, R. D. (1988). Why are people turning off our alarms? *The Journal of the Acoustical Society of America*, *84*(3), 1107–1108. doi:10.1121/1.397232

Spread Concepts LLC. (2020). The Spread Toolkit. Retrieved from http://www.spread.org/

Steels, L. (1995). When are robots intelligent autonomous agents? *Robotics and Autonomous Systems*, *15*(1–2), 3–9. doi:10.1016/0921-8890(95)00011-4

Steinhauser, N. B., Pavlas, D., & Hancock, P. A. (2009). Design Principles for Adaptive Automation and Aiding. *Ergonomics in Design: The Quarterly of Human Factors Applications*, *17*(2), 6–10. doi:10.1518/106480409X435943

Strauch, B. (2018). Ironies of Automation: Still Unresolved after All These Years. *IEEE Transactions on Human-Machine Systems*, *48*(5), 419–433. doi:10.1109/THMS.2017.2732506

Strong, S. P., Köberle, R., de Ruyter van Steveninck, R. R., & Bialek, W. (1998). Entropy and Information in Neural Spike Trains. *Physical Review Letters*, *80*(1), 197–200. doi:10.1103/PhysRevLett.80.197

Stroustrup, B. (2013). *The C++ Programming Language* (4th ed.). Addison-Wesley Professional.

Stroustrup, B. (2020). Website: The C++ Programming Language. Retrieved December 31, 2020, from http://www.stroustrup.com/C++.html

Strube, G., Becker, B., Freksa, C., Hahn, U., Opwis, K., & Palm, G. (1996). *Wörterbuch der Kognitionswissenschaft*. Stuttgart: Klett-Cotta.

Stuetz, P., Ruf, C., & Schmitt, M. (2018). *CASIMUS - Cognitive Automated Sensor Integrated Mission System, Projektabschlussbericht Teil II (LFT)*. Neubiberg, Germany.

Theeuwes, J., Kramer, A. F., & Irwin, D. E. (2011). Attention on our mind: The role of spatial attention in visual working memory. *Acta Psychologica*, *137*(2), 248–251. doi:10.1016/j.actpsy.2010.06.011

Theißing, N. (2017). *Eingriffsstrategie für Assistenzsysteme zur Korrektur von Operateur - Fehlverhalten*. Dissertation, Fakultät für Luft- und Raumfahrttechnik, Universität der Bundeswehr München (UniBwM).

Toth, C. K., G-Brzezinska, D., & Merry, C. (2003). Supporting Traffic Flow Management With High-Definition Imagery.

Tuermer, S., Kurz, F., Reinartz, P., & Stilla, U. (2013). Airborne vehicle detection in dense urban areas using HoG features and disparity maps. *IEEE Journal of Selected Topics in Applied Earth Observations and Remote Sensing*, *6*(6), 2327–2337. doi:10.1109/JSTARS.2013.2242846

U.S. Department of Defense. (2008). MIL-STD-2525C - Common Warfighting Symbology. U.S. Department of Defense.

Uhrmann, J. (2013). *Auftragsbasierte Multi-UAV-Führung aus dem Helikoptercockpit durch kognitive Automation*. Dissertation. Universität der Bundeswehr München (UniBwM). Retrieved from https://athene-forschung.unibw.de/node?id=90699

Vagia, M., Transeth, A. A., & Fjerdingen, S. A. (2016). A literature review on the levels of automation during the years. What are the different taxonomies that have been proposed? *Applied Ergonomics*. doi:10.1016/j.apergo.2015.09.013

Valavanis, K. P. (2007). *Advances in Unmanned Aerial Vehicles: State of the Art and the Road to Autonomy*. (K. P. Valavanis, Ed.). Springer Netherlands. doi:10.1007/978-1-4020-6114-1

Van Rossum, G., & Drake Jr, F. L. (1995). *Python tutorial*. Centrum voor Wiskunde en Informatica Amsterdam, The Netherlands.

Vicente, K. J. (2002). Ecological Interface Design: Progress and Challenges. *Human Factors: The Journal of the Human Factors and Ergonomics Society*, *44*(1), 62–78. doi:10.1518/0018720024494829

Vicente, K. J., & Rasmussen, J. (1992). Ecological interface design: Theoretical approach. *Ieee Transactions on Systems, Man. and Cybernetics*, *22*(4).

Virtanen, P., Gommers, R., Oliphant, T. E., Haberland, M., Reddy, T., Cournapeau, D., … Contributors, S. 1. . (2020). SciPy 1.0: Fundamental Algorithms for Scientific Computing in Python. *Nature Methods*. doi:https://doi.org/10.1038/s41592-019-0686-2

Vogel, E. K., Luck, S. J., & Shapiro, K. L. (1998). Electrophysiological evidence for a postperceptual locus of suppression during the attentional blink. *Journal of Experimental Psychology: Human Perception and Performance*, *24*(6), 1656.

Voigt, K.-I. (2018a). Arbeit. In *Springer Gabler Wirtschaftslexikon*. Springer. Retrieved from https://wirtschaftslexikon.gabler.de/definition/arbeit-31465/version-255022

Voigt, K.-I. (2018b). Automatisierung. In *Springer Gabler Wirtschaftslexikon*. Springer. Retrieved from https://wirtschaftslexikon.gabler.de/definition/automatisierung-27138/version-250801

Warren, C., & Morton, J. (1982). The effects of priming on picture recognition. *British Journal of Psychology*, *73*(1), 117–129. doi:10.1111/j.2044-8295.1982.tb01796.x

Wegner, D. M. (2002). *The Illusion of Conscious Will* (Vol. 113). Cambridge, MA: MIT Press.

Weinmann, A. (2017). *Erstellung eines Schulungskonzepts zum Training von Versuchspersonen für bemannt-unbemannte Hubschraubermissionen*. Bachelorarbeit. Universität der Bundeswehr München.

Weinmann, A., Brand, Y., Honecker, F., Meyer, C., Rudnick, G., Ruf, C., … Schmitt, F. (2016). *Flight and User Manual IFS Helicopter Mission Simulator*. Bundeswehr University Munich, Munich, Germany.

Wentura, D., & Frings, C. (2013). *Kognitive Psychologie*. (Springer VS, Ed.)*Kognitive Psychologie*. Osnabrück, Deutschland: Jürgen Kriz. doi:10.1007/978-3-531-93125-8

Wheeler, M. E., & Treisman, A. M. (2002). Binding in short-term visual memory. *Journal of Experimental Psychology: General*, *131*(1), 48–64.

Whittle, R. (2015). MUM-T Is The Word For AH-64E: Helos Fly, Use Drones. Retrieved from https://breakingdefense.com/2015/01/mum-t-is-the-word-for-ah-64e-helos-fly-use-drones/

Wickens, C. (2017). Automation Stages & Levels, 20 Years After. *Journal of Cognitive Engineering and Decision Making*, *12*(1), 35–41. doi:10.1177/1555343417727438

Wickens, C. D. (1989). Processing resources in attention. In D. Holding (Ed.), *Human skills* (pp. 77–105). New York: Wiley.

Wickens, C. D. (1992). *Engineering psychology and human performance, 2nd ed. Engineering psychology and human performance, 2nd ed.* New York, NY, US: HarperCollins Publishers.

Wickens, C. D. (1996). Situation awareness: Impact of automation and display technology. In *AGARD Conference Proceedings 575: Situation Awareness: Limitations and Enhancement in the Aviation Environment* (Vol. 575, pp. K2-1-K2-13). Neuilly-Sur-Seine, France: AGARD (Advisory Group for Aerospace Research & Development).

Wickens, C. D. (2002). Multiple resources and performance prediction. *Theoretical Issues in Ergonomics Science*, *3*(2), 159–177. doi:10.1080/14639220210123806

Wickens, C. D. (2004). Multiple Resource Time Sharing Mode. In E. S. and H. W. Stanton, N., A. Hedge, K. Brookhuis & Hendrick. (Eds.), *Handbook of Human Factors and Ergonomics*. London, United Kingdom: CRC Press.

Wickens, C. D. (2017). Mental Workload: Assessment, Prediction and Consequences. *Communications in Computer and Information Science*, *726*, 18–29. doi:10.1007/978-3-319-61061-0

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. doi:10.1080/10508410902766549

Wickens, C. D., & Carswell, C. M. (2012). INFORMATION PROCESSING. In G. Salvendy (Ed.), *HANDBOOK OF HUMAN FACTORS AND ERGONOMICS* (Fourth Edi., pp. 117–161). JOHN WILEY & SONS, INC.

Wickens, C. D., & Dixon, S. R. (2007). The benefits of imperfect diagnostic automation: A synthesis of the literature. *Theoretical Issues in Ergonomics Science*. Wickens, Christopher D.: University of Illinois, Institute of Aviation, Aviation Human Factors Division, 1 Airport Road, Savoy, IL, US, 61874, cwickens@alionscience.com: Taylor & Francis. doi:10.1080/14639220500370105

Wickens, C. D., Dixon, S. R., & Ambinder, M. S. (2006). Workload and automation reliability in unmanned air vehicles. *Human Factors of Remotely Operated Vehicles.* Amsterdam, Netherlands: Elsevier. doi:10.1016/S1479-3601(05)07015-3

Wickens, C. D., Dixon, S. R., & Johnson, N. (2012). Imperfect Diagnostic Automation: An Experimental Examination of Priorities and Threshold Setting. *Proceedings of the Human Factors and Ergonomics Society Annual Meeting*, *50*(3), 210–214. doi:10.1177/154193120605000301

Wickens, C. D., & Hollands, J. G. (2000). *Engineering Psychology and Human Performance (3rd Edition)* (3rd ed.). Upper Saddle River, NJ: Prentice Hall. Retrieved from papers://4dd355a6-509d-432d-a6d3-eb12a1988728/Paper/p2634

Wickens, C. D., Mavor, A. S., & Mcgee, J. P. (1998). *The Future of Air Traffic Control: Human Operators and Automation*. Washington, DC: National Academy Press.

Wickens, C. D., & McCarley, J. S. (2007). *Applied attention theory* (Vol. 1). Lawrence Erlbaum Associates. doi:10.1080/00140130802295564

Wickens, C. D., & McCarley, J. S. (2008). *Applied Attention Theory*. *Ergonomics*. Boca Raton, FL 33487-2742: CRC Press Taylor & Francis Group. doi:10.1080/00140130802295564

Wickham, H., & Stryjewski, L. (2012). 40 years of boxplots. Retrieved from http://vita.had.co.nz/papers/boxplots.html

Wiegel, A. A. (2017). *Erstellung und Evaluierung einer Softwarekette zur Detektion bodengebundener Objekte in UAV- Orthofotos*. Universität der Bundeswehr München (UniBwM).

Wiener, E. L. (1981). Complacency: Is the term useful for air safety? In *Proceedings of the 26th Corporate Aviation Safety Seminar* (pp. 116–125). Denver, CO: Flight Safety Foundation.

Wiener, E. L., & Nagel, D. C. (1988). *Human factors in aviation*. (Earl L Wiener & D. C. Nagel, Eds.)*Human factors in aviation.* San Diego, CA, US: Academic Press.

