

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

Kooperative Führung mehrerer unbemannter Luftfahrzeuge aus einem einsitzigen Kampfflugzeug

Dipl.-Ing. (FH) Stefan Gangl

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. Peter Stütz
1. Gutachter: Univ.-Prof. Dr.-Ing. Axel Schulte
2. Gutachter: Univ.-Prof. Dr.-Ing. Dieter Moormann

Die Dissertation wurde am 08.12.2014 bei der Universität der Bundeswehr München
eingereicht und durch die Fakultät für Luft- und Raumfahrttechnik am 10.12.2014
angenommen. Die mündliche Prüfung fand am 03.06.2015 statt.

Für meine Familie

Vorwort

Die vorliegende Dissertation entstand im Rahmen meiner mehrjährigen Tätigkeit als wissenschaftlicher Mitarbeiter am Institut für Flugsysteme an der Fakultät für Luft- und Raumfahrttechnik der Universität der Bundeswehr München.

An dieser Stelle möchte ich mich besonders bei Herrn Univ.-Prof. Dr.-Ing. Axel Schulte bedanken, der mir die Möglichkeit gab, in einem sehr spannenden und interessanten Forschungsgebiet wissenschaftlich zu arbeiten. Die zahlreichen gemeinsamen fachlichen Diskussionen zu Inhalt und Methodik meiner Forschungstätigkeiten trugen im Wesentlichen zum Gelingen dieser Arbeit bei. Auch möchte ich mich für das mir entgegengebrachte Vertrauen, für die ständige Bereitschaft zur Unterstützung bei Problemen und für die wissenschaftlichen Freiräume über all die Jahre bedanken.

Herzlich bedanken möchte ich mich auch bei Herrn Univ.-Prof. Dr.-Ing. Dieter Moormann für das Interesse an meiner Arbeit und die Übernahme des Koreferats.

Allen aktuellen und ehemaligen Kollegen des Instituts für Flugsysteme danke ich für die außerordentlich gute Zusammenarbeit und die zahlreichen Fachgespräche, um das eine oder andere Problem zu lösen. Hervorzuheben ist dabei mein Projektkollege Benjamin Lettl, der mit mir gemeinsam das mehrjährige Forschungsvorhaben *CoopUCAV* bearbeitet hat. Vor allem durch die Weiterentwicklung der kognitiven Agenten leistete er einen wichtigen Beitrag zu dieser Arbeit.

Des Weiteren bedanke ich mich bei all meinen Freunden für ihre tatkräftige Unterstützung, ihre Aufmunterungen sowie für ihren Rückhalt.

Ein besonderer Dank gebührt meinen Eltern. Sie haben mich in allen meinen Vorhaben von klein auf unterstützt und es mir stets ermöglicht, meinen eigenen Weg zu gehen. Ebenso möchte ich mich bei meinen Geschwistern Wolfgang, Bettina und Philipp für die tolle Wegbegleitung in allen Bereichen meines Lebens bedanken.

Allen voran bedanke ich mich bei meiner liebevollen Frau Carola, die mir all die Zeit über unterstützend und verständnisvoll zur Seite stand. Zuletzt möchte ich mich noch bei Jonas, Isabel und Aurelia dafür bedanken, dass sie unser Familienleben mit so viel Glück und Freude bereichern. Danke!

Stefan Gangl

Abstract

The goal of this thesis is the conception, development and experimental evaluation of an automation approach for the management of multiple UCAVs (*Unmanned Combat Aerial Vehicles*) from a single-seat manned fighter aircraft in a joint military mission. The major challenge was to enable the pilot to coordinate and manage the UCAVs from the fighter cockpit, in addition to controlling his own aircraft and managing his mission equipment.

In order to achieve this goal, a highly automated multi-UCAV guidance system is required. However, human factors studies have shown, that the interaction between the human and highly automated systems can lead to human error (e.g. the loss of situation awareness). In order to realize a highly automated multi-UCAV mission management system and at the same time avoid potential automation-induced problems, this thesis uses and implements the theory of the *Dual-Mode Cognitive Automation* [Onken & Schulte, 2010].

In the resulting automation approach the UCAVs are equipped with integrated on-board cognitive agents, which have higher cognitive abilities (e.g. generating a situational understanding, planning, decision making). In order to avoid the automation-induced problems of these highly automated systems, the automation concept comprises a cockpit assistant system to support the pilot in coordinating his activities with those of the UCAVs. Furthermore, a multimodal human-machine interface concept with novel display formats for managing multiple UCAVs (e.g. timeline-display for coordinating dependent activities) is integrated into the automation approach.

The system approach and an appropriate laboratory prototype of the developed functions are finally integrated into a complex experimental environment. The experimental environment features a single-seat fighter aircraft simulator cockpit including subsystems to carry out an air-to-ground attack mission. For the simulation of the unmanned team members, including the cognitive agents, available software systems are used and modified according to the requirements.

Finally, the thesis provides an evaluation of the system. Human-machine experiments with German Air Force pilots were conducted. The UCAVs were controlled by the provision of a mission order and the allocation of the manned-unmanned roles. The distribution of tasks between the UCAVs was performed without further pilot intervention. Based on the resulting task agenda of the UCAVs the coordination of the manned fighter aircraft was accomplished. During the mission the pilot was supported by the cockpit assistant system.

The experimental results show that the management of multiple unmanned combat aerial vehicles from aboard a single-seat fighter cockpit in the considered mission is possible. The major key to success is the chosen high level of automation for the interaction with the unmanned team. But the results also show that the demand for this high level of automation is not given in any situation or mission phase. In the experiments, periods of underload of the pilot could also be observed. Based on this, further research on variable, adaptive automation levels is needed.

Kurzfassung

Gegenstand der vorliegenden Dissertation ist die Konzipierung, Entwicklung und experimentelle Erprobung eines Automatisierungsansatzes zur Führung mehrerer unbemannter Kampfflugzeuge (*Unmanned Combat Aerial Vehicles, UCAVs*) aus einem bemannten einsitzigen Kampfflugzeug in einer gemeinsamen militärischen Mission. Dabei besteht die Herausforderung insbesondere darin, dem Piloten, neben der Führung seines Kampfflugzeuges und Bedienung der Missionsausrüstung, die Missionsführung und Koordination der UCAVs aus dem Cockpit zu ermöglichen.

Um dieses Ziel zu erreichen, sind hohe Automationsgrade auf Seiten des Multi-UCAV-Führungssystems erforderlich. Aus *Human Factors* Studien ist bekannt, dass das Zusammenwirken zwischen Mensch und hochautomatisierten Systemen zu menschlichen Fehlleistungen (z.B. Verlust des Situationsbewusstseins) führen kann. Um sowohl ein hochautomatisiertes Multi-UCAV-Führungssystem zu realisieren als auch die damit zu erwartenden menschenbezogenen Probleme weitgehend zu vermeiden, wird in dieser Arbeit als primärer Lösungsansatz die Theorie der *Dual-Mode Cognitive Automation* [Onken & Schulte, 2010] herangezogen und umgesetzt.

Im resultierenden Automatisierungsansatz werden die UCAVs mit an Bord integrierten kognitiven Agenten, die über höhere kognitive Fähigkeiten (z.B. Aufbauen von Situationsverständnis, Planen, Entscheiden) verfügen, ausgestattet. Um automationsinduzierte Probleme im Umgang des Menschen mit hochautomatisierten Systemen zu vermeiden, wird im Automationskonzept ein Cockpitassistenzsystem für die Unterstützung des Piloten bei der Koordination seiner Aktivitäten mit denen der UCAVs vorgesehen. Des Weiteren wird eine multimodale Mensch-Maschine-Schnittstelle zur Multi-UCAV-Führung einschließlich neuartiger Displayformate (z.B. Timeline Display zur Koordination abhängiger Aktivitäten) in das Automatisierungskonzept integriert.

Der konzeptionierte Systemansatz sowie ein entsprechender Laborprototyp der realisierten Funktionen werden schlussendlich in eine umfassende Experimentalumgebung integriert. Bei der Experimentalumgebung handelt es sich um einen einsitzigen Kampfflugzeugsimulator inklusive der Subsysteme zur Durchführung einer militärischen Luft-Boden-Angriffsmission. Für die Abbildung der unbemannten Teammitglieder, inklusive der kognitiven Agenten, werden verfügbare Softwaresysteme genutzt und entsprechend den Anforderungen modifiziert.

Zum Abschluss der Arbeit wird das Gesamtsystem anhand umfangreicher Mensch-Maschine-Experimente mit Piloten der Luftwaffe evaluiert. Die UCAVs werden dabei durch die Mitteilung eines Missionsauftrags und der bemannt-unbemannten Rollenverteilung geführt. Die Verteilung der Aufgaben findet zwischen den UCAVs stets ohne weiteres Zutun des Piloten statt. Auf Basis der daraus resultierenden Aufgabenabfolge der UCAVs erfolgt die Koordinierung der Aktivitäten des bemannten Kampfflugzeuges. Der Pilot wird dabei kontinuierlich durch das Cockpitassistenzsystem unterstützt.

Insgesamt zeigt die Arbeit, dass die Führung mehrerer unbemannter Kampfflugzeuge vom einsitzigen Cockpit aus in der betrachteten Mission möglich ist. Schlüssel hierfür ist der gewählte hohe Automatisierungsgrad der Interaktion mit dem unbemannten Team. Jedoch

zeigt sich auch, dass der Bedarf nach diesem hohen Automationsgrad nicht in jeder Situation bzw. Missionsphase gleichermaßen vorhanden ist. In den Experimenten waren ebenfalls Phasen der Unterforderung der Piloten zu beobachten. Hieraus lässt sich ein weiterer Forschungsbedarf nach variablen, adaptiv eingesetzten Automationsgraden ableiten.