Wiener, Earl L. (1989). *Human factors of advanced technology (glass cockpit) transport aircraft*. *NASA-CR-177528, NAS 1.26:177528*. Retrieved from http://ntrs.nasa.gov/search.jsp?R=19890016609

Wiener, Earl L., & Curry, R. E. (1980). Flight-deck automation: Promises and problems. *Ergonomics*, *23*(10), 995–1011. doi:10.1080/00140138008924809

Williges, R. C., Williges, B. H., & Elkerton, J. (1987). Software interface design. *Handbook of Human Factors*, 1416–1449.

Wilson, K. M., Helton, W. S., & Wiggins, M. W. (n.d.). Cognitive engineering. *Wiley Interdisciplinary Reviews: Cognitive Science*, *4*(1), 17–31. doi:10.1002/wcs.1204

Winkler, B. (2015). *Modellierung von UAV-Aufklärungsmissionen in VBS3 und Erstellung zugehöriger Auswertungsmetriken*. Studienarbeit. Universität der Bundeswehr München (UniBwM).

Winkler, B. (2016). *Design und Evaluierung von militärischen MUM-T-Missionen mittels Expertenwissen als Grundlage für zukünftige Messkampagnen*. Bachelorarbeit. Universität der Bundeswehr München (UniBwM).

Winter, J. C. F., & Dodou, D. (2011). Why the Fitts list has persisted throughout the history of function allocation. *Cognition, Technology & Work*. doi:10.1007/s10111-011-0188-1

Woods, D. (1985). Cognitive technologies: The design of joint human-machine cognitive systems. *AI Magazine*, *6*(4), 86–92. Retrieved from http://www.aaai.org/ojs/index.php/aimagazine/article/viewArticle/511

Woods, D. D., Patterson, E. S., & Roth, E. M. (2002). Can We Ever Escape from Data Overload? A Cognitive Systems Diagnosis. *Cognition, Technology & Work*, *4*(1), 22–36. doi:10.1007/s101110200002

Woods, David D. (1988). Coping With Complexity: The Psychology of Human Behavior in Complex Systems. *Tasks, Errors, & Mental Models*, (January 1988), 128–148. doi:10.1016/j.jacc.2012.09.012

Woods, David D. (1996). Decomposing Automation : Apparent Simplicity , Real Complexity Complexity. In Raja Parasuraman & M. Mouloua (Eds.), *Automation and Human Performance: Theory and Applications* (pp. 3–17). Lawrence Erlbaum Associates, Inc.

Xiong, N., & Svensson, P. (2002). Multi-sensor management for information fusion: issues and approaches. *Information Fusion*, *3*(2), 163–186. doi:10.1016/S1566-2535(02)00055-6

Xu, Y., Yu, G., Wang, Y., Wu, X., & Ma, Y. (2017). Car detection from low-altitude UAV imagery with the faster R-CNN. *Journal of Advanced Transportation*, *2017*. doi:10.1155/2017/2823617

Yang, M. Y., Liao, W., Li, X., Cao, Y., & Rosenhahn, B. (2019). Vehicle detection in aerial images. *Photogrammetric Engineering and Remote Sensing*, *85*(4), 297–304. doi:10.14358/PERS.85.4.297

Young, M. S., Brookhuis, K. A., Wickens, C. D., & Hancock, P. A. (2015). State of science: mental workload in ergonomics. *Ergonomics*. Taylor & Francis. doi:10.1080/00140139.2014.956151

Zhu, P., Sun, Y., Wen, L., Feng, Y., & Hu, Q. (2020). Drone based RGBT vehicle detection and counting: A challenge. *ArXiv*, 1–6.

Zwick, M., Koch, S., & Stütz, P. (2020). Enhancing Detection and Tracking Performance Using Sensor-specific Flight Trajectory Generation for UAVs: A Conceptual Approach. In *AIAA Scitech 2020 Forum*. Orlando, FL: American Institute of Aeronautics and Astronautics, Inc. doi:10.2514/6.2020-1454

Eigene Veröffentlichungen

- [Ruf & Stuetz, 2015] C. Ruf and P. Stütz, “Ergonomische Einbindung des Sensor-Operateurs in eine MUM-T/ Multi- UAV Umgebung: Problemanalyse, Konzeptdarstellung und erste Modellbildung,” in DGLR-Bericht 2015-01, 2015, vol. 2015-01, pp. 79–96 https://doi.org/ISBN: 978-3-932182-83-9

- [Ruf & Stütz, 2016] C. Ruf & P. Stütz: Model-Driven Sensor Operation Assistance for a Transport Helicopter Crew in Manned-Unmanned Teaming Missions: Selecting the Automation Level by Machine Decision-Making. In: Savage-Knepshield P., Chen J. (eds) Advances in Human Factors in Robots and Unmanned Systems. Advances in Intelligent Systems and Computing, vol 499. Springer, Cham, 2016 (DOI 10.1007/978-3-319-41959-6_21)

- [Ruf et al., 2017] C. Ruf, S. von der Mülbe, and P. Stütz, “Assistenz beim Einsatz von Aufklärungssensorik für die Crew eines Transporthelikopters in MUM-T-Missionen: Gestaltung eines Automationssystems zur gezielten Reduktion der Mental Workload,” 6. Interdisziplinärer Workshop Kognitive Systeme: Mensch, Teams, Systeme und Automaten, 2017. doi:ttps://doi.org/10.17185/duepublico/44613

- [Ruf & Stuetz, 2017] C. Ruf & P. Stütz: “Model-Driven Payload Sensor Operation Assistance for a Transport Helicopter Crew in Manned–Unmanned Teaming Missions: Assistance Realization, Modelling Experimental Evaluation of Mental Workload”. In: Harris D. (eds) Engineering Psychology and Cognitive Ergonomics: Performance, Emotion and Situation Awareness. EPCE 2017. Lecture Notes in Computer Science, vol 10275. Springer, Cham, 2017 (DOI: 10.1007/978-3-319-58472-0_5)

- [Ruf & Stütz, 2018] C. Ruf & P. Stütz: Establishing a Variable Automation Paradigm for UAV-Based Reconnaissance in Manned-Unmanned Teaming Missions: Experimental Evaluation and Results; In: Chen J. (eds) Advances in Human Factors in Robots and Unmanned Systems. AHFE. Advances in Intelligent Systems and Computing, vol 784, (pp. 24-35). Orlando, Juli 2018 (DOI: 10.1007/978-3-319-94346-6_3)

- [Ruf & Stütz, 2018] Establishing a Variable Automation Paradigm for UAV-based Flight Path Reconnaissance in a Military Transport Helicopter Cockpit: Experimental Evaluation of Cockpit Automation. In H. Becherstorfer, J. Lasry, & M. Schwarz (Eds.), EUROPEAN ASSOCIATION FOR AVIATION PSYCHOLOGY: CONNECTING PEOPLE, ORGANISATIONS AND TECHNOLOGY IN AVIATION (pp. 291–309). Dubrovnik, Croatia: European Association for Aviation Psychology.

- [Ruf et al., 2019] Ruf, Christian, Zwick, M., Morawietz, S., & Stuetz, P. (2019). Enhancing Automated Aerial Reconnaissance Onboard UAVs Using Sensor Data Processing-Characteristics and Pareto Front Optimization. In AIAA Scitech 2019 Forum (pp. 1–10). San Diego, USA: American Institute of Aeronautics and Astronautics. doi:10.2514/6.2019-1541

Anhang A: Modellierung von Operateur-Ressourcen und Interaktionen

Soll ein Operateur im Umgang mit den Informationsdarstellungen auf Displays bei der Systemnutzung weitergehend unterstützt oder dessen Umgang mit den Aufklärungsprodukten evaluiert werden, müssen dessen Interaktionen mit den Systemen und Visualisierungssystemen durch geeignete Gerätschaften sensorisch erfasst und im Rechner interpretiert werden. Solche Anwendungsfälle ergeben sich bei der automatischen, maschinellen Operateur-Beobachtung ([Honecker et al., 2016], [Honecker & Schulte, 2019]) sowie bei der Unterstützung von Operateuren durch Assistenzsysteme (vgl. Kapitel 2.2.2.2.3) ([Theißing, 2017], [Brand, Schmitt, Heilemann, & Schulte, 2019]). Ebenso wird dadurch die quantitative Auswertung der Interaktionen eines Operateurs sowie eine Abschätzung der dabei aufgewendeten Ressourcen möglich.

Zur Beschreibung der anfallenden Aufgaben sowie den dabei beanspruchten mentalen Ressourcen, welche bei deren Durchführung von Aufklärungstätigkeiten unter Zuhilfenahme der Automationsgrade allokiert werden, wird als Repräsentationsansatz ein Aufgabenmodell herangezogen. Dabei wurden alle anfallenden Aufgaben mit deren Kontexten (Bedingungen, Abhängigkeiten, Alternativen und dem erwarteten Ressourcenbedarf) nach einer vereinheitlichten Theorie beschrieben und in einem monolithischen Aufgabenmodell im Rechner zusammengeführt und verknüpft. Dieses wird sowohl für die modellgestützte, rechnerbasierte Abschätzung der erfahrenen Beanspruchung eines Operateurs ([Honecker & Schulte, 2019], [Honecker, 2021]) zur Laufzeit als auch zur Evaluierung der Wirksamkeit der Automationsgrade herangezogen [Ruf & Stuetz, 2017].

Die prinzipielle Methodik zur kontextreichen Repräsentation von Aufgaben nach ([Honecker et al., 2016], [Honecker & Schulte, 2019]) wird in Bild 1 (rechts) dargestellt, angelehnt an die Hierarchie der aufgabenbezogenen Begriffe nach ([Matern, 1984], [Johannsen, 1993]).

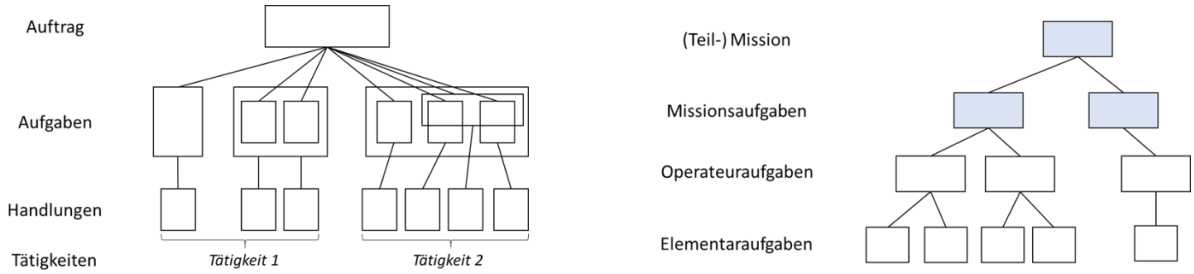


Bild 1: Aufgabenhierarchie nach ([Matern, 1984], [Johannsen, 1993]) (links); Modellstruktur zur Beschreibung von Operateuraufgaben im Missionskontext nach [Honecker et al., 2016] (rechts).