Inhaltsverzeichnis

Vorwort	i
Abstract	iii
Kurzfassung	v
Inhaltsverzeichnis	vii
1 Einleitung	1
1.1 Motivation und Problemstellung	1
1.2 Forschungsfragestellung dieser Arbeit	3
1.3 Aufbau der Arbeit	5
2 Grundlagen	6
2.1 Führung unbemannter Luftfahrzeuge	6
2.1.1 Stand der Technik und zukünftige Anforderungen.....	6
2.1.2 Automation	10
2.1.3 Eingriffsebenen der Flugführung.....	11
2.1.4 Erhöhung des Automations- und Abstraktionsgrades	13
2.2 Forschungsumfeld	15
2.2.1 UCAR und J-UCAS.....	15
2.2.2 AMUST/HSKT	15
2.2.3 SEC- Software Enabled Control	17
2.2.4 Surrogate UAV	18
2.3 Mensch-Maschine-System	20
2.3.1 Das Arbeitssystem	20
2.3.2 Ansätze zur Funktionsallokation	22
2.3.3 Menschliche Faktoren.....	25
2.3.4 Probleme konventioneller Automation in der Flugführung.....	31
2.4 Dual-Mode Cognitive Automation	33
2.4.1 Kognitive Automation im Arbeitssystem	33
2.4.2 Supporting ACUs.....	35
2.4.3 Assistenzsysteme als Teil der OF	36

2.4.4	Kognitive Agenten.....	38
2.4.5	Realisierte kognitive Funktionsprototypen.....	39
3	Konzept.....	45
3.1	Designoptionen kognitiver Automation	45
3.1.1	Mögliche Designoptionen	45
3.1.2	Festlegung des Basisdesigns.....	47
3.2	Arbeitssystemkonzept zur Führung unbemannter Luftfahrzeuge.....	49
3.2.1	Analyse eines bemannten Kampfflugzeugteams.....	49
3.2.2	Analyse eines bemannt-unbemannten Kampfflugzeugteams....	52
3.2.3	Einbringung von kognitiver Automation.....	53
3.3	Weiterführende konzeptionelle Überlegungen	56
3.3.1	Teamstrukturen.....	56
3.3.2	Kooperation zwischen Teammitgliedern.....	59
3.3.3	Kooperative Teamkoordination.....	60
3.3.4	Effektive Koordination	65
3.3.5	Kommunikation im Team.....	67
3.4	Teamkoordinationsmodul.....	70
3.4.1	Lösungsansatz zur Unterstützung der Kooperation.....	70
3.4.2	Informationsbedarf des TKMs.....	72
3.4.3	Allgemeine Verhaltensweise	74
3.5	Mensch-Maschine-Schnittstelle zur teambasierten Führung.....	77
3.5.1	Interaktionsmodalitäten und Ressourcen.....	78
3.5.2	Arbeitsplatzanalyse.....	80
3.5.3	Abgeleitetes MAS-Konzept.....	81
4	Implementierung.....	86
4.1	Einsitziger Kampfflugzeugsimulator.....	87
4.1.1	Grundsätzlicher Aufbau und Funktionen	88
4.1.2	Displaysysteme.....	93
4.2	Unbemannte Teammitglieder	98
4.2.1	Modellierung der Plattform	99
4.2.2	Sensor- und Waffensysteme	100
4.2.3	Kognitive Systeme an Bord der UCAVs.....	101
4.3	Systeme zur Mensch-ACU-Kooperation.....	103

4.3.1	Funktionsweisen der Softwaremodule des TKMs	103
4.3.2	Mensch-Agenten-Schnittstelle	111
4.4	Missionssimulation	116
5	Experimentelle Evaluierung.....	117
5.1	Versuchsplanung	117
5.1.1	Hypothesen	117
5.1.2	Experimentelle Variablen	119
5.1.3	Unabhängige Variablen	120
5.1.4	Mission.....	120
5.1.5	Abhängige Variablen	123
5.1.6	Messwerterfassung und Datenerhebung	124
5.1.7	Rahmenbedingungen	129
5.2	Versuchsdurchführung.....	131
5.2.1	Allgemeiner Versuchsablauf.....	131
5.2.2	Mission Briefing	134
5.2.3	Exemplarischer Ablauf einer Messmission	134
5.2.4	Debriefing	136
5.2.5	Versuchspersonen	137
5.3	Experimentelle Ergebnisse.....	138
5.3.1	Leistungsmaße	138
5.3.2	Verhaltensmaße	142
5.3.3	Subjektive Maße	149
5.3.4	Situationsbewusstsein	157
5.4	Diskussion.....	160
6	Zusammenfassung und Ausblick.....	162
A.	Literaturverzeichnis.....	165
B.	Abkürzungsverzeichnis.....	178
C.	Experimentelle Messdaten.....	180

1 Einleitung

1.1 Motivation und Problemstellung

In den letzten Jahren haben unbemannte Luftfahrzeuge (*Unmanned Aerial Vehicles, UAVs*) in den verschiedensten Anwendungsbereichen stark an Bedeutung gewonnen [Bundestag, 2013]. Die Begründung dafür kann vor allem in deren besonderen Eigenschaften gefunden werden. Durch eine nicht mehr vorhandene fliegende Besatzung und dem damit verbundenen Wegfall der an Bord integrierten Arbeitsplätze können unbemannte Plattformen kleiner, leichter und zum Teil auch kostengünstiger als vergleichbare bemannte Luftfahrzeuge gebaut werden. Ebenso müssen die physiologischen Grenzen des Menschen im Entwicklungs- und Designprozess nicht länger berücksichtigt werden. Dies ermöglicht die Realisierung von Fähigkeiten wie hochdynamische Flugmanöver oder sehr lange operative Einsatzzeiten am Stück (z.B. mehrere Tage). Ein weiterer Vorteil liegt in der Vermeidung der unmittelbaren Gefährdung von Menschenleben durch die dislozierte Anordnung zwischen Plattform und der dazugehörigen Bedienmannschaft (siehe z.B. [Draper & Ruff, 2000]).

Je nach Anwendungsfall kommen unterschiedliche UAVs zum Einsatz. Im Regelfall handelt es sich um Flächenflugzeuge oder Drehflügler, wie Hubschrauber oder Multicopter, in unterschiedlichen Größen- und Leistungsformaten. Abhängig von den geforderten Fähigkeiten der zugrunde liegenden Anwendung reicht das Spektrum der Plattformen von Flugmodellen bis hin zu Hochleistungsflugzeugen. Neben dem eigentlichen Luftfahrzeug werden noch weitere Komponenten für den operativen Einsatz benötigt (siehe z.B. [Austin, 2010]). Im Allgemeinen handelt es sich dabei um mindestens eine *Bodenkontrollstation (BKS)* sowie ein *Kommunikationssystem*. Über die BKS erfolgt die eigentliche Führung der Plattform samt Nutzlast. Das Kommunikationssystem verbindet die örtlich disloziert angeordneten Elemente, also die BKS und das UAV, miteinander. Ein solches Gesamtsystem wird oftmals auch als *Unmanned Aircraft System (UAS)* bezeichnet. Der heute von der *International Civil Aviation Organization (ICAO)* vorgeschriebene, wenn auch noch relativ ungebräuchliche Begriff ist *Remotely Piloted Aircraft System (RPAS)* [ICAO, 2012].

Im zivilen Sektor werden UAVs primär für Überwachungstätigkeiten und Umweltbeobachtungen eingesetzt, wie beispielsweise für die Überwachung von Pipelines, die Suche von vermissten Personen oder für das Anfertigen von Luftaufnahmen. Des Weiteren werden UAVs auch im Rahmen von Katastropheneinsätzen genutzt, um Schadensbewertungen aus der Luft vornehmen zu können oder Rettungseinsätze zu koordinieren [Adams & Friedland, 2011]. Neben diesen genannten Anwendungen finden sich eine Vielzahl weiterer ziviler Einsatzmöglichkeiten (siehe z.B. [Austin, 2010]).

Der militärische Sektor stellt nach wie vor den Haupteinsatzbereich für UAVs dar. Das Anwendungsspektrum wird vorwiegend in Missionen gesehen, die als *dull*, *dirty* oder *dangerous* charakterisiert werden können [U.S. Department of Defense, 2013]. *Dull*-Missionen sind typischerweise langwierige und umfassende Überwachungsmissionen, in denen keine besonderen Tätigkeiten als das Beobachten selbst anfallen. Zu *dirty*-Missionen zählen Einsätze, um die Umwelt auf nukleare oder chemische Kontamination zu untersuchen. Durch die Verwendung von UAVs werden Flugzeugbesatzungen keinem unnötigen Risiko ausgesetzt. Die letzte Untergruppe bilden *dangerous*-Missionen. Hierbei

handelt es sich um Einsätze in schwer umkämpften und hochgefährlichen Operationsgebieten. Auch hier bedingt der Einsatz von UAVs den Wegfall der unmittelbaren Gefährdung von Menschenleben. Durch ihr oftmals hochagiles Flugverhalten in Kombination mit kleinen Plattformgrößen kann sowohl die Detektion als auch ein damit verbundener, möglicher Verlust durch feindliche Einwirkung minimiert werden. Für welche Aufgaben die UAVs letztendlich eingesetzt werden hängt primär von deren Fähigkeiten ab.

Heutige im militärischen Umfeld im operationellen Betrieb stehende UAVs verfügen oftmals nur über Fähigkeiten, um Aufklärungs- und Überwachungstätigkeiten ausführen zu können. Aufgrund der ständigen Weiterentwicklungen kann davon ausgegangen werden, dass in absehbarer Zeit weit komplexere Tätigkeiten von UAVs ausgeübt werden, wie beispielsweise Zielbeleuchtungen, die Bekämpfung von bodengebundenen Zielobjekten bis hin zur Bekämpfung fliegender Plattformen. Aus technologischer Sicht ist der Einsatz von unbemannten Luftfahrzeugen in all diesen Rollen, die heutzutage von bemannten Kräften durchgeführt werden, in absehbarer Zukunft vorstellbar. Jedoch kann aufgrund völkerrechtlicher, politischer sowie ethisch motivierter Gründe davon ausgegangen werden, dass bestimmte Rollen weiterhin ausschließlich von bemannten Plattformen durchgeführt werden. In diesem Zusammenhang stellt sich die Frage, wie in zukünftigen militärischen Operationen damit umgegangen werden soll. Ein möglicher Lösungsansatz bietet die Zusammenarbeit bemannter und unbemannter Kräfte.

Eine denkbare Option zur bemannt-unbemannten Zusammenarbeit ist die Integration von unbemannten Systemen als gleichwertige Mitglieder zu einem bemannten System in einem Kampfflugzeugteam. In Abbildung 1 ist diese Option aufgezeigt. Ein konventionelles Team, bestehend aus vier bemannten Kampfflugzeugen, wird durch ein Team, bestehend aus einem bemannten Kampfflugzeug und drei unbemannten Kampfflugzeugen, den sogenannten *UCAVs* (*Unmanned Combat Aerial Vehicles*), ersetzt. Ein UCAV repräsentiert dabei eine spezielle Ausprägung eines UAVs, welches adäquate Eigenschaften (z.B. Leistung, Effektoren) zu einem bemannten Kampfflugzeug aufweist.

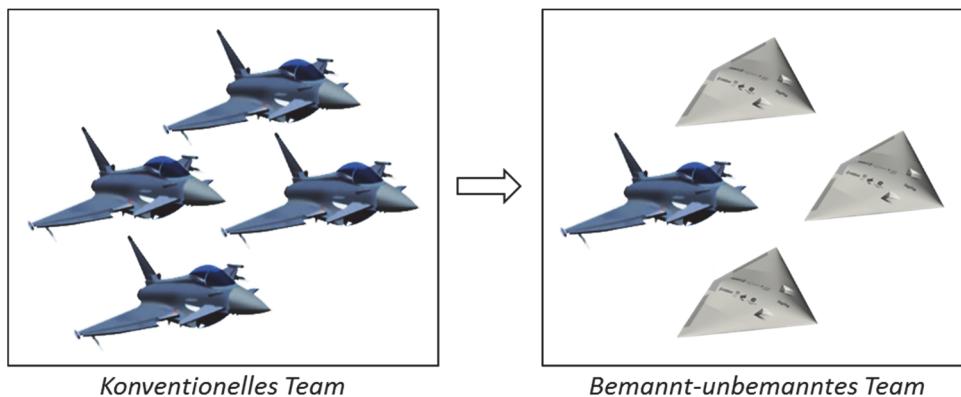


Abbildung 1: Mögliche Option einer bemannt-unbemannten Zusammenarbeit

Durch diese bemannt-unbemannte Zusammenarbeit kann das Risiko für die Luftfahrzeugbesatzungen im Vergleich zu einem konventionellen Team deutlich gesenkt werden. Anstelle von ursprünglich vier Luftfahrzeugbesatzungen wird durch den Einsatz von unbemannten Systemen nur mehr eine vor Ort benötigt. Des Weiteren kann durch eine geschickte Aufgabenverteilung zwischen der bemannten Plattform und den UCAVs die Gefahr für die verbleibende Besatzung zusätzlich reduziert werden. Die als gefährlich eingestuften Aufgaben werden den UCAVs und die als weniger risikoreich eingestuften

Aufgaben dem bemannten Kampfflugzeug zugeteilt. Dies setzt natürlich ein dementsprechendes Funktions- sowie Aufgabenspektrum der UCAVs voraus. Auch kann der verbleibenden Besatzung die Verantwortlichkeit über das gesamte Team zugesprochen werden, um rechtliche Rahmenbedingungen abzudecken und damit ethischen sowie politischen Bedenken zu begegnen. Durch die unmittelbare Anwesenheit mindestens eines Menschen im Operationsgebiet, dessen Sichtfeld nicht nur ausschließlich auf bildgebende Sensoren der UCAVs beschränkt ist, kann dieser unmittelbar vor Ort die Lage einschätzen und darauf basierend weiterführende missionsrelevante Entscheidungen (z.B. Missionsabbruch) treffen oder Freigaben (z.B. für Waffeneinsätze der UCAVs) erteilen.

In diesem Zusammenhang stellt sich die Frage, wie die unbemannten Teammitglieder geführt werden sollen. Heutige verfügbare unbemannte Systeme werden im Regelfall über eine bodengebundene BKS geführt. Damit jede Bedienmannschaft das zugehörige UCAV und die Besatzung des bemannten Kampfflugzeuges im Sinne der Erfüllung der übergeordneten Mission in Einklang mit den restlichen Teammitgliedern führen kann, muss eine Fülle an verschiedenen Informationen auf allen Seiten vorhanden sein. So sind beispielsweise Informationen zur Koordinierung von Fähigkeiten oder Abhängigkeiten zwischen verschiedenen Missionsaufgaben, welche verteilt auf unterschiedliche Mitglieder vorzufinden sind, notwendig. Häufig muss eine vorangegangene Teilaufgabe ausgeführt werden, damit eine nachfolgende stattfinden kann. In statischen Missionen, in denen keine Änderungen der Umwelt zu erwarten sind, können diese Informationen durch eine detaillierte Vorabplanung generiert werden. Jedoch müssen in dynamischen Missionen diese Informationen oftmals während der Missionsausführung an neue Gegebenheiten angepasst werden. So kann ein neues missionsrelevantes Ereignis, wie die sensorische Erfassung einer neuen Bedrohung, den gesamten nachfolgenden Missionsablauf maßgeblich beeinflussen. In der vorliegenden Arbeit wird von einem dynamischen Missionsverlauf ausgegangen (vgl. Abschnitt 5.1.4).

Aus Sicht der Besatzung des bemannten Kampfflugzeuges muss in einer dynamischen Mission ein regelmäßiger Informationsaustausch mit den Bedienmannschaften der unbemannten Teammitglieder stattfinden. Eine wesentliche Aufgabe einer Bedienmannschaft besteht dabei in der Extraktion von relevanten Informationen aus Sensorausgaben (z.B. Kamerabilder) sowie deren Weitergabe. Die Bedienmannschaft ist sowohl für die Berücksichtigung von diesen als auch von den verbleibenden Teammitgliedern erhaltenen Informationen bei der Führung der unbemannten Plattform im Missionskontext zuständig. Um die Informationsflüsse zwischen dem bemannten Kampfflugzeug, den Bodenkontrollstationen und den unbemannten Plattformen effektiver zu gestalten, soll eine luftgestützte Führung der unbemannten Systeme aus dem bemannten Kampfflugzeug untersucht werden. Hierbei erfolgt der Informationsaustausch ausschließlich zwischen den direkt beteiligten Plattformen ohne eine BKS zu involvieren. Durch die luftgestützte Führung können darüber hinaus die bekannten Probleme mit limitierten Reichweiten und Bandbreitenkapazitäten von Datenlinks zwischen einer BKS und der Plattform reduziert werden.

1.2 Forschungsfragestellung dieser Arbeit

Die in Abbildung 1 angeführte Option zur bemannt-unbemannten Zusammenarbeit bildet den Ausgangspunkt der vorliegenden Forschungsarbeit. Eine solche Teamkonstellation stellt sowohl an die Besatzung, an das bemannte Kampfflugzeug als auch an die

unbemannten Kampfflugzeuge neue Anforderungen. So müssen zur luftgestützten Führung geeignete Technologien in das bemannte Kampfflugzeug sowie in die UCAVs integriert werden, die eine Führung mehrerer UCAVs aus dem bemannten Kampfflugzeug unter vertretbarer Arbeitsbelastung ermöglichen. Entsprechende Technologien sind am Markt derzeit nicht verfügbar.

Als Vertreter des bemannten Kampfflugzeuges wird in dieser Arbeit ein einsitziges Muster, wie z.B. der Eurofighter oder die F-35, herangezogen. Der Pilot ist hierbei für die Führung des hochautomatisierten Kampfflugzeuges sowie die Bedienung der Missionsausrüstung, wie Waffen- oder Selbstschutzsysteme, zuständig. Im Vergleich zu einem Zwei-Mann-Cockpit unterliegt der Pilot einem höheren Aufgabenspektrum und ist im Allgemeinen in einem höheren Automationsumfeld integriert.

Bezogen auf diese Forschungsarbeit bedeutet das, dass der Pilot neben seinen bisherigen Aufgaben noch zusätzlich mit der luftgestützten Führung und dem Missionsmanagement der UCAVs beauftragt wird. Aufgrund der bereits relativ hohen zu erwartenden Grundarbeitsbelastung des Piloten durch die Führung seines eigenen Kampfflugzeuges und Bedienung der Missionsausrüstung, soll die Führung der UCAVs den Piloten nur minimal zusätzlich belasten. Ansonsten besteht die Gefahr in kritischen und arbeitsintensiven Missionsphasen in eine Überforderungssituation zu laufen (vgl. Abschnitt 2.3.3).

Heutige im operationellen Betrieb befindliche unbemannte Systeme benötigen mindestens einen Bediener, um eine einzige unbemannte Plattform unter akzeptabler Belastung zu führen (siehe Abschnitt 2.1.1). Um das hochgegriffene Ziel der luftgestützten Führung von mehreren UCAVs aus einem einsitzigen Kampfflugzeug zu realisieren, müssen sehr hohe Automationsgrade der technischen Systeme zur UCAV-Führung untersucht werden. Vorstellbar ist, den Automationsgrad so hoch zu wählen, dass der Pilot mit der eigentlichen UCAV-Plattformführung, wie beispielsweise über Autopilotenkommandos, nicht mehr unmittelbar involviert ist, sondern ausschließlich für das übergeordnete Missionsmanagement in Verantwortung steht. Dies setzt allerdings voraus, dass neben dem Piloten auch auf Seiten der Automationsfunktionen der unbemannten Systeme ein ausreichendes Situationsverständnis sowie notwendige Fähigkeiten vorliegen, um übertragene Teilaufgaben einer Mission eigenständig, zuverlässig und sinnvoll ausführen zu können.

Durch die hohe Automatisierung der unbemannten Systeme stellt sich die Frage, wie eine grundsätzliche Aufgabenteilung zwischen Mensch und Maschine vorgenommen werden kann. Dies muss sowohl eine effiziente Zusammenarbeit als auch verantwortungsvolles Handeln des Piloten im Rahmen gemeinschaftlicher Aktivitäten ermöglichen.

Zusammenfassend lässt sich für diese Arbeit daher folgende Forschungsfragestellung ableiten:

Wie muss ein hochautomatisiertes Mensch-Maschine-System gestaltet werden, damit ein Pilot neben der Führung seines eigenen Kampfflugzeuges auch eine luftgestützte Führung von mehreren UCAVs in einem dynamischen Missionsumfeld bewältigen kann?