Dabei findet eine hierarchische Aufteilung eines Auftrags bzw. einer Mission in abstrakte Missionsaufgaben statt (blaue Elemente in Bild 1, rechts), welche durch konkrete Operateuraufgaben ausgeführt werden. Diese Aufgaben können hierarchisch feiner (bis in nicht weiter zerlegbare) Elementaraufgaben zerlegt werden. Die Repräsentation der Beanspruchung für jeder der Elementaraufgaben erfolgt dabei mit der *Theorie multipler Ressourcen* nach Wickens ([C. D. Wickens, 1989], [C. D. Wickens, 2004], [C. D. Wickens, 2002]), wie in Kapitel 2.5.2 dargestellt. Dazu wird jeder durchzuführenden Handlung (also Elementaraufgabe) die aufzuwendenden Anforderungen an Ressourcen (*„Demands“*) gemäß [C. D. Wickens, 2002] quantitativ (als sog. *Demand-Vector*) zugewiesen. Aus der Kombination der Ressourcen der belegten Elementaraufgaben wird dann die Beanspruchung bei der Ausführung einer konkreten

Operateuraufgabe rekonstruiert, welche in durch die Kombination sogenannter Evidenzen beobachtet wird ([Honecker et al., 2016], [Honecker & Schulte, 2019], [Honecker, 2021]).

Bild 2 zeigt das erzeugte Aufgabenmodell, welches die Tätigkeiten des Operateurs im Umgang mit den Automationsgraden beschreibt. Die erzeugte Baumstruktur enthält alle Operateuraufgaben, welche alternativ in den jeweiligen Automationsgraden durchgeführt werden können.

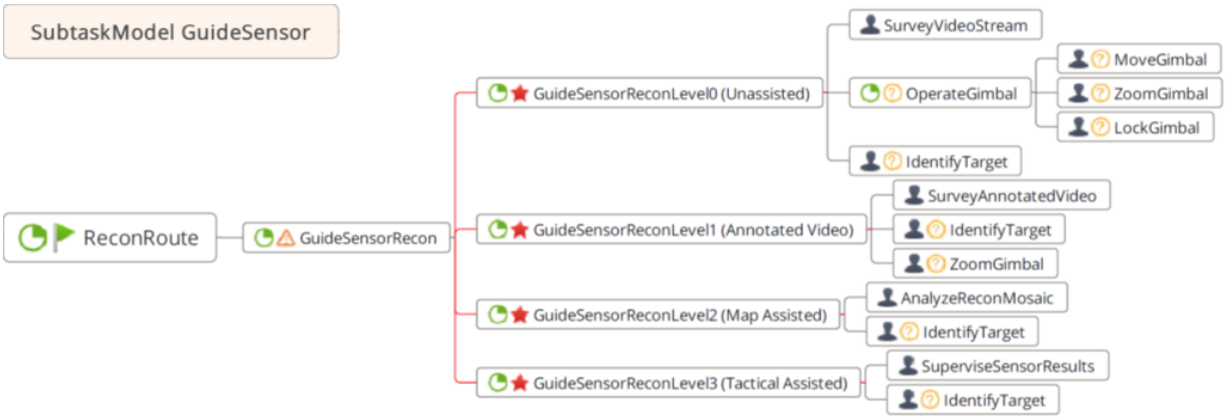


Bild 2: Aufgaben- und Ressourcenmodell für die Interaktionen eines Operateurs im Umgang mit den Automationsgraden des Automationssystems. Daten aus Aufgabenmodell und Grafik aus Modellvisualisierungstool aus ([Honecker et al., 2016], [Honecker, 2021]).

Die Elemente sind dabei nach dem Aufbauschema des Aufgabenmodells aus [Honecker et al., 2016] strukturiert und indiziert, Bild 3 zeigt die Legende der Modellelemente.

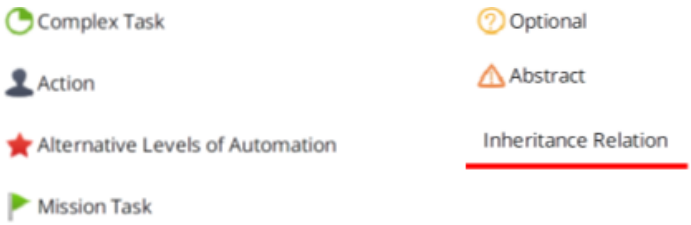


Bild 3: Legende der Eigenschaften der Elemente des Aufgabenmodells nach [Honecker et al., 2016].

Die Elementaraufgaben (Aktionen) in den Blättern des Aufgabenbaums aus Bild 2 enthalten jeweils einen Demand-Vektor mit der Belegung der Ressourcen, wobei die roten Sterne alternative Aufgabenstränge des Modells und damit die Aufgaben des Operateurs in dem jeweiligen Automationsgrad indizieren. Bei der Beobachtung des Operateurs um Umgang mit den Automationsfunktionen kann durch dessen Betätigungen und Systemeingaben (Interaktionen) somit auf die Verwendung der Funktionalität geschlossen sowie modellgestützt dessen (nicht individueller) Ressourcenbedarf abgeschätzt werden.

Anhang B: Human Factors

Impulsive Effekte durch Überbeanspruchung und Aufmerksamkeitsdefizite

Überlastung und Aufmerksamkeitsdefizite treten häufig spontan auf und werden situativ, besonders durch unvorhersehbare Situationen oder bei (schnell) veränderlichen Umweltbedingungen, ausgelöst. Dies kann impulsive Effekte hervorrufen, also solche, welche primär nicht durch lange zeitliche Ermüdungserscheinungen oder lange, monotone Arbeitsphasen mit Unterforderung bedingt werden.

Aufmerksamkeitsdefizite gelten als Kernursache für automationsbedinge Effekte, welche auf dem ursächlichen Konzept der *Aufmerksamkeit* basieren. Dabei wurden in [N. Sarter et al., 1997] zwei Ursachen für eine situativ defizitäre Aufmerksamkeitsverteilung oder mangelnde Aufrechterhaltung der Aufmerksamkeit im Umgang mit technischen Systemen ausgemacht:

> *„Two frequently observed ways in which attention allocation can fail is*
>
> *(a) a breakdown in the ‚mental bookkeeping' required to keep track of the multiple interleaved activities and events that arise in the operation of highly complex technology, and*
>
> *(b) a failure to revise a situation assessment in the presence of new conflicting information. In the latter case, called fixation error, evidence that is not in agreement with an operator's assessment of his situation is missed, dismissed, or rationalized as not really being discrepant."* [N. Sarter et al., 1997]

Der defizitäre Aufbau und der Zusammenbruch des mentalen Bildes einer Situation werden dabei als Ursache des Zusammenbruchs der Aufmerksamkeitsallokation ausgemacht. Dabei spielen besonders für die kognitive Funktion des *„mentalen Bookkeeping(s)"* die Beanspruchungs- und Umgebungssituation des Operateurs eine tragende Rolle, aus der sich die Höhe und die Charakteristik einer *informatorischen Belastung* ergibt. So kann eine hohe *informatorische Belastung* durch konfliktive Informationen oder eine große Informationsmenge (Informationsüberfluss) entstehen.

Aufmerksamkeitsdefizite können dabei für den (temporären) *„Out-of-the-loop"*-Effekt verantwortlich sein, der durch den Verlust des *Situationsbewusstseins* (*Situation Awareness*[80]) [Endsley & Kiris, 1995] herbeigeführt wird.

Wird ein Operateur mit einer Flut an Informationen oder Daten konfrontiert, ist vom Effekt des *Data Overload* [D. D. Woods et al., 2002] die Rede, bei welchem, eine Reizüberflutung aufgrund der Fülle und Menge an Informationen auftreten kann.

Besonders adaptive Systeme sind von den Effekten der „*Mode Confusion"* [Rushby, 2002], „*Mode Awareness"* [N. Sarter et al., 1997] und (temporärer) *Out-of-the-loop*-Problematik [Endsley & Kiris, 1995] seitens des Operateurs betroffen. So schreibt Inagaki, dass deren Verhalten als „*obskur"* und undurchschaubar wahrgenommen werden kann, da diese für eine *„dynamische und kontextabhängige Arbeitsweise"* ausgelegt und umgesetzt werden [Inagaki, 2003b]. Adaptive Systeme mit mehreren Automationsmoden oder –graden können sowohl den Wechsel zwischen den

[80] Unter *Situationsbewusstsein (Situation Awareness)* wird als ein Konstrukt des *Cognitive Engineering* die Fähigkeit eines Menschen verstanden, seine (dynamische) Umgebung situativ (vollständig) zu erfassen, sich ein valides *mentales Modell* dieses umgebenden Kontexts aufzubauen und dessen zeitliche Veränderung zu erschließen [Endsley, 1995].

Automationsgraden vollziehen und damit den Automationsmodus eigenständig wechseln als auch den (spontanen) Wechsel vom automatisierten in den manuellen Betrieb erfordern, was beim Operateur zusätzlich das *return-to-manual deficit problem* [Hadley et al., 1999] hervorrufen kann. Dabei werden hohe Anforderung an den Operateur gestellt, wie beispielsweise ein hohes *Situationsbewusstsein* zur korrekten Erfassung der Situation, das Vollziehen schneller Kontextwechsel und die Übernahme der Verantwortlichkeit sowie die Fortsetzung des Prozesses.

Als *"Automation surprises"* ([N. Sarter et al., 1997], [Hollnagel & Woods, 2006]) werden unvorhersehbare Vorkommnisse bezeichnet, die dann hervorgerufen werden, *„wenn ein automatisiertes System ein anderes Verhalten aufweist, als sein Bediener erwartet"* [Rushby, 2002]. Als Ursache dafür gilt ein Zusammenbruch der *"Mode Awareness"* [N. Sarter et al., 1997], ähnlich der *"Mode Confusion"* [Rushby, 2002]. Die *"Mode Awareness"* bezeichnet eine mögliche Fehlerbehaftung des *mentalen Modells* des Operateurs bei der Einschätzung des Betriebszustands, beispielsweise des aktuellen Automationsgrades, der Automation [Rushby, 2002]. Auch [Sherry & Polson, 1999] beschreibt solche Missverständnisse aufgrund einer Diskrepanz zwischen dem *mentalen Modell* des Operateurs und dem Verhalten des automatisierten Systems. Daraus kann ein stark erhöhtes Risiko nachfolgender Fehlbedienungen des Systems aufgrund dieses Irrglaubens resultieren [Rushby, 2002].

Diese impulsiven Effekte (*„Out-of-the-loop"*, *"Mode Awareness"*, *"Mode Confusion"*, *"Automation surprises"*) können durch die Designfaktoren der Automation, wie beispielsweise der Komplexität (*Complexity*) eines Systems, die dem Operateur den Aufbau und die Aufrechterhaltung eines *mentalen Modells* erschwert sowie der Undurchsichtigkeit (*Opacity*) aufgrund einer Intransparenz des Systems und dessen Verhalten begünstigt werden. Als Folge dieser Intransparenz können laut [N. Sarter et al., 1997] *„ommission errors"*, also Fehler durch das Aus- und Unterlassen von Aktionen seitens des Operateurs entstehen, da dieser es versäumt, (rechtzeitig) *„unerwünschtes Systemverhalten zu beobachten und (korrigierend) einzugreifen."* [N. Sarter et al., 1997].