Das Ziel dieser Arbeit ist es, ein System zur Führung von mehreren UCAVs aus einem einsitzigen Kampfflugzeug abzuleiten und wissenschaftlich zu untersuchen. Der Schwerpunkt ist hierbei nicht die Entwicklung von einzelnen Systemfunktionalitäten, sondern vielmehr steht die Betrachtung des Zusammenwirkens von Mensch und Maschine im Vordergrund.

1.3 Aufbau der Arbeit

Im Rahmen dieser Arbeit wird eine mögliche, zukünftige Option zur Zusammenarbeit zwischen bemannten und unbemannten Kampfflugzeugen aufgegriffen und im Missionskontext einer Luft-Boden-Angriffsmission untersucht. Die Reihenfolge der einzelnen dargelegten Kapitel entspricht dabei der systematischen Vorgehensweise der Entwicklung des Gesamtsystems sowie der anschließenden experimentellen Evaluierung.

Kapitel 2 beinhaltet die notwendigen Grundlagen, die das vorliegende Problem eingehender beleuchten. Zunächst wird die Führungsproblematik von unbemannten Luftfahrzeugen mit heute verfügbaren Systemen aufgezeigt. Im Anschluss daran erfolgt die Analyse wesentlicher Studien, die im näheren Forschungsumfeld dieser Arbeit angesiedelt sind, bevor eine allgemeine Diskussion der limitierenden Faktoren in Mensch-Maschine-Systemen hinsichtlich der Führung von Luftfahrzeugen stattfindet. Lösungsansätze, um die dabei identifizierten Probleme bei weiterer Erhöhung der Leistungsfähigkeit des Gesamtsystems weitgehend zu vermeiden, liefert die Theorie der kognitiven Automation [Onken & Schulte, 2010], die zu Ende dieses Kapitels näher betrachtet wird.

Kapitel 3 beschäftigt sich mit der Konzeptionierung eines Arbeitssystems. Anfänglich wird durch die Analogie zu konventionellen Teamstrukturen ein allgemeines Arbeitssystem unter Einsatz von kognitiver Automation erarbeitet. Das daraus resultierende Problemfeld der Mensch-Maschine-Kooperation wird im Anschluss eingehender betrachtet. Die kooperative Teamkoordination nimmt dabei einen zentralen Stellenwert für diese Arbeit ein. Hieraus folgt die Erweiterung des Arbeitssystems um ein lokales Assistenzsystem, dem Teamkoordinationsmodul. Bestandteil der Arbeit ist die Konzeptionierung dieses Moduls samt Assistenzfunktionalitäten. Der letzte Teil beinhaltet den Entwurf einer Mensch-Maschine-Schnittstelle zur Multi-UCAV Führung aus einem bemannten Kampfflugzeug.

Kapitel 4 beschreibt die Implementierung des erarbeiteten Konzeptansatzes in eine Simulationsumgebung zur experimentellen Evaluierung. Zu Beginn wird die technische Umsetzung des Kampfflugzugsimulators zur Abbildung der bemannten Komponente dargelegt. Im Anschluss daran findet die Erläuterung der Realisierung der unbemannten Teammitglieder mittels kognitiver Automation statt. Zu Ende des Kapitels wird die Implementierung des lokalen Assistenzsystems zur Unterstützung der Mensch-Maschine-Kooperation sowie die aus systemtechnischer Sicht dazugehörige Mensch-Maschine-Schnittstelle für das bemannte Kampfflugzeug zur Führung mehrerer UCAVs aufgezeigt.

Kapitel 5 erläutert die experimentelle Evaluierung des erarbeiteten Konzeptansatzes anhand von Mensch-Maschine-Versuchen. Zunächst wird der Versuchsplan dargelegt, der den Aufbau der methodologischen Untersuchung beinhaltet. Darauf basierend werden die Durchführung der Experimente beschrieben und die erfassten Ergebnisse aufgezeigt. Zu Ende dieses Kapitels erfolgt eine Diskussion der gewonnenen Erkenntnisse.

Kapitel 6 fasst die wesentlichen Teile der Arbeit zusammen und liefert einen Ausblick auf mögliche Anknüpfungspunkte für nachfolgende Forschungsaktivitäten im Umfeld der kooperativen Multi-UCAV Führung.

2 Grundlagen

Dieses Kapitel befasst sich mit der schrittweisen Heranführung an die in dieser Arbeit betrachtete Problemstellung. Hierzu wird zunächst im Abschnitt 2.1 das Thema Führung von unbemannten Luftfahrzeugen unter Einsatz von am Markt verfügbaren Automationstechnologien behandelt. Im Anschluss daran werden im Abschnitt 2.2 verschiedene für diese Arbeit relevante Forschungsstudien aufgezeigt und hinsichtlich Konzept und technischer Umsetzung betrachtet. Der Abschnitt 2.3 verfolgt das Ziel, die beteiligten Komponenten eines Mensch-Maschine-Systems hinsichtlich deren Eigenschaften, Fähigkeiten und der zu erwartenden Probleme bei der Führung mehrerer unbemannter Systeme zu analysieren. Einen Lösungsansatz, um die identifizierten Probleme weitgehend zu umgehen, liefert die Theorie der *kognitiven Automation* [Onken & Schulte, 2010]. Die Grundlagen dazu werden im Abschnitt 2.4 behandelt.

2.1 Führung unbemannter Luftfahrzeuge

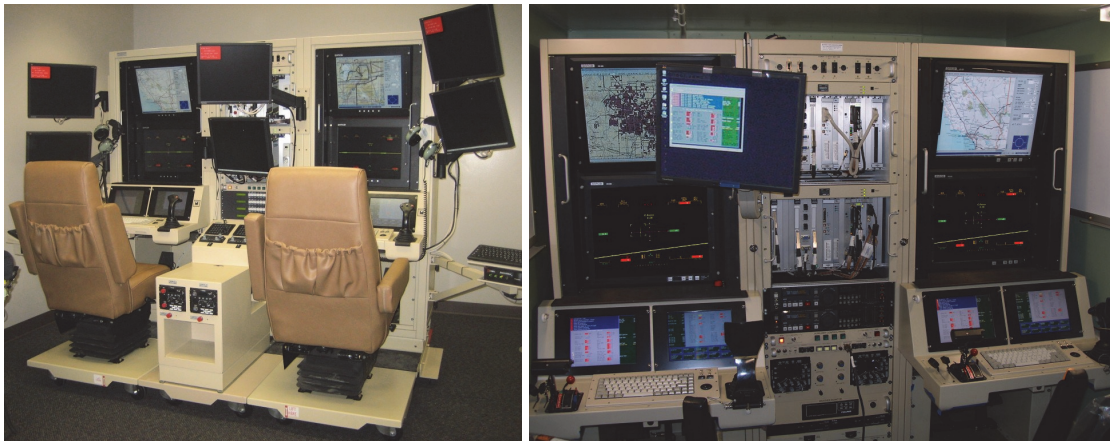
Der nachfolgende Abschnitt befasst sich schwerpunktmäßig mit der Führung unbemannter, am Markt verfügbarer Luftfahrzeuge. Zu Beginn wird im Abschnitt 2.1.1 der Stand der Technik aufgezeigt. In diesem Zusammenhang werden die zukünftigen operationellen Anforderungen seitens potentieller Nutzer dargelegt. Bevor eine Betrachtung der verschiedenen Automationstechnologien mit den damit verbundenen Eingriffsebenen zur Führung der unbemannten Systeme im Abschnitt 2.1.3 angestellt wird, erfolgt im Abschnitt 2.1.2 ein kurzer Exkurs, um den Begriff „Automation“ näher zu erläutern. Der letzte Abschnitt diskutiert unterschiedliche Ansätze, um den Anteil an Automation in einem Multi-UCAV-Führungssystem zu erhöhen, mit dem Ziel den Arbeitsaufwand der Operateure bei der Bedienung zu reduzieren (siehe Abschnitt 2.1.4).

2.1.1 Stand der Technik und zukünftige Anforderungen

Die Führung von unbemannten Luftfahrzeugen erfolgt in heute verfügbaren Systemen meist durch mehrere Bediener [Draper & Ruff, 2000][Dixon, Wickens & Chang, 2004] [Franke, Zaychik, Spura & Alves, 2005] in einer bodengebundenen und örtlich zu der luftseitigen Plattform getrennten Bodenkontrollstation (siehe Abbildung 2). Beispielsweise zählen das von der U.S. Air Force im Einsatz befindliche System *MQ-1 Predator* und *Reaper MQ-9* oder das von der Deutschen Luftwaffe genutzte System *Heron I* und *KZO* dazu. Die Stärke der Bedienmannschaft hängt stark vom betrachteten UAS ab. Die meisten verfügbaren Systeme benötigen mindestens zwei Bediener. Betrachtet man die im operationellen Einsatz befindlichen Systeme (siehe z.B. [Wohlers & Blohm, 2007] [Chappelle, McDonald & McMillan, 2011][Hazlebeck, 2011][Heron System, 2012]) etwas genauer, so lassen sich drei Typen von Bedienern identifizieren, welche unterschiedliche Rollen einnehmen:

- Der *Air Vehicle Operator (AVO)* ist für die Flugführung der unbemannten Plattform verantwortlich. Dazu zählen alle typischen fliegerischen Tätigkeiten (vgl. [Abbott, 1993]), wie die Steuerung der Bewegungen der Plattform, Navigation sowie die Bedienung der einzelnen Subsysteme. Dieser kann auch für die Kommunikation mit Führungsstellen oder weiteren Kräften zuständig sein.
- Der *Mission Payload Operator (MPO)* ist für die Führung der Nutzlast zuständig. Sein Aufgabenbereich umfasst die Bedienung der Sensorik und Waffensysteme sowie die Auswertung von Sensorinformationen.
- Der *Mission Commander (MC)* hat die Koordination der einzelnen Missionsaufgaben mit anderen Kräften sowie übergeordneten Kommandostellen inne. Der MC ist in den meisten Systemen optional und kommt in Missionen, in denen intensive Kommunikations- und Koordinationstätigkeiten mit dritten Parteien zu erwarten sind, zum Einsatz.

Die Aufteilung der Bedienmannschaft kann gemäß den beschriebenen drei Rollen erfolgen. Alternativ kann ein Bediener auch mehreren Rollen oder eine Rolle mehreren Bedienern zugewiesen sein. Im Falle des UAS *Aladin* der Firma EMT [EMT, 2009] ist ein einziger Bediener für alle drei Rollen zuständig. Allerdings handelt es sich hierbei um ein kleineres System mit geringer Einsatzdauer. Ermöglicht wird diese Bedienerreduzierung, indem der Flugweg vorab geplant und der Einsatzzweck auf reine Aufklärungstätigkeiten limitiert wird.



*Abbildung 2: Bodenkontrollstation zur Führung einer unbemannten Plattform
[General Atomics Aeronautical, 2014]*

Zur Klassifizierung von unbemannten Systemen hinsichtlich des Bedarfs an Bedienern wird oftmals die *Führungsspanne* herangezogen. Diese beschreibt das Verhältnis von im Einsatz befindlichen Plattformen zu der Anzahl der notwendigen Bediener, die ausschließlich für die Führung benötigt werden. Personal für Wartung oder Instandsetzung gehen nicht in die Führungsspanne mit ein. Für die zuvor exemplarisch angesprochenen unbemannten Systeme ergibt sich somit eine Führungsspanne von maximal eins (*Aladin*) und kleiner (siehe Abbildung 3).

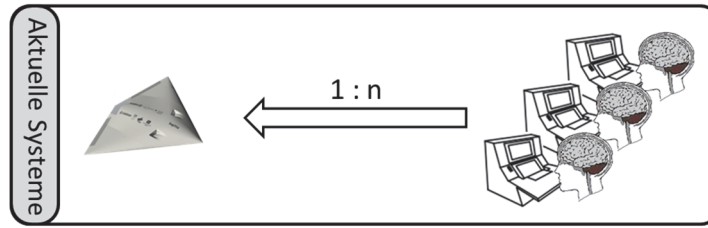


Abbildung 3: Führungsspanne heutiger im Einsatz befindlicher Systeme

Von zukünftigen Systemen wird im Hinblick auf die Erhöhung der Effektivität sowie der Reduzierung der operationellen Kosten gefordert, die Führungsspanne zu vergrößern bzw. zu invertieren [Dixon et al., 2004][Franke et al., 2005][U.S. Department of Defense, 2011]. Das bedeutet, die Anzahl der Bediener soll im Verhältnis zu der Anzahl der zu führenden Plattformen kleiner werden. Neben dieser generellen Forderung der sukzessiven Erhöhung der Führungsspanne zeichnet sich ein weiterer Trend ab. Hierbei soll die Führung von UAVs nicht ausschließlich über eine ortsgebundene Bodenkontrollstation erfolgen, sondern auch aus mobilen Plattformen ermöglicht werden (siehe z.B. [U.S. Department of Defense, 2011]). Ziel ist es eine maximale Flexibilität in der Führung und dem Einsatz der unbemannten Plattformen zu erreichen. Durch die Führung vor Ort können auch Probleme mit limitierten Reichweiten und Bandbreitenkapazitäten der Datenlinks vermieden werden. Darüber hinaus kann der Zugriff auf Sensorinformationen unmittelbar dort erfolgen, wo diese benötigt werden. In herkömmlichen Systemen können benötigte Informationen meist nur durch explizite Anfragen an der BKS oder einer übergeordneten Kommandostelle beschafft werden.

Im Zusammenhang mit der Führung eines unbemannten Luftfahrzeuges bzw. dessen Nutzlast durch verschiedene aber zusammenarbeitende militärische Truppenteile, wie z.B. bemannter Luftfahrzeuge, wird oftmals von Interoperabilitätsgraden (*Level of Interoperability, LOI*) gesprochen. Dieser ist in der STANAG (*Standardization Agreement*) 4586 [NATO Standardization Agency, 2012] festgelegt und definiert, bis zu welchem Grad die Nutzlast eines UAVs beziehungsweise die Plattform selbst von den jeweiligen Truppenteilen gesteuert werden können. Die Einteilung des Interoperabilitätsgrades findet in fünf Stufen statt (siehe Tabelle 1).

LOI	Description
1	Indirect receipt and/or transmission of sensor product and associated metadata from the UAV.
2	Direct receipt of sensor product data and associated metadata from the UAV.
3	Control and monitoring of the UAV payload unless specified as monitor only.
4	Control and monitoring of the UAV, unless specified as monitor only, less launch and recovery.
5	Control and monitoring of UAV launch and recovery unless specified as monitor only.

Tabelle 1: Level of Interoperability gemäß STANAG 4586 (Edition 3)
[NATO Standardization Agency, 2012]

Bei einem LOI von eins kann eine Kontrollstation keine Nutzdaten von einer spezifischen unbemannten Plattform auf direktem Weg empfangen. Nutzdaten sind beispielsweise Bildaufnahmen von einer Aufklärungskamera. Diese Daten können gemäß LOI 1 ausschließlich indirekt, also über eine andere Kontrollstation, bezogen werden. Der nächsthöhere LOI sieht bereits den direkten Empfang von Nutzdaten ohne weitere involvierte Kontrollstation vor. Ab LOI 3 kann neben dem Empfang von Nutzdaten auch die Nutzlast (*Payload*) bedient werden. So kann z.B. die Blickrichtung oder der Zoomfaktor einer Aufklärungskamera verändert werden, obwohl die eigentliche Führung der Plattform eine andere Kontrollstation innehat. Ab LOI 4 fällt die Zuständigkeit zur Führung der Plattform in den Aufgabenbereich der Belegschaft der Kontrollstation. Der Grad der Führung wird hierbei in zwei Stufen geteilt. In der niedrigeren Stufe (LOI 4) kann die Plattform im vollen Umfang geführt werden, jedoch nicht in der Start- und Landephase. Diese ist erst im LOI 5 vorgesehen.

Aus den bereits aufgezeigten Nutzeranforderungen an zukünftige unbemannte Systeme (Erhöhung der Führungsspanne und Verfügbarkeit mobiler Kontrollstationen) lassen sich verschiedene Optionen zur Führung einer unbemannten Plattform auf einem LOI 4/5 ableiten. In Abbildung 4 sind diese im Hinblick auf die Führung von mehreren unbemannten Kampfflugzeugen durch einen Bediener aufgezeigt. Eine vorstellbare Option stellt die konventionelle Variante über eine stationäre Bodenkontrollstation dar. Um auch die zweite Anforderung zu berücksichtigen, wäre es vorstellbar, die Kontrollstation in einer mobilen Ausprägung zu gestalten. Diese könnte als portable Missionsausrüstung in ein Fahrzeug oder in ein Luftfahrzeug integriert werden. Für die Führung der unbemannten Plattform über eine portable Kontrollstation ist ein zusätzliches Besatzungsmitglied erforderlich. Eine weitere mögliche Option bildet die Integration eines Multi-UCAV-Führungssystems als festen Bestandteil in eine mobile bemannte Plattform, wie beispielsweise in ein Kampfflugzeug oder in einen Hubschrauber. In diesem Fall ist die Standardbesatzung der fliegenden Plattform für die Führung der UCAVs verantwortlich.

Wie im Abschnitt 1.2 bereits erläutert, ist es Inhalt dieser Arbeit die Führung von mehreren UCAVs aus einem einsitzigen Kampfflugzeug wissenschaftlich zu untersuchen. Dieses Forschungsvorhaben entspricht der letzten der oben angeführten möglichen Führungsoptionen.

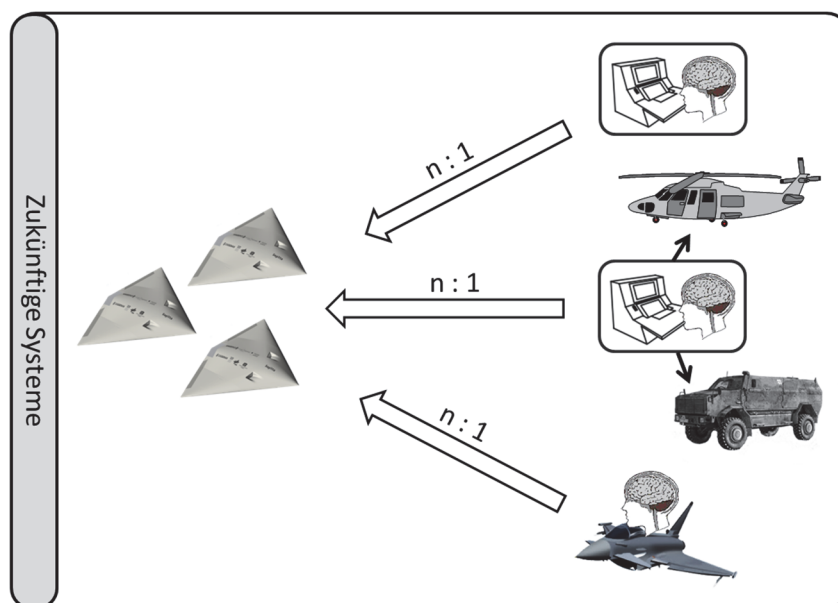


Abbildung 4: Mögliche Optionen zur Führung zukünftiger Systeme

Damit zukünftige unbemannte Systeme diese Anforderungen erfüllen können, muss der Arbeitsaufwand zur Führung gegenüber heutigen Systemen (Führungsspanne maximal 1) deutlich minimiert werden. Ansonsten wird ein einzelner Bediener kaum in der Lage sein, mehrere unbemannte Systeme inklusive der Nutzlast unter einer akzeptablen Arbeitsbelastung zu führen. Damit ist die Einführung hoher Interoperabilitätsgrade eine Herausforderung für das Design von Automation und damit des entsprechenden Mensch-Maschine-Systems.

2.1.2 Automation

Unter *Automation* wird im allgemeinen Sprachgebrauch eine technische Apparatur bezeichnet, die bestimmte wiederkehrende Handlungsabläufe eigenständig ausführen kann. Da der Begriff Automation in dieser Arbeit einen zentralen Stellenwert einnimmt, wird dieser hier zunächst allgemein betrachtet.