Träge Effekte durch Unterforderung und mangelnde Aufmerksamkeit

Im Falle von zu überwachender Automation oder langen Einsatzphasen mit (anderer) Unterforderung oder passiver Aufgabenüberwachung wird der Operateur in eine beobachtende Rolle versetzt. Bei einer solchen Automationsstrategie führt der Mensch durch (hoch)-automatisierte Systeme weniger Aktivitäten selbst aktiv durch und nimmt eher die Rolle eines *„passiven Beobachters"* (Konsumenten) anstelle eines *„aktiven Teilnehmers"* bei der Aufgabendurchführung ein [Scerbo, 2008], was bereits 1983 durch Boehm-Davis et. Al. als „*passive monitoring*" [Boehm-Davis et al., 1983] identifiziert wurde.

Die Aufgabe, die der Benutzer dabei in diese Rolle des passiven Beobachters eines Systems ausführt, ist nach ([Parasuraman, 1987], [E. L. Wiener & Nagel, 1988]) diejenige, für welche der Mensch am wenigsten geeignet ist. Dabei kann mangelnde Wachsamkeit in dem geforderten dauerhaften, eintönigen und erhöhten Zustand der Reaktionsbereitschaft (*Vigilanz*) [Herczeg, 2014] auftreten, was die Aufmerksamkeit des Operateurs trüben kann.

Solch monotone Umfelder und hohe Automatisierungsstufen ohne menschliche Intervention bergen das Risiko des *„Out-of-the-Loop"*-Effekts beim Operateur, bei dem er nicht mehr direkt (mental) an stattfindende Abläufe gekoppelt ist. Dadurch können Schwierigkeiten beim Aufbau oder der Aufrechterhaltung des *mentalen Modells* und/oder der Verlust des Situationsbewusstseins (*loss of Situation Awareness*) [Endsley & Kiris, 1995] auftreten [Inagaki, 2003b].

Durch eine nicht stimulierende Tätigkeit oder der Wahrnehmung (dauerhafter), (vermeintlich) hoher Zuverlässigkeit können seitens des Operateurs Effekte von Langeweile, verminderter Wachsamkeit oder der Zustand von Gleichgültigkeit (*Complacency*) hervorgerufen werden ([Parasuraman, Molloy, & Singh, 1993], [Inagaki, 2003b]). Der Zustand der *Complacency* kann dabei beim Operateur durch die Monotonie einer Aufgabe oder die fehlende Abwechslung im Aufgabenkontext hervorgerufen werden [Boehm-Davis et al., 1983], falls er nicht durch einen gewissen Mindestumfang an Aktivitäten genügend beschäftigt bleibt [Sheridan, 1992]. Dabei wird gutgläubig

im Zustand einer Selbstzufriedenheit eine ungerechtfertigte Annahme über den Systemzustand getroffen ([Parasuraman & Manzey, 2010] nach [C. Billings, Lauber, Funkhouser, Lyman, & Huff, 1976]), wobei ein niedriger *„Index des Mißtrauens (suspicion)“* vorherrscht [E. L. Wiener, 1981]. Der Effekt wird auch mit speziellen Aufmerksamkeitsstrategien in Verbindung gebracht, welche ein durch Automatisierung unterstützter Bediener ausprägt [Parasuraman & Manzey, 2010].

Dadurch kann die Fähigkeit des Benutzers, Warnungen oder Fehler zu erkennen, vermindert werden [Parasuraman et al., 1992]. Der Effekt kann nach [Parasuraman & Manzey, 2010] generell in agilen Arbeitsumgebungen vorgefunden werden, in welchen Operateuren mit einer *Multi-Tasking* Aufgabenkonstellation konfrontiert werden, wobei sowohl manuelle Aufgaben durchgeführt als auch Automation beaufsichtigt werden müssen. Besonders in Situationen, in denen spontane manuelle Eingriffe durch den Menschen nötig sind, wird mit einer Ineffizienz aufgrund des Wechsels von der passiven Rolle des Beobachters zur aktiven Rolle des Problemlösers gerechnet [Parasuraman, 1987].

Eng verknüpft und als überlappendes und ebenfalls automations-induziertes Phänomen wird in der Literatur der Effekt des *Automation Bias* genannt, welcher ebenfalls durch das zu Grunde liegende Konzept der Aufmerksamkeit mitbegründet wird und wobei ähnliche Aufmerksamkeitsprozesse involviert sind [Parasuraman & Manzey, 2010]. Eine Definition bezeichnet diese verzerrte Wahrnehmung bzw. Voreingenommenheit als Folge der (unreflektierten) Übernahme der Ausgabe einer maschinellen Entscheidungshilfe als *„heuristischen Ersatz für wachsames Suchen und Verarbeiten von Informationen.“* (([Mosier & Skitka, 1996], Seite 205), [Parasuraman & Manzey, 2010]). Diese Verzerrung äußert sich bei Operateuren im Umgang mit fehlerbehafteten Unterstützungssystemen durch sogenannte *omission errors* (Operateur reagiert nicht auf kritische Situation bzw. übersieht diese, da nicht gemeldet) und *commission errors* (Operateur folgt der durch das System vorgeschlagenen und möglicherweisen falschen Entscheidung) [Parasuraman & Manzey, 2010]. Diese automationsindizierte Verzerrung stellt ein Sonderfall menschlicher Entscheidungsverzerrung dar. Dabei kann der Fall auftreten, dass ein Operateur seine Entscheidungs- und Urteilsfähigkeit einem automatisierten System unterstellt oder falsche Entscheidungen ohne Hinterfragen übernommen werden ([Parasuraman & Manzey, 2010] nach ([Mosier & Skitka, 1996], [Dzindolet, Pierce, Beck, & Dawe, 2005], [J. D. Lee & See, 2004], [C. D. Wickens & Hollands, 2000], [Karau & Williams, 1993]).

Complacency und *Automation Bias* sind Phänomene, welche auch durch ein übermäßiges Vertrauen (*Overtrust*) in die (vermeintlich) ordnungsgemäße Funktion eines automatisierten Systems, vor allem über längere Zeiträume oder bei fehlender Nachvollziehbarkeit automatisierter Prozesse, ausgelöst wird [Parasuraman & Manzey, 2010].

Der Begriff des *Primings* bei der Präsentation visueller Information (beispielsweise durch ein Entscheidungsunterstützungssystem) beschreibt den Effekt einer Voreingenommenheit. Dabei besteht bei der Wiedererkennung visueller Information ein Zusammenhang zu früheren Präsentationen beziehungsweise Reizsetzungen [Warren & Morton, 1982]. Dies kann dazu führen, dass nachfolgende Entscheidungen beeinflusst werden. Das Gehirn vollzieht dabei im Sinne einer ergonomischen Ökonomie nach [Warren & Morton, 1982] kognitive Operationen, wobei bereits gesehene, bekannte Strukturen ebenfalls herangezogen und bevorzugt als Lösung ausgewählt werden können ([Seymour, 1973], ([Warren & Morton, 1982], Seite 126)). Dadurch können sowohl vermeintliche Wiedererkennungseffekte als auch Beeinflussungseffekte oder Voreingenommenheit durch vorher Gesehenes entstehen.

Langzeiteffekte (Langzeit-*Out-Of-The-Loop*-Effekte) durch chronische Unterforderung können zudem zu einem Abbau und Verlust der Fähigkeiten und Kompetenzen des Operateurs führen, falls entsprechende Aufgaben dauerhaft durch Automation ausgeführt werden ([C. E. Billings, 1997], [C. D. Wickens & Hollands, 2000]). Bei diesem Kompetenzverlust verliert der Mensch seine Routine bei der manuellen Aufgabendurchführung, da er seine Fähigkeiten nicht mehr aktiv und regelmäßig zum Bewältigen einer Aufgabe einsetzen muss.

Anhang C: System- und Softwaremodulschaubild

Bild 4 zeigt das Automationssystem aus vernetzten Anwendungen. In den grün eingefärbten Modulen wurde die Funktionalität der drei Automationsgrade realisiert.

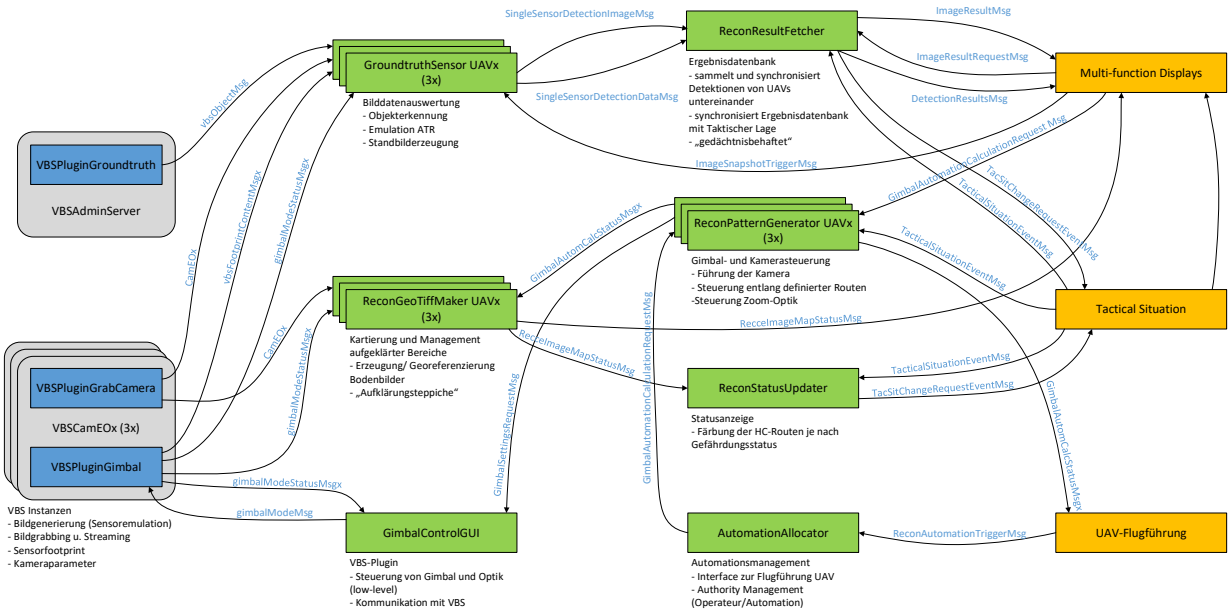


Bild 4: Automationssystem aus vernetzen Anwendungen. blau: Plugins in der Simulationsengine; grün: Funktionalitäten zur Erzeugung von Aufklärungsprodukten und zur Ergebnisaufbereitung; orange: Peripherie-Komponenten wie Taktische Lage, *Multi-Function Displays* zur Darstellung der Aufklärungsprodukte sowie der abgetrennten UAV-Flugführung (black-box - System). Die Pfeile bezeichnen den Fluss und die Richtung der wichtigsten Kontroll-, Status und Ergebnisdaten in Nachrichten. Rohdatenflüsse sind nicht gesondert dargestellt.