Nach [Parasuraman & Riley, 1997] kann Automation folgendermaßen definiert werden:

„[...] as the execution by a machine agent (usually a computer) of a function that was previously carried out by a human.“

Eine Automation bildet sozusagen eine technische Einrichtung, die bestimmte Funktionen ausführen kann, die ursprünglich von Menschen ausgeführt wurden. Die Gründe zur Übertragung der Funktionen können vielseitige Ursachen haben. Oftmals sind wirtschaftliche oder sicherheitsrelevante Aspekte oder auch die technische Machbarkeit ausschlaggebend. Demgemäß könnten prinzipiell alle technischen Errungenschaften als Automation aufgefasst werden. Sobald die Übergabe einer Funktion vom Menschen an eine technische Einrichtung vollständig vollzogen wurde und als endgültig und permanent angesehen werden kann, wird im Allgemeinen das zugehörige technische System als *Maschine* bezeichnet. Das bedeutet, dass die begriffliche Bezeichnung eines technischen Systems dem Wandel der Zeit unterliegt. So zählt in heutiger Zeit eine Dampfmaschine eindeutig unter die Kategorie Maschine, während es sich im 18. Jahrhundert um Automation handelte. Diese begriffliche Unterscheidung wird allerdings oftmals nur sehr unscharf gehandhabt.

Im Bereich von Luftfahrzeugen dient Automation im Allgemeinen der Unterstützung sowie der Komplementierung von Fähigkeiten der menschlichen Bediener, um Aufgaben zu bearbeiten, die zum Teil sehr schwierig oder unmöglich ohne Automation durchzuführen wären.

„Aircraft automation was invented to complement and assist human operators in carrying out tasks that were difficult or even impossible without machine assistance.“ [Billings, 1997]

Bezogen auf die Führung von unbemannten Luftfahrzeugen zählen das Flight Management System oder auch der Autopilot heutzutage zu typischen Vertretern der Automation. Eine sehr fundamentale Eigenschaft dieser Systeme stellt die konsequente Verfolgung der Durchführung einer zugewiesenen Aufgabe dar, ohne Rücksicht auf vorliegende Umweltbedingungen sowie Sinnhaftigkeit zu nehmen (vgl. Abschnitt 2.3.4). Der Bediener ist für die korrekte Aufgabenzuweisung und gegebenenfalls für die Durchführung notwendiger Modifikationen verantwortlich. Die Automation kann aus eigener Initiative heraus nicht feststellen, ob die zugewiesene Aufgabe im kommandierten Ausmaß sinnvoll ist oder sogar ein Sicherheitsrisiko darstellt [Onken & Schulte, 2010].

2.1.3 Eingriffsebenen der Flugführung

In der bemannten Luftfahrt haben sich über die Jahre hinweg durch fortschreitende Automationstechnologien verschiedene, grundlegende Eingriffsebenen zur Führung eines Luftfahrzeuges [Brockhaus, Alles & Luckner, 2011] herausgebildet. Diese Ebenen, welche durchaus auch in herkömmlichen unbemannten Luftfahrzeugen anzutreffen sind, werden in diesem Abschnitt herangezogen, um prinzipielle Eingriffsmöglichkeiten zur Führung einer unbemannten Plattform und die damit in Verbindung stehenden Automationssysteme aufzuzeigen.

In Abbildung 5 sind die verschiedenen Ebenen veranschaulicht. Bei dieser Abbildung handelt es sich um eine Weiterentwicklung der Automationshierarchie von bemannten Flugzeugen nach [Onken & Schulte, 2010][Brockhaus et al., 2011]. Anzumerken ist an dieser Stelle, dass es sich hierbei um eine rein schematische Darstellung handelt. Nicht jede Ebene muss in einem realen System dementsprechend ausgeführt sein. Darüber hinaus wird ausschließlich die Führung der Plattform betrachtet. Tätigkeiten, wie Umwelterfassung oder Durchführung von Missionsaufgaben, sind in dieser Betrachtung nicht enthalten.

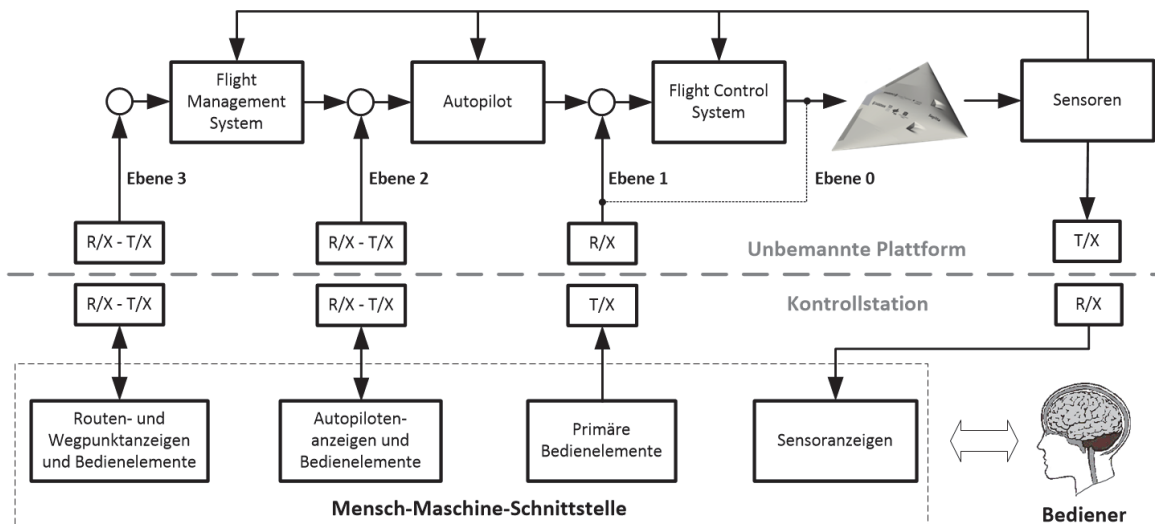


Abbildung 5: Eingriffsebenen zur Flugführung am Beispiel einer mit konventioneller Automation ausgestatteten unbemannten Plattform

Die niedrigste Eingriffsebene (Ebene 0) bildet die manuelle Steuerung durch direkte Steuereingaben an die unbemannte Plattform über primäre Bedienelemente wie Schubhebel oder Steuerknüppel. Die Übertragung der Steuersignale erfolgt dabei über ein Kommunikationssystem, welches in der Abbildung 5 durch die Blöcke *T/X* (*Transmit*) und *R/X* (*Receive*) angedeutet ist. Die Eingaben werden empfangsseitig unmittelbar zur Ansteuerung der Aktuatoren des Steuerungssystems verwendet. Über Sensoren werden wesentliche Flugparameter erfasst und dem Bediener über das Kommunikationssystem, beispielsweise Anzeigen auf Bildschirmen, zugänglich gemacht. Basierend auf diesen Informationen, kann der Bediener seine Steuereingaben adaptieren. Die Eingabe- und Ausgabeelemente zur *Wechselwirkung* (*Interaktion*) mit dem technischen System werden zusammenfassend als *Mensch-Maschine-Schnittstelle* (*MMS*) bezeichnet.

Die nächst höhere Ebene stellt die Führung über ein Flugsteuerungssystem (*Flight Control System, FCS*) dar (Ebene 1). Hierbei werden die Steuereingaben nicht unmittelbar als Maß für die Ansteuerung der Aktuatoren verwendet, sondern von einem Regelungssystem als

eine kommandierte Fluglage interpretiert. Das heißt, das FCS berechnet mit Hilfe eines in der Automation hinterlegten, flugdynamischen Modells der Plattform das notwendige Maß für die Ansteuerung der Aktuatoren, um die kommandierte Fluglage zu erreichen. Der Vorteil ist eine einfachere Führung der Plattform, da stabilisierende oder kompensatorische Steuereingaben wegfallen.

Die Ebene 2 bildet die Steuerung der Plattform über das Automationssystem „*Autopilot*“ (*AP*) ab. Hierbei erfolgt die Führung des Luftfahrzeuges durch diskrete Vorgaben von Sollwerten, wie Höhe, Geschwindigkeit, Kurs sowie Steig- und Sinkraten. Die eigentliche Steuerung der Plattform ist Aufgabe des Autopiloten. Kommandiert beispielsweise der Bediener eine neue Flughöhe an den Autopiloten, dann nimmt dieser die Höhenadaptation sowie die Einhaltung sämtlicher Korrekturmaßnahmen, um Umwelteinflüsse wie Wind auszugleichen, eigenständig vor.

Das *Flight Management System (FMS)* unterstützt die Führung anhand von Wegpunkten und Routenplanungsfunktionalitäten (Ebene 3). Mit Hilfe dieser Automation ist es möglich einen kompletten Flug, also von Start bis zur Landung, in einem Zug an die Plattform zu kommandieren. Die Automation ist in der Lage, die geplante Flugroute samt vorgegebenen Bahnparametern, wie Höhe oder Geschwindigkeit, eigenständig auszuführen. Gelegentliche Eingriffe der Bediener können notwendig werden, um auf unvorhersehbare Situationsänderungen oder Probleme zu reagieren.

Historisch gesehen sind die einzelnen Ebenen nacheinander durch den Anstieg des Automationsgrades im Bereich der Flugführung von bemannten Luftfahrzeugen entstanden. Die einzelnen Automationssysteme bauen daher grundsätzlich in einem hierarchischen Verhältnis aufeinander auf. Eine übergeordnete Ebene nutzt die Automationsfunktionalitäten der untergeordneten Ebene. Das FMS zieht beispielsweise Funktionen des Autopiloten heran, um eine geplante Flugroute abzufliegen.

Betrachtet man die verschiedenen Eingriffsebenen bzw. Automationssysteme in Verbindung mit dem Bediener, dann können zwischen den jeweiligen Ebenen Unterschiede in deren Arbeitsweisen festgehalten werden.

In Ebene 0 sowie Ebene 1 fungiert der Bediener der Plattform als ein kontinuierliches Regelungssystem. Dazu nutzt er die von Sensoren erfassten Informationen, um daraus erforderliche Änderungen zum Erreichen eines gewünschten Flugverhaltens abzuleiten. Die ermittelten Änderungen werden durch Eingaben über entsprechende Bedienelemente erzielt. In den ersten beiden Ebenen ist ein kontinuierlicher Eingriff des Bedieners notwendig [Onken & Schulte, 2010], weshalb der Arbeitsaufwand als relativ hoch angesehen werden kann. Im Hinblick auf die parallele Führung von mehreren Plattformen sind aufgrund der physischen Limitationen des Menschen Grenzen gesetzt. Daher werden diese Ebenen nicht weiter in dieser Arbeit betrachtet.

In den nachfolgenden Eingriffsebenen erfolgt die Führung auf einem abstrakteren Niveau. Hierbei gibt der Bediener über Eingabelemente diskrete Führungsparameter der Automation (Computer) vor und erhält von dieser über Anzeigen ein Feedback über den zugrunde liegenden Kontrollprozess anhand repräsentativer Größen (siehe Abbildung 6). Der Kontrollprozess wird ausschließlich von der Automation gesteuert und geregelt. Diese Art der Führung wird nach [Sheridan & Verplank, 1978][Sheridan, 1992] als *supervisory control* (leitende Kontrolle) bezeichnet.

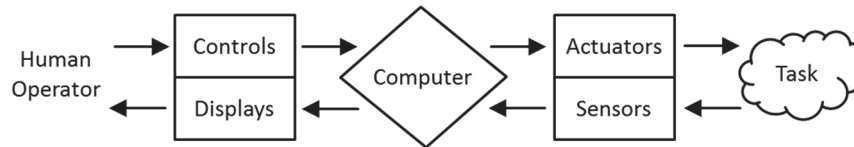


Abbildung 6: Supervisory Control [Sheridan, 1992]

Zusammenfassend kann festgehalten werden, dass die Tätigkeiten des Bedieners ausgehend von einer arbeitsintensiven manuellen kontinuierlichen Steuerung der Plattform mit steigendem Automationsgrad in eine immer mehr leitende Kontrolle mit geringerer physischer Arbeitsbelastung im Sinne der kontinuierlichen Steuerung und Regelung übergeht.

2.1.4 Erhöhung des Automations- und Abstraktionsgrades

Zur Führung von unbemannten Luftfahrzeugen sind am Markt Automationstechnologien verfügbar, welche die Realisierung einer Führungsspanne von maximal 1 (tendenziell niedriger) ermöglichen (vgl. Abschnitt 2.1.1). Im Allgemeinen handelt es sich dabei um FMS-basierte Führungssysteme. Im Hinblick auf die Führung mehrerer unbemannter Systeme durch einen einzigen Bediener muss daher die Arbeitsbelastung im Vergleich zu herkömmlichen Systemen deutlich reduziert werden, um den Bediener im operativen Betrieb nicht zu überfordern. Bezogen auf Abbildung 5 kann eine Reduzierung durch das Hinzufügen weiterer Automationssysteme in die einzelnen Eingriffsebenen oder über eine zusätzliche abstraktere Führungsebene erzielt werden.

[Dixon et al., 2004][Dixon, Wickens & Chang, 2005] haben in verschiedenen Studien die Führung von einem und mehreren UAVs durch einen Bediener unter Einsatz von zusätzlicher Automation experimentell untersucht. Hierbei wurde zusätzliche Automation zur Überwachung der Systemzustände der Plattformen eingesetzt. Diese Automation war in der Lage, den Bediener über eine auditive Meldung auf Systemfehler hinzuweisen. Somit entfiel die aktive und ständige visuelle Systemüberwachung durch den Bediener. Die experimentell ermittelten Ergebnisse zeigten, dass durch Hinzufügen weiterer Automation sich durchaus die Arbeitsbelastung eines Bedieners verringern lässt. Eine weitere sehr interessante Erkenntnis aus diesen Studien stellt der Einfluss der Zuverlässigkeit der Automation auf die Leistung dar. Eine unzuverlässige Automation führt im Allgemeinen zu einer Verschlechterung der Leistung des Mensch-Maschine-Systems im Vergleich zu einem System ohne diese Automation [Dixon et al., 2004]. Zu einer ähnlichen Beobachtung kamen auch [Ruff, Calhoun, Draper, Fontejon & Guilfoos, 2004].

[Cummings, Bruni, Mercier & Mitchell, 2007] haben die Einbringung einer zusätzlichen abstrakteren Ebene in die Führungsarchitektur vorgeschlagen, um eine Erhöhung der Führungsspanne zu erreichen. In Abbildung 7 ist die zugrunde liegende Architektur dargestellt. Die ersten beiden Ebenen (Flight Controls und Autopilot) entsprechen dabei grundlegend den zuvor beschriebenen Ebenen 1 bzw. 2. Die dritte Ebene, das Flugmanagement, wurde hingegen um Fähigkeiten wie Hindernisvermeidung erweitert und von [Cummings et al., 2007] unter dem pauschal gehaltenen Begriff Navigation zusammengefasst. Die zusätzlich hinzugefügte Ebene bildet das Missions- und Nutzlastmanagement (*Mission and Payload Management*). Hierbei wird neben der Führung der Plattform auch die Nutzlastführung berücksichtigt. Verfügbare Sensorinformationen werden herangezogen, um missionsrelevante Entscheidungen zur Führung der Plattform treffen zu können.

Nach [Cummings et al., 2007] handelt es sich hierbei um Aufgaben, welche grundsätzlich nicht von konventioneller Automation ausgeführt werden können:

„In this loop, decisions require knowledge-based reasoning that includes judgment, experience, and abstract reasoning that in general cannot be performed by automation.“

Diese Architektur berücksichtigt auch explizit die Überwachung der Automationssysteme (*System Health & Status Monitoring*), welche die eigentlichen Teilaufgaben ausführen. Diese Tätigkeit kann nach [Cummings et al., 2007] durch den Bediener, durch ein weiteres Automationssystem oder durch beide erfolgen.

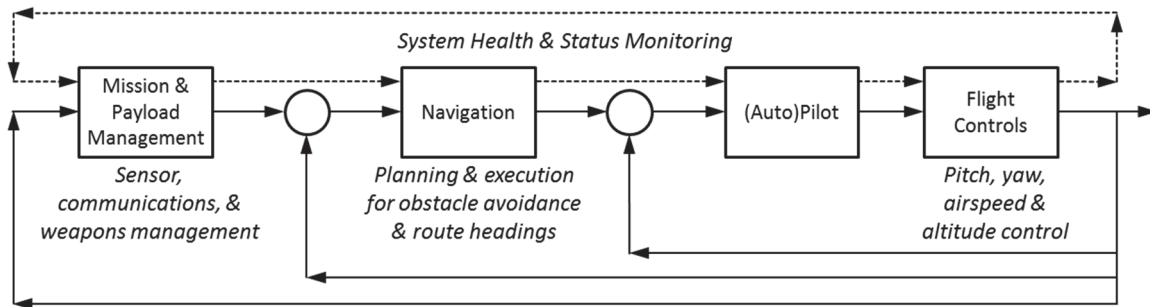


Abbildung 7: Hierarchische Führungsarchitektur für ein unbemanntes Luftfahrzeug [Cummings et al., 2007]

Ebenfalls wird in [Cummings et al., 2007] ein weiterführendes Konzept zur zentralen Führung mehrerer UAVs aufgezeigt. Dies beruht auf der Annahme, dass die niedrigsten drei Ebenen nach Abbildung 7 im vollen Umfang automatisiert werden können, also zuverlässig und eigenständig ohne Zutun des Bedieners ablaufen. Somit ist der einzelne Bediener ausschließlich für das übergeordnete Missions- und Nutzlastmanagement der unterstellten UAVs verantwortlich.

In [Cummings, 2015] wurde diese Architektur hinsichtlich eines dezentralen Führungsansatzes erweitert, was eine weitere Abstrahierung der Führungsebene zur Folge hat. Hierbei führt der Bediener über ein übergeordnetes Missions- und Nutzlastmanagementsystem eine Gruppe von UAVs. Der Bediener gibt ein abstrakt formuliertes Teilziel eines übergeordneten Ziels der Gruppe vor. Die Zuteilung der einzelnen Teilaufgaben zur Erfüllung des Teilziels erfolgt innerhalb der UAV-Gruppe. Ein vergleichbarer Ansatz wurde bereits einige Jahre zuvor am Institut für Flugsysteme (vormals Systemdynamik und Flugmechanik) der Universität der Bundeswehr München von [Meitinger, 2008] in umfangreichen Simulationsversuchen erfolgreich untersucht (vgl. Abschnitt 2.4.5.5).

Die Erhöhung des Automationsgrades in einem Mensch-Maschine-System und die damit erhoffte Reduzierung der Arbeitsbelastung der Bediener kann allerdings auch aus dem *Human Factors* Bereich bekannte negative Effekte hervorrufen, wie eine irrtümliche Erhöhung der mentalen Beanspruchung (*mental workload*), Verlust des Situationsbewusstseins (*loss of situational awareness*), Nachlässigkeit (*complacency*) in Überwachungsaufgaben oder Fähigkeitsverluste (*skill degradation*) [Parasuraman, Sheridan & Wickens, 2000]. Mit dieser Thematik setzt sich diese Arbeit detaillierter im Abschnitt 2.3 auseinander.

2.2 Forschungsumfeld

Inhalt dieses Abschnittes ist die Betrachtung relevanter Forschungsarbeiten aus dem Umfeld der luftgestützten Führung und/oder Führung mehrerer unbemannter Systeme. Der Fokus liegt dabei auf den gewählten Lösungsansätzen samt technischer Realisierung. Im Nachfolgenden werden ausschließlich institutsfremde Arbeiten aufgezeigt. Relevante Arbeiten aus den „eigenen Reihen“ werden zu Ende des Kapitels 2 vorgestellt.

2.2.1 UCAR und J-UCAS

Im Auftrag der *Defense Advanced Research Projects Agency (DARPA)* wurde im Programm *Unmanned Combat Armed Rotorcraft (UCAR)* [Jameson & Franke, 2005] zusammen mit der U.S. Army die Führung von mehreren sich selbst koordinierenden UAVs aus einem Zwei-Mann-Hubschrauber untersucht. Ergebnisse zu dieser Studie sind kaum veröffentlicht. Das Programm wurde darüber hinaus vorzeitig auf Grund Umlagerung finanzieller Mittel auf andere Themen beendet. Als Gegenstück dazu wurde auch das Programm *Joint Unmanned Combat Air Systems (J-UCAS)* [Wise, 2003] von der DARPA zusammen mit der U.S. Air Force sowie U.S. Navy durchgeführt. In diesem Programm sollte einUCAV mit Fähigkeiten entwickelt werden, um beispielsweise eigenständig die Bekämpfung von feindlichen Luftabwehrstellungen durchführen zu können. Für die Führung wurde eine modulare, mobile Kontrollstation vorgesehen. Variable Automationsgrade wurden als Führungsparadigma angedacht. Teil dieses Programmes war es auch, eine Zusammenarbeit mit bemannten Systemen zu ermöglichen. Genauere Informationen über verfolgte Konzepte bzw. Details zur technischen Realisierung hinsichtlich der MultiUCAV Führung oder der beabsichtigten bemannt-unbemannten Zusammenarbeit konnten nicht aufgefunden werden. Dieses Programm wurde ebenfalls wie das UCAR-Programm frühzeitig aufgrund Umlagerung finanzieller Mittel beendet.