Anhang D: Missionsvignetten

In diesem Anhang werden die fünf verwendeten Missionen zur Evaluierung des Laborprototypen vorgestellt. Die Beschreibungen aus diesem Abschnitt stammen aus den Projektabschlussberichten des Forschungsprojekts CASIMUS ([Schulte et al., 2018], [Stuetz et al., 2018]). Die inhaltliche Ausarbeitung der Szenarien und Missionen erfolgte im Rahmen von studentischen Arbeiten ([Pyschkin, 2014], [Pyschkin, 2015], [Winkler, 2015], [Winkler, 2016]).

Der Anhang umfasst:

- eine Übersicht über die Einsatzgebiete
- eine kurze Darstellung der Luftraumordnung & taktische Grundlagen
- Beispiel- und Trainingsmission „*Tagab Journalists*“

Einsatzgebiet Übersicht

Bild 5 illustriert das gewählte Einsatzgebiet der Missionen, welches sich in der räumlichen Dislozierung am Afghanistan-Einsatz der Bundeswehr orientiert, wobei die Missionsgebiete zwar in Afghanistan liegen, jedoch außerhalb des momentan aktuellen Einsatzgebietes der Bundeswehr. Damit soll vermeiden, dass die Versuchspiloten mit Einsatzerfahrung in Afghanistan in ihrem Absolvieren der Missionen durch Erinnerungen, Wiedererkennung oder Lerneffekte beeinflusst werden.

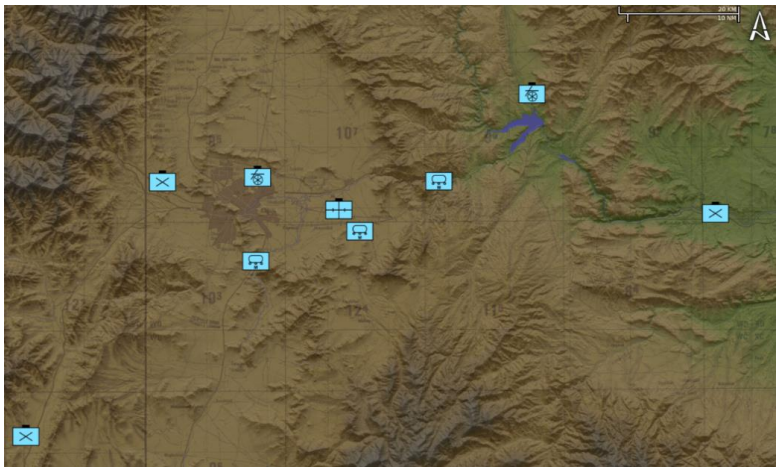


Bild 5: Überblick über das Einsatzgebiet der CASIMUS-Missionen in Afghanistan.

Luftraumordnung & taktische Grundlagen

Dieser Abschnitt beschreibt kurz die für die Szenarien gewählte Luftraumstruktur welche größtenteils der Struktur in [Bundeswehr, 2011; NATO Standardization Agency, 2012b] folgt. Ein wesentliches taktisches Element ist die *Helicopter Operating Area* (HOA), innerhalb derer keine anderen Luftfahrzeuge außer dem ihr zugewiesenen Hubschrauberschwarm operieren. Die HOA entspricht dem geplanten Operationsgebiet und sollte mindestens 10km*10km groß sein. Die Form der HOA ist nicht näher festgelegt, alle anderen taktischen Areale liegen innerhalb der HOA. Die HOA ist in Bild 6 durch den äußersten, blauen Rahmen definiert. Innerhalb einer HOA können sich eine oder mehrere *Helicopter Operating Boxes* (HOB) befinden. Die HOB ist wie Bild 6 ersichtlich als blau gestricheltes Polygon dargestellt.

Im Einsatzgebiet sind eigene Bodentruppen und verschiedene Stützpunkte verteilt. Diese gliedern sich in *Main Operating Bases* (MOB), *Forward Operating Bases* (FOB) und *Checkpoints* sowie Patrouillen.

Sind während einer Operation Landungen geplant, sind im entsprechenden Gebiet *Landing Zones* (LZ) in die taktische Lagedarstellung zu vermerken. Da im Rahmen der CASIMUS-Szenarien nur ein einzelner bemannter Hubschrauber im Einsatz ist und die Landung der UAVs nicht vorgesehen ist, kann auf eine Darstellung des taktischen Elements der LZ verzichtet werden. Somit sind innerhalb der HOB bei geplanten Landungen nur *Landing Sites* (LS) einzutragen, in denen der Hubschrauber landen kann. Diese Vereinfachung trägt insbesondere dazu bei, die taktische Lage übersichtlich und klar strukturiert zu halten und ist aufgrund lediglich eines bemannten, landefähigen Luftfahrzeugs im Operationsgebiet auch plausibel dem Sinn der aktuell gültigen Vorschrift nachempfunden [Bundeswehr, 2011]. Innerhalb einer LZ gibt es mindestens eine *Landing Site* (LS) und eine *Alternative Landing Site* (ALS), die jeweils durch einen *Approach* (AP) und einen *Departure Point* (DP) anzufliegen bzw. zu verlassen sind. *Landing Sites* sind in Bild 6 durch die auffällig blauen Vierecke innerhalb der HOB definiert. Die LS und ALS sind dabei aufgrund des Wegfalls der LZ (s.o.) direkt in der HOB eingetragen.

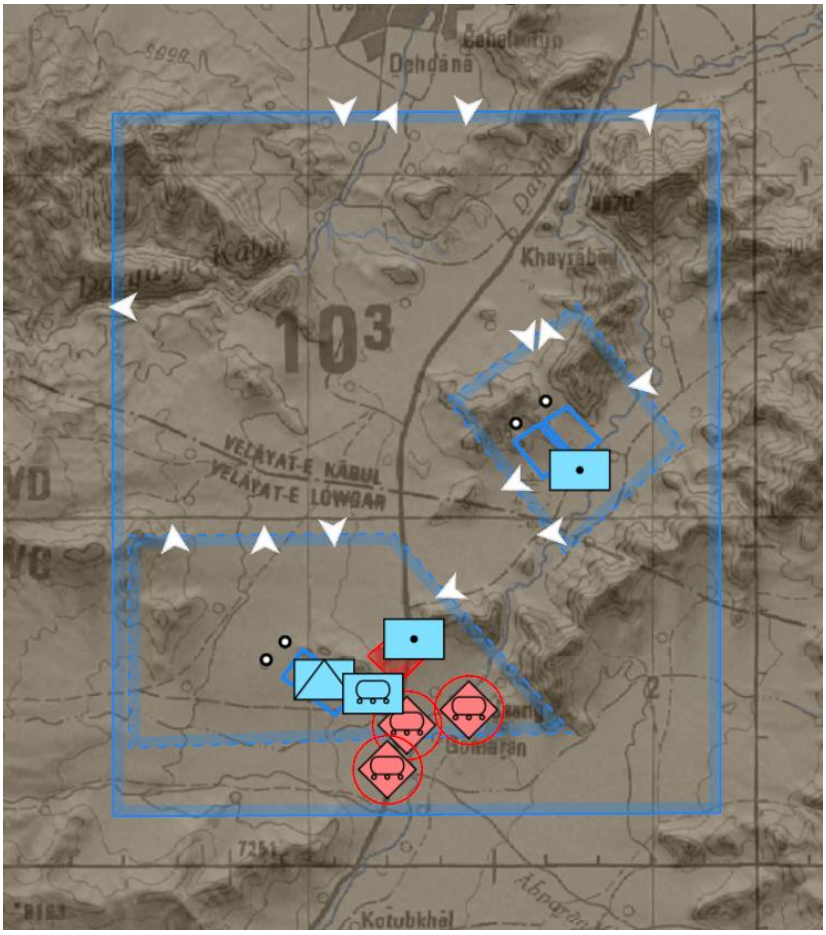


Bild 6: Luftraumordnungsmittel am Beispiel einer taktischen Lage.

Innerhalb der LS und ALS wiederum gibt es in den momentanen Vorschriften mehrere, vorgeplante *Landing Points* (LP), an denen die tatsächliche Landung des Hubschraubers stattfinden kann. Im Gegensatz zur heutigen Situation werden diese LPs während der CASIMUS-Missionen durch die hochautomatisierte Landzonenaufklärung an Bord der UAVs anhand von a-priori Wissen (Datenbanken und Geländemodelle) generiert und in die digitale Karte eingetragen.

Luftraumordnungsmittel, die bestimmten Räume definieren, können nur durch *Ingress*- bzw. *Egresspoints* betreten oder verlassen werden. Die Darstellung der *In-/Egresspoints* erfolgt durch einen Pfeil in bzw. aus der jeweiligen Luftraumordnungsstruktur hinein bzw. hinaus.

Ein weiteres Element zur Luftraumordnung sind taktische Flugverbotszonen (*No-Fly-Zones*, NFZ), deren Grenzen nicht überflogen werden dürfen. Die Gründe zur Einrichtung dieser Zonen können vielfältig sein, bspw. wenn das enthaltene Gebiet besonders gefährlich ist, dort keine Funkverbindung besteht oder mit eigenem Feuer durch Bomber oder Artillerie zu rechnen ist. Das rot schraffierte Gebiet im unteren Teil der Bild 6 eine solche NFZ dar.

Zusätzlich zu den beschriebenen Luftraumordnungsmitteln werden durch die Verwendung taktischer Zeichen gemäß MIL-STD-2525C [U.S. Department of Defense, 2008] einheitliche und standardisierte Zeichen verwendet. Diese taktischen Zeichen sind einerseits nach ihrer Farbe geordnet, blaue Symbole sind eigene, rote Symbole feindliche, gelbe unbekannte und grüne neutrale Entitäten. Andererseits stehen die Symbole je nach äußerer Form und im Inneren abgebildetem Symbol für verschiedene Klassen von Entitäten. Zusätzlich können die Symbole mit einem Bedrohungsradius, wie in Bild 6 dargestellt, versehen werden, um Sicherheitsabstände, insbesondere zu feindlichen Einheiten, einhalten zu können.

Die Tabelle in Bild 7 zeigt eine Übersicht der in [Winkler, 2016] erstellten Missionen.

Mission	Tagab Journalists	Special Observation	Golden Hour	Dessert Shield	Rocket Raid	Mosahi Convoy
Szenarienart	Training	Evaluation	Evaluation	Evaluation	Evaluation	Evaluation
Missionstyp	CASEVAC	EOD-Transport	MEDEVAC	Truppentransport, Evakuierung	Truppentransport	Truppentransport, Bergung
Missionsdauer in [min]	35	35	30	40	40	30
Folgeaufträge	0	0	1	1	2	1
Flugweg	Geschlossen, A-B-A	Geschlossen, A-B-A	Offen, A-B-C	Geschlossen, A-B-C-A	Geschlossen, A-B-C-D-D-A	Geschlossen, A-B-C-A

Legende: Flugweg A-B-C (Start in A, Flug nach B, Landung in C); offen (Missionsstartpunkt ≠ Missionsendpunkt), geschlossen (Missionsstartpunkt =

Bild 7: Charakteristika der Trainings- und Evaluationsszenarien.

Nachfolgend werden typische Strukturen und Abläufe einer MUM-T-Mission anhand des Test- und Trainingsszenars „*Tagab Journalists*“ erläutert.

Beispiel- und Trainingsmission „Tagab Journalists“

Im Folgenden wird der Ablauf und der Aufbau einer MUM-T-Mission anhand der Trainingsmission „*Tagab Journalists*“ erläutert, welche typische Gegebenheiten und notwenige Handlungsabläufe der Crews in den Evaluierungsmissionen widerspiegelt. Dabei wurde die Crew explizit geschult, die UAVs mit den automatisierten Aufklärungsfunktionen zielführend einzusetzen, um über aufgeklärten Flugrouten operieren zu können.

Lage

Ein ziviler Hubschrauber mit fünf Personen ist in feindlich kontrolliertem Gebiet bei Alasay im Tagab-Tal (Afghanistan) abgestürzt. Es liegen Informationen vor, dass sich feindliche Kräfte der Absturzstelle nähern. Bild 8 stellt das Missionsgebiet detaillierter dar.

Auftrag

Ziel ist die eindeutige Lokalisierung des abgestürzten Hubschraubers und die Rettung der Besatzung, bevor mögliche feindliche Kräfte die Absturzstelle erreichen.

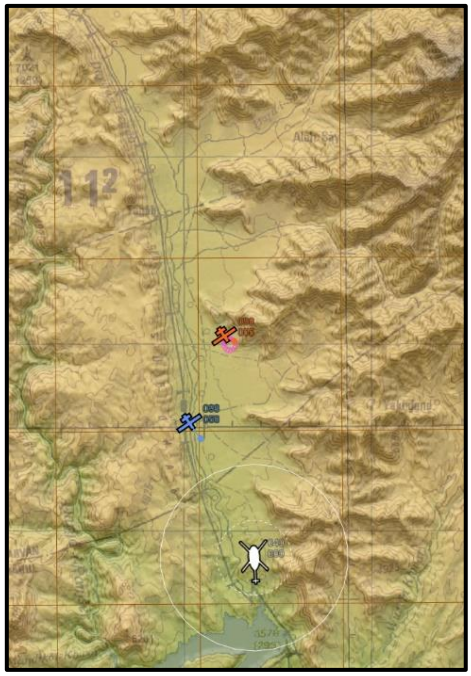


Bild 8: Missionsgebiet "*Tagab Journalists*".

Mittel

Zur Auftragsdurchführung stehen ein bemannter Hubschrauber sowie drei unbemannte Luftfahrzeuge (UAVs) zur Verfügung. Die Mission beginnt innerhalb einer eigenen vorgelagerten Operationsbasis (FOB[81]). Der bemannte Transporthubschrauber ist unbewaffnet und steht abflugbereit auf einem Helipad. Die drei UAVs sind ebenfalls unbewaffnet, jedoch mit einer elektrooptischen Kamera sowie einem 3D-bildgebenden LIDAR als Missionssensorik ausgestattet. Die UAVs sind bereits in der Luft und warten in einem Holding Pattern nördlich der FOB auf Einsatzbefehle.

Durchführung

Der Abflug aus der vorgelagerten Operationsbasis (FOB Chineh) erfolgte über November. Der Einflug in die HOA[82] erfolgt wahlweise über ALPHA[83]oder BRAVO. UAV1 und UAV2 klären innerhalb der HOA den Hauptflugweg und einen alternativen Flugweg für den Hubschrauber auf. UAV3 fliegt direkt in die HOB[84] zur vermuteten Absturzstelle und lokalisiert sowohl den abgestürzten Hubschrauber als auch die Besatzung. Nach erfolgreicher Lokalisierung findet UAV3 in der Landezone (LZ[85], LS[86]) mehrere geeignete Landepunkte (LP[87]). Der Transporthubschrauber landet und evakuiert die überlebenden Zivilisten. Die geretteten Zivilisten werden zur Drop-Zone

[81] Main Operating Bases (MOB), Forward Operating Bases (FOB) und Checkpoints
[82] *Helicopter Operating Area* (HOA): Gebiet, innerhalb dessen keine anderen Luftfahrzeuge außer dem ihr zugewiesenen Hubschrauberschwarm operieren.
[83] *Ingress*- bzw. *Egresspoints*: Luftraumordnungsmittel, die bestimmten Räume definieren, können nur durch diese betreten oder verlassen werden. Benennung hier: ALPHA, BRAVO, ZULU.
[84] *Helicopter Operating Boxes* (HOB): Innerhalb einer HOA können sich eine oder mehrere HOBs befinden.
[85] *Landing Zone* (LZ): Gebiet, innerhalb dessen der Helikopterlandungen geplant sind.
[86] *Landing Sites* (LS): Gebiete, in denen der Hubschrauber landen soll.
[87] *Landing Points* (LP): Ort, an dem die tatsächliche Landung des Hubschraubers stattfindet.

außerhalb der HOA geflogen. Der Ausflug aus der HOA erfolgt dabei über ZULU. Nach Landung in der Drop-Zone nehmen befreundete Kräfte die evakuierten Zivilisten entgegen. Der Hubschrauber fliegt zurück zur FOB. Bild 9 visualisiert den Missionsablauf anhand der taktischen Lage in der Mission.

Feindinformationen

Feindliche Kräfte in unbekannter Stärke nähern sich dem Operationsgebiet aus nördlicher Richtung. Es wird von einer Bedrohung durch verschiedene leichte Luftabwehrwaffen - Man Portable Air Defence System (MANPADS) - ausgegangen. Die feindlichen Kräfte verwenden Jeeps und sind entsprechend beweglich. Mit weiteren feindlichen Kräften ist innerhalb des Operationsgebiets jederzeit zu rechnen.

Kommunikation

Das Rufzeichen des bemannten Hubschraubers ist BOOMER. Die Luftraumkontrolle hat im Einsatzgebiet das Rufzeichen GALACTICA.

An bestimmten Punkten müssen Meldungen an die überwachende Stelle weitergegeben werden.

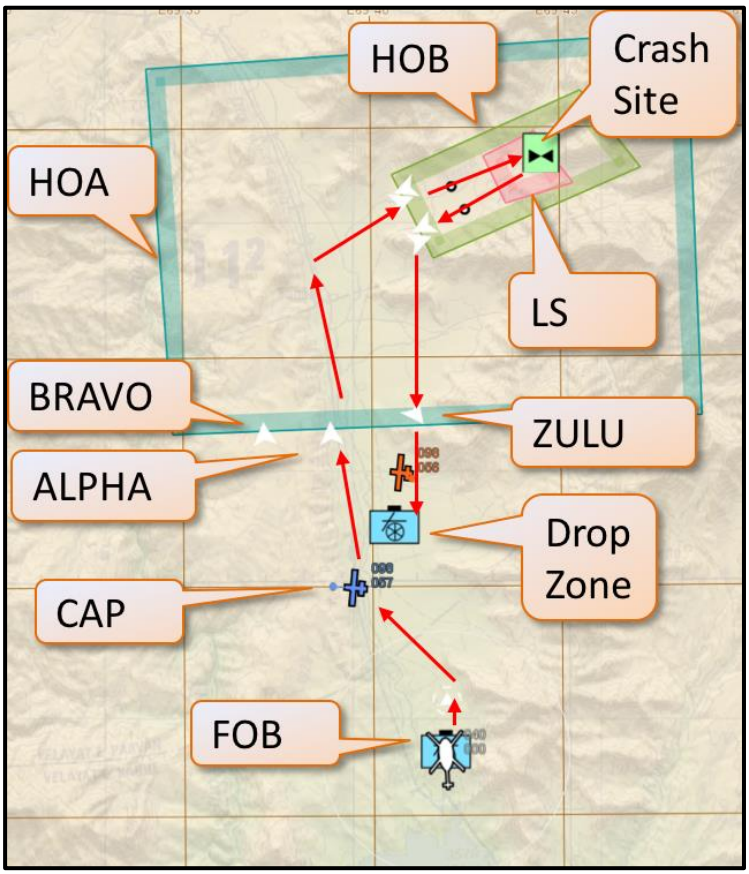


Bild 9: Luftraumordnung und taktische Lage in der Mission "*Tagab Journalists*".

Die Beschreibung der Evaluationsszenarien kann [Winkler, 2016] entnommen werden.

Anhang E: Fragebögen

Auf den folgenden Seiten werden die zur Evaluierung erstellten Fragebögen abgebildet.

Diese umfassen:

- Abschlussfragebogen zur Evaluierung der Variablen Automation am Ende der Kampagne (Anhang E1)
- Abschlussfragebogen zur Evaluierung der Benutzerschnittstelle im Cockpit am Ende der Kampagne (Anhang E2)
- Fragebogen zur Evaluierung jeder geflogenen Mission (Anhang E3).

Hinweis: Die Fragebögen enthalten weitere Fragen, welche nicht zur Beantwortung der Forschungsfragen herangezogen wurden.

Anhang E1: Abschlussfragebogen Variable Automation

Universität der Bundeswehr München

Institute of Flight Systems IFS

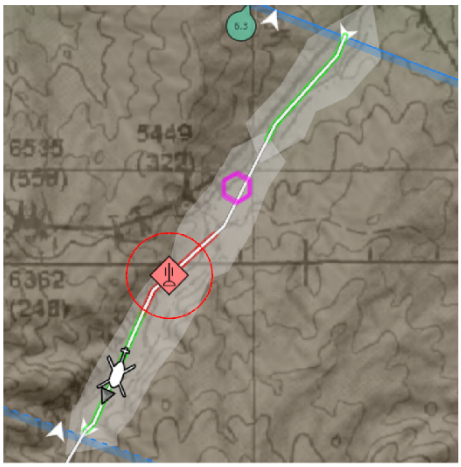
Dieser Fragebogenabschnitt bezieht sich AUSSCHLIESSLICH auf die automatisierte Aufklärung, den Umgang mit den Aufklärungsergebnissen sowie die manuelle Nutzung der Missionssenoren auf den UAVs zu Aufklärungszwecken.

Hinweis: Die Fragen beziehen sich hauptsächlich auf die abgebildeten Aufklärungsergebnisse bzw. Elemente der automatisierten Aufklärung in den Missionen

Target Candidates

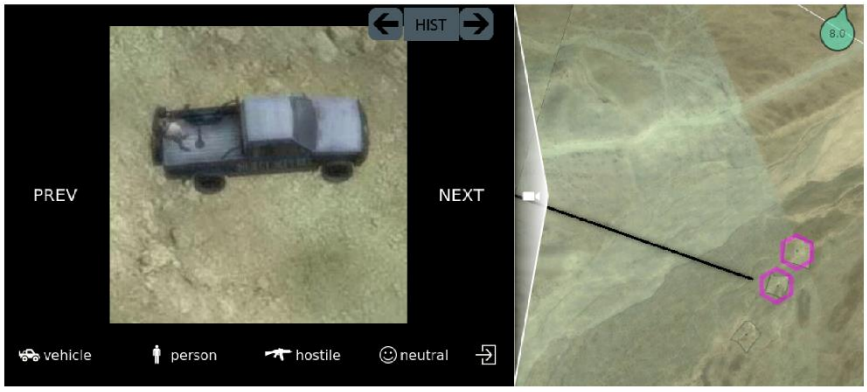
Target Candidates ohne Identifizierungsbild/ veraltet

Aufgeklärte Routen mit Bedrohungsstatus



Identifizierungsbilder auf der Taktischen Karte

Identifizierungsbilder im Bildspeicher



Bodenbilder in zoombarer Kartendarstellung

1. Bewerten Sie die Gebrauchstauglichkeit der Aufklärungsautomation.

Bitte geben Sie an, wie sehr Sie folgenden Aussagen zustimmen.

	gar nicht				vollständig
Die Ausbeute an Ergebnissen der automatisierten Aufklärung empfinde ich als ausreichend, um den Hubschrauberflug in der Mission als sicher einstufen zu können.	○	○	○	○	○
Ich habe ausreichend gute Aufklärungsergebnisse durch die Automation erhalten.	○	○	○	○	○
Mein Bedarf an Aufklärung konnte durch die Automation alleine ausreichend gedeckt werden.	○	○	○	○	○
Die Automation erfordert zu viele Eingriffe und Mitwirken meinerseits, um ausreichende Aufklärungsresultate zu erhalten.	○	○	○	○	○
Meine geleisteten Beiträge zur Aufklärung können nicht durch Automation alleine erbracht werden.	○	○	○	○	○

2. Schätzen Sie Ihre aufgewendete Anstrengung bei der Aufgabenerledigung ein.

Bitte geben Sie an, wie sehr Sie folgenden Aussagen zustimmen.

Hinweis: Der Begriff „Aufgaben“ bezieht sich hier auf Ihre Betätigungen, die in Verbindung mit der Aufklärung stehen.

	gar nicht				vollständig
Die Erledigung der Aufgaben habe ich als anstrengend empfunden.	○	○	○	○	○
Die Erledigung der Aufgaben ist mir leicht gefallen.	○	○	○	○	○

3. Schätzen Sie Ihre aufgewendete Konzentration bei der Aufgabenerledigung ein.

Bitte geben Sie an, wie sehr Sie folgenden Aussagen zustimmen.

Hinweis: Aufgaben bezieht sich hier auf Ihre Betätigungen, die in Verbindung mit der Aufklärung stehen.

	gar nicht				vollständig
Um die anfallenden Aufgaben angemessen zu erledigen, musste ich mich konzentrieren.	○	○	○	○	○
Während der Erledigung der Aufgaben war ich durchgehend konzentriert.	○	○	○	○	○
Es hat Konzentration benötigt, sich alle für die Aufgabe relevanten Informationen zu merken.	○	○	○	○	○

4. Schätzen Sie Ihre aufgewendete Aufmerksamkeit bei der Aufgabenerledigung ein.

Bitte geben Sie an, wie sehr Sie folgenden Aussagen zustimmen.

Hinweis: Aufgaben bezieht sich hier auf Ihre Betätigungen, die in Verbindung mit der Aufklärung stehen.

	gar nicht				vollständig
Für die Erledigung der Aufgaben war aktive Aufmerksamkeit nötig.	○	○	○	○	○
Um die Aufgaben zu erledigen, habe ich nicht viel Aufmerksamkeit aufwenden müssen.	○	○	○	○	○
Mir ist es leicht gefallen, die für die Aufgabe relevanten Informationen herauszufiltern/wahrzunehmen.	○	○	○	○	○
Mir ist es leicht gefallen, mir alle für die Aufgabe relevanten Informationen zu merken.	○	○	○	○	○
Mir ist es leicht gefallen, die Aufmerksamkeit auf die Aufklärungsaufgaben zu verlagern.	○	○	○	○	○

5. Bewerten Sie die Präsentationsform der ausgegebenen Aufklärungsergebnisse.

Bitte geben Sie an, wie sehr Sie folgenden Aussagen zustimmen.

	gar nicht				vollständig
Die Bedeutung der verwendeten Darstellungsweise der Aufklärungsdaten war mir klar.	○	○	○	○	○
Ich habe Zeit gebraucht, um mich an die unterschiedliche Darstellungsweise von Informationen zu gewöhnen.	○	○	○	○	○
Es hat mich Anstrengung gekostet, mit mehreren Darstellungsformen der Informationen zu arbeiten.	○	○	○	○	○
Es hat mich Anstrengung gekostet, zwischen den verschiedenen Darstellungsformen der Informationen zu wechseln.	○	○	○	○	○

6. Bewerten Sie die Darstellungsweise der Target Candidates.

Bitte geben Sie an, wie sehr Sie folgenden Aussagen zustimmen.

	gar nicht				vollständig
Die symbolische Darstellung der Target Candidates hebt sich von den anderen Symbolen auf der taktischen Karte ab.	○	○	○	○	○
Form und Farbgebung der Target Candidates machen diese eindeutig erkennbar.	○	○	○	○	○
Die Symbolik der Target Candidates ist leicht wahrnehmbar.	○	○	○	○	○
Die Symbolik der Target Candidates ist eingängig und einprägsam.	○	○	○	○	○
Neu auftretenden Target Candidates fallen auf der taktischen Karte schnell auf.	○	○	○	○	○

7. Wie hoch war Ihr Vertrauen in die Aufklärungsautomation?

Bitte Abschätzungen in prozentualer Form vornehmen!

Mein Vertrauen in die automatisierten Aufklärungsfunktionen für Fahrzeuge und Personen auf Routen beträgt [%]: [ ] Prozent

8. Besteht Ihrerseits unterschiedliches Vertrauen in die verschiedenen Formen der Datenpräsentation?

Hinweis:

Gemeint sind:

- Echtzeitvideo mit Annotationen
- Karte aus Bodenbildern
- Target Candidates auf der Taktischen Karte
- Taktische Karte/ taktische Symbole (nach STANAG)

nein ○ ○ ja

9. Falls unterschiedliches Vertrauen in verschieden Formen der Datenpräsentation vorliegt, schätze ich dieses wie folgt ein:

Bitte Abschätzungen in prozentualer Form vornehmen!

Echtzeitvideo mit Annotationen:	Prozent
Durch UAVs erzeugte Karte aus Bodenbildern:	Prozent
Durch UAVs ermittelte Target Candidates:	Prozent
Durch UAVs automatisch erzeugte Taktische Karte (taktische Symbole):	Prozent

10. Ab welcher Zeitspanne betrachten Sie die Aufklärungsdaten der Routen und Gebiete als veraltet und damit unglaubhaft?

Hinweis:

Bezieht sich darauf, wie weit voraus die UAVs vor Ihrem Helikopter aufklären.

Bitte Abschätzungen in ggf. Stunden, Minuten, Sekunden vornehmen!

Voll glaubwürdig	Stunden:Minuten:Sekunden
Halbierte Glaubwürdigkeit/ teilrelevant:	Stunden:Minuten:Sekunden
Komplett veraltet/ irrelevant (muss nochmals aufgeklärt werden)	Stunden:Minuten:Sekunden

11. Bewerten Sie den Grad der Erfüllung der Nutzerkontrolle und -hoheit über die vorliegende Automation.

Bitte geben Sie an, wie sehr Sie folgenden Aussagen zustimmen.

	gar nicht				vollständig
Das Automationssystem erfüllte meine Anforderungen hinsichtlich geforderter Nutzerkontrolle und -kontrollierbarkeit von Automation.	○	○	○	○	○
Die tieferen Eingriffs- und Zugriffsmöglichkeiten (manuelle Bedienung, manuelles Übersteuern) erachte ich als nützlich und hilfreich.	○	○	○	○	○

12. Bewerten Sie die Gebrauchstauglichkeit bzw. Nutzung der dargestellten Aufklärungsergebnisse zur erfolgreichen Durchführung der Mission

Bitte geben Sie an, wie sehr Sie folgenden Aussagen zustimmen.

	gar nicht				vollständig
Die Darstellung von taktischen Symbolen von Gefährdungen nach STANAG in der Karte ist für die erfolgreiche Durchführung der Mission nötig.	○	○	○	○	○
Die Darstellung von potentiellen Gefährdungen durch Target Candidates in der Karte ist für die erfolgreichen Durchführung der Mission nötig.	○	○	○	○	○
Die Darstellung der aufgeklärten Routen in der Karte ist für die erfolgreichen Durchführung der Mission hilfreich.	○	○	○	○	○
Die Darstellung der Bodenbilder der aufgeklärten Routen in der Karte ist für die erfolgreichen Durchführung der Mission hilfreich.	○	○	○	○	○
Der Zugriff auf die Videostreams der UAVs mit Objektdetektion in Echtzeit ist für die erfolgreichen Durchführung der Mission hilfreich.	○	○	○	○	○

13. Waren Ihnen die folgenden Zustände der Automation stets bewusst bzw. die Situationen klar?

	gar nicht				vollständig
Target Candidates werden beim Eintritt von degradierter Erkennungsleistung präsentiert.	○	○	○	○	○
Es sind neue Target Candidates aufgetaucht.	○	○	○	○	○
Es wird ein menschlicher Entscheider gebraucht, um Target Candidates zu identifizieren.	○	○	○	○	○

14. Bewerten Sie die Aufklärungsautomation hinsichtlich der angebotenen Möglichkeiten des Einsatzes in unvorhergeshehenen Fällen, dem gebotenen Spektrum der Einsetzbarkeit sowie der Nutzbarkeit des manuellen Einsatzes.

Bitte geben Sie an, wie sehr Sie folgenden Aussagen zustimmen.

	gar nicht				vollständig
Der direkte Zugriff und die manuelle Führung des Sensors ermöglichten es, unvorhergesehene Ereignisse in der Mission selbst zu betrachten.	○	○	○	○	○
Die Möglichkeit, die Kontrolle über den Sensor (manuelle Eingriffsmöglichkeit) zu haben, erachte ich als notwendig.	○	○	○	○	○
Die manuelle Führung des Aufklärungssensors erachte ich als notwendige Ergänzung zum automatisierten Betrieb.	○	○	○	○	○
Die gebotene Möglichkeit des manuellen Eingriffs und der manuellen Führung des Sensors ergänzt das automatisierte Einsatzspektrum sinnvoll.	○	○	○	○	○

15. Welche Erkennungsleistung sollte ein reales System zur automatisierten Aufklärung vorweisen können, um im Missionskontext von Ihnen als glaubhaft und damit nützlich eingestuft bezeichnet werden zu können?

Hinweis: Übertragen Sie die Situation im Simulator auf die Anwendung in der realen Welt.

Geforderte Erkennungsleistung: _____ Prozent

16. Falls nicht vorhanden, welche Informationen zur Identifizierung von Objekten fehlen einem Kommandanten im evaluierten Ansatz der automatisierten Aufklärung?

Hinweis:

Nicht vorhandene, benötigte Informationen könnten sein:

Infrarotbild, Daten aus weiteren Aufklärungssensoren, Bewegungsprofil, Verweildauer, Kennzeichenabgleich von Fahrzeugen, konkretere Geländeinformationen des Objektorts, ...

17. Falls nicht vorhanden, welche hilfreichen bzw. nötigen Informationen zur Durchführung der Mission und Eigensicherung fehlen einem Kommandanten im evaluierten Ansatz der automatisierten Aufklärung?

Hinweis:

Nicht vorhandene, mögliche benötigte Informationen könnten sein:

Mehrfach abgesuchte Flugwege, breitere aufgeklärte Routen, Aufklärung von Gebieten, Informationen über mögliche günstige taktische Gegebenheiten für Feinde (z.b. Routen entlang abgeschatteter Bereiche), historische Informationen über Bedrohungen und Angriffe in der Vergangenheit, ...

18. Bewerten Sie die Sinnhaftigkeit des Ansatzes zur Aufklärung aus dem Cockpit

Bitte geben Sie an, wie sehr Sie folgenden Aussagen zustimmen.

	gar nicht				vollständig
Den Ansatz, Target Candidates im Cockpit zu identifizieren, halte ich für geeignet.	○	○	○	○	○
Die Identifikation von Target Candidates muss extern durch Dritte durchgeführt werden.	○	○	○	○	○
Der Kommandant benötigt mehr Informationen zur Identifikation von Objekten.	○	○	○	○	○
Der Identifikationsprozess ist für den Kommandanten unzumutbar.	○	○	○	○	○

19. Eigene Anmerkungen und Erläuterungen:

Letzte Seite

Vielen Dank für Ihre Teilnahme!

Wir möchten uns ganz herzlich für Ihre Mithilfe bedanken.

Ihre Antworten wurden gespeichert, Sie können das Browser-Fenster nun schließen.

Christian Ruf, Universität der Bundeswehr München – 2017

Anhang E2: Abschlussfragebogen User Interface

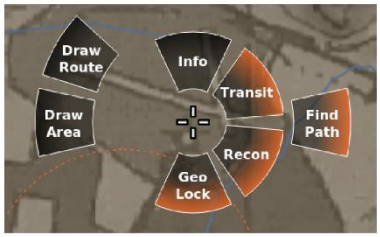
Universität der Bundeswehr München

Institute of Flight Systems IFS

Dieser Fragebogenabschnitt bezieht sich AUSSCHLIESSLICH auf die Benutzerschnittstellen, über welche mit den Aufklärungskomponenten interagiert wurde.

Hinweis: Die Fragen beziehen sich hauptsächlich auf die abgebildeten Interaktions- bzw. Dialogschnittstellen der automatisierten Aufklärung

Auftragsbedienelement

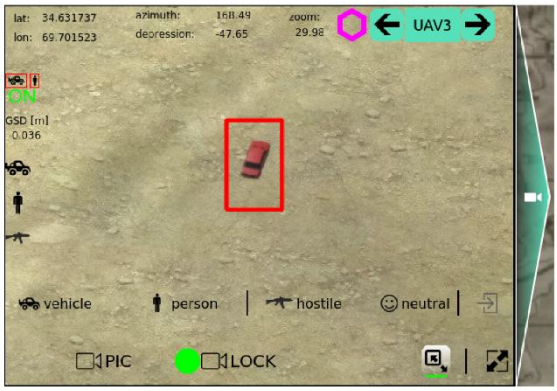


Darstellung von Target Candidates

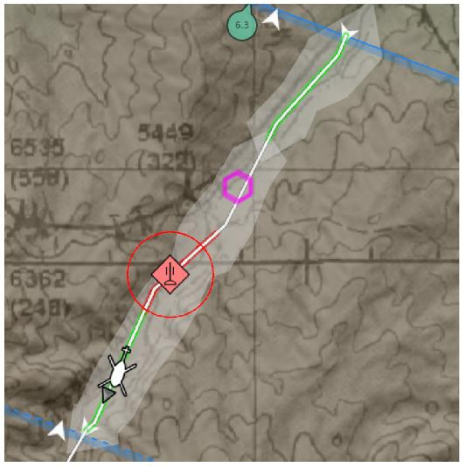
Target Candidates ohne Identifizierungsbild/ veraltet

Darstellung von Target Candidates mit Identifikationsdialogen

Benutzerschnittstelle zum direkten Zugriff auf Sensoren



Zoombare Kartendarstellung mit aufgeklärten Routen und deren Bedrohungsstatus



1. Bewerten Sie Design und Implementierung der Benutzerschnittstellen des Aufklärungseinsatzes.

Bitte geben Sie an, wie sehr Sie folgenden Aussagen zustimmen.

	gar nicht				vollständig
Die Bedienbarkeit (Haptik) der Benutzeroberflächen empfinde ich für den Anwendungsfall als voll tauglich.	○	○	○	○	○
Die Gestaltung der Benutzeroberflächen (Optik) empfinde ich als voll tauglich.	○	○	○	○	○
Die Darstellung von Aufklärungsergebnissen empfinde ich als gut wahrnehmbar und tauglich für den Missionseinsatz.	○	○	○	○	○
Aus der Benutzerschnittstelle und der Darstellung der Aufklärungsergebnisse lassen sich alle relevanten Informationen leicht entnehmen.	○	○	○	○	○
Die Präsentation der Aufklärungsdaten fügte sich nahtlos in die Arbeitsabläufe im Cockpit ein.	○	○	○	○	○
Die Präsentation der Aufklärungsdaten ist leicht erfassbar.	○	○	○	○	○
Die Präsentation der Aufklärungsdaten ist eingängig.	○	○	○	○	○
Die Benutzerschnittstelle für den Einsatz der automatisierten Aufklärungskomponente (Auftragsbedienelement: Recon etc.) empfinde ich als zielgerichtet umgesetzt.	○	○	○	○	○
Die Benutzerschnittstellen für den manuellen Durchgriff auf tiefere Systemebenen (Gimbal, Sensor) empfinde ich als zielgerichtet umgesetzt.	○	○	○	○	○

2. Durch welche Veränderungen an den Benutzerschnittstellen würde Ihrer Meinung nach die Benutzerfreundlichkeit zunehmen bzw. eine Vereinfachung der Aufgabendurchführung eintreten?

3. Durch welche Designänderungen an den Benutzerschnittstellen würde Ihrer Meinung nach die Aufgabendurchführung erleichtert werden?

4. Welche Eingabeelemente, Fenster oder dargestellten Informationen waren besonders hilfreich? Welche nicht?

5. Eigene Anmerkungen und Erläuterungen:

Letzte Seite

Vielen Dank für Ihre Teilnahme!

Wir möchten uns ganz herzlich für Ihre Mithilfe bedanken.

Ihre Antworten wurden gespeichert, Sie können das Browser-Fenster nun schließen.

Christian Ruf, Universität der Bundeswehr München – 2017

Anhang E3: Fragebogen nach jeder geflogenen Mission

Universität der Bundeswehr München

Institute of Flight Systems

Dieser Fragebogenabschnitt bezieht sich AUSSCHLIESSLICH auf die automatisierte Aufklärung, den Umgang mit den Aufklärungsergebnissen sowie die manuelle Nutzung der Missionssenoren auf den UAVs zu Aufklärungszwecken.

Hinweise: Bezug genommen wird hauptsächlich auf folgende Elemente

Darstellung von Target Candidates mit Identifikationsdialogen

Persönliche Daten

Name:	Rolle: Kommandant
Mission:	Datum / Zeit:

1. Falls genutzt: Warum wurden in dieser Mission zum Identifizieren der Target Candidates die Standbilder im Info-Fenster auf der Karte präferiert (gegenüber dem Bildspeicher mit Standbildern)?

2. Falls genutzt: Warum wurde in dieser Mission zum Identifizieren der Target Candidates der Bildspeicher präferiert (gegenüber den Standbildern im Info-Fenster auf der Karte)?

3. Bewerten Sie die Bereitstellung der Target Candidates sowie die Güte der Aufklärungsinformationen zur Identifizierung unbekannter Objekte.

Bitte geben Sie an, wie sehr Sie folgenden Aussagen zustimmen.

	gar nicht				vollständig
Es hat mich Zeit gekostet, auf der taktischen Karte neu auftretende Target Candidates in dieser Mission zu erkennen.	○	○	○	○	○
Es war schwierig, dem Bild die für die Identifizierung des Objekts nötigen Informationen entnehmen zu können.	○	○	○	○	○

4. Falls aufgetreten: Welches waren die Probleme bei der Erkennbarkeit der Objekte?

Hinweis: Bitte eigenen Eindruck nennen!

Kriterien können sein: Bildgröße, Bildschärfe, Bildkontrast, Objektauflösung, Objektgröße im Bild, Farben, Bildstörungen, eingeschränkte Sichtbarkeit durch Wetter, Wolken, Nebel oder Rauch.

5. Falls aufgetreten: Wie wurde die Handlung des Assistemzsystems empfunden, den Bildspeicher zum Identifizieren der Target Candidates bei absoluter Notwendigkeit zu öffnen?

Bitte wägen Sie die Eigenschaften gegeneinander ab.

störend	○	○	○	○	○	hilfreich
aufdringlich	○	○	○	○	○	willkommen
überraschend	○	○	○	○	○	erwartet
ablenkend	○	○	○	○	○	leistungsfördernd

6. Falls aufgetreten: Waren Sie in der Lage, die Kritikalität der Situation aus der vorherigen Frage zu erkennen bzw. die Situation durch Eigeninitiative aufzulösen?

nein ○ ○ ja

7. Falls manuelle Eingriffe durchgeführt: Benennen Sie Ihre Motivation des manuellen Eingriffs.

Was war der Informationsbedarf?	
Was war das Ziel?	
Konnte das Ziel erreicht werden?	
Was konnte dennoch nicht erreicht werden?	

8. Nach letzter geflogener Mission:

Wie breit schätzen Sie den Aufklärungsstreifen der UAVs in den geflogenen Missionen ein? [m]

9. Nach letzter geflogener Mission:

Wie bewerten Sie die Breite des Aufklärungsstreifens der UAVs für die geflogenen Missionstypen?

- zu schmal
- passend
- zu breit

10. Nach letzter geflogener Mission:

Wie breit müsste Ihrer Meinung nach der Aufklärungsstreifen der UAVs sein, um als „passend“ für dieses Missionstyp zu gelten? [m]

Letzte Seite

Vielen Dank für Ihre Teilnahme!

Wir möchten uns ganz herzlich für Ihre Mithilfe bedanken.

Ihre Antworten wurden gespeichert, Sie können das Browser-Fenster nun schließen.

Christian Ruf, Universität der Bundeswehr München – 2017

Institut für Flugsysteme

IFS

der Bundeswehr

Universität München