2.2.2 AMUST/HSKT

Eine relevante, veröffentlichte Forschungsstudie aus dem Bereich der Hubschrauber Domäne zum Thema luftgestützte Führung stellt das Programm *Airborne Manned/Unmanned System Technology (AMUST)* dar. Hierbei wurde die Führung auf einem LOI 4 (vgl. Abschnitt 2.1.1) eines RQ-5B Hunter UAVs aus einem Zwei-Mann-Cockpit eines Apache (AH-64D) untersucht [U.S. Department of Defense, 2011]. Nach einem erfolgreichen Abschluss [Moreland, Ennis, Yeates & Condon, 2007] wurde aufbauend auf dieser Studie das *AMUST-Demonstration (AMUST-D)* sowie das *Hunter Standoff Killer Team (HSKT)* Programm durchgeführt. Dabei stand die Abbildung eines verbesserten und gemeinsamen Situationsbewusstseins in einem heterogenen Team im Mittelpunkt. Das Team bestand aus einem Hunter UAV, dem Führungshubschrauber (UH-60 Blackhawk), ausgestattet mit einem *A2C2S (Army Airborne Command and Control System)*, sowie einem Kampfhubschrauber (AH-64D) [Farrell, Jameson & Stoneking, 2003][Gerken, Jameson, Sidharta & Barton, 2003]. Bei dem A2C2S handelte es sich um eine mobile Einsatzzentrale mit fünf Operateur-Arbeitsplätzen.

In Abbildung 8 ist der entwickelte Architekturansatz dargestellt. Um ein einheitliches und verbessertes Situationsbewusstsein zu erzielen, werden in dieser Architektur die Besatzungen der bemannten Plattformen durch Assistenzsysteme unterstützt. Das *Warfighter's Associate (WA)* ist für die Unterstützung der Besatzung des AH-64D Apache Hubschraubers und das *Mobile Commander's Associate (MCA)* für die Unterstützung des mobilen Kommandeur-Teams zuständig. Neben der Darstellung eines fusionierten Situationsabbildes, für das alle verfügbaren Sensorinformationen der Teammitglieder sowie Daten aus der *Joint Common Data Base (JCDB)* herangezogen werden, ermöglichen diese Systeme auch die Führung des UAVs samt Nutzlast. Die JCDB entspricht einer Datenbank, die jegliche militärische relevante Information über das Einsatzgebiet beinhaltet. Die Führung des UAVs kann sowohl aus dem AH-64-D als auch dem UH-60 stattfinden. Dabei kommt eine wegpunktbasierte Führungsart zum Einsatz. Des Weiteren unterstützt das WA-Assistenzsystem den Piloten bei Routen- sowie Angriffsplanungen und das MCA den Kommandeur bei Missionsmanagementtätigkeiten, wie der Routenplanung des Teams oder der Planüberwachung [Farrell et al., 2003].

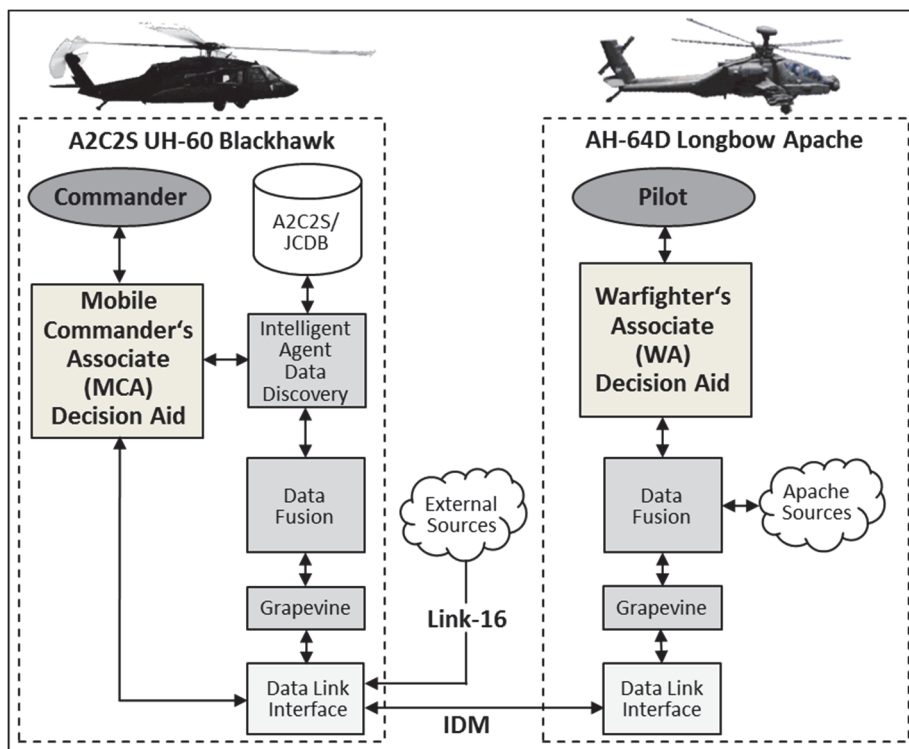


Abbildung 8: Architektur zur Erlangung eines verbesserten und einheitlichen Situationsbewusstseins [Farrell et al., 2003]

In diesen Studien fand die Führung des UAVs wegpunktbasiert in einem *supervisory control* Verhältnis statt. Trotz des niedrigen Abstraktionsgrades der Führung konnte diese aus einem Zwei-Mann-Cockpit mit Unterstützung durch ein Assistenzsystem vorgenommen werden. Diese Studien zeigen auf, dass prinzipiell eine luftgestützte Führung eines UAVs in einer gemeinsamen Mission mit einem einheitlich vorliegenden Situationsabbild entlang aller Teammitglieder möglich ist.

2.2.3 SEC- Software Enabled Control

Das *LIDS (Laboratory for Information and Decision Systems)* des *Massachusetts Institute of Technology (MIT)* untersuchte im Rahmen des Programmes *Software Enabled Control (SEC)* die Kooperation zwischen einem bemannten und unbemannten Luftfahrzeug im Rahmen einer Angriffsmission. [Valenti & Schouwenaars, 2004][Schouwenaars, Valenti, Feron & How, 2005][Schouwenaars, 2006]. Der Auftragsgeber dieser Studie war die DARPA. Zur Realdemonstration des entwickelten Systems kam ein Lockheed T-33 Jettrainer als UAV und eine Boeing F-15E (*Fixed Wing, FW*) zum Einsatz. Die T-33 war dazu mit einem X-45 UCAV-Avionik Paket ausgestattet [Waydo, Hauser, Bailey, Klavins & Murray, 2007]. Ziel dieser Studie war die Demonstration einer bemannt-unbemannten Zusammenarbeit. Dazu konnte das UAV für Aufklärungstätigkeiten herangezogen werden. Für die Bekämpfung war ausschließlich das bemannte Kampfflugzeug zuständig.

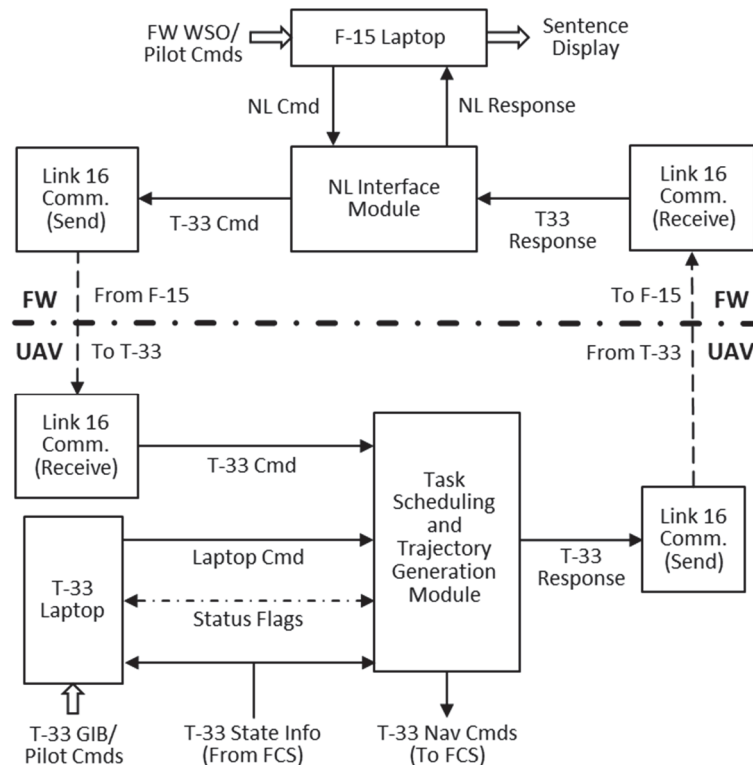


Abbildung 9: Blockdiagramm der MIT SEC Capstone Demonstration [Schouwenaars, 2006]

In Abbildung 9 ist die Architektur des Gesamtsystems dargestellt. Hierbei übt ein Waffensystemoffizier (*WSO*) in der Regel die Führung des UAVs aus. Für diese Tätigkeit stehen im Zwei-Mann-Cockpit ein *Natural Language (NL) Interface Modul* zur Verfügung, über die auf Missionsebene mit dem UAV über Spracheingaben interagiert werden kann. Ein möglicher Dialog kann folgendermaßen aussehen [Schouwenaars, 2006]:

WSO: „Add new mission task. Proceed to location Echo-Charlie 5 in minimum time. Search this region for threats and wait for further instructions after the task is completed.“

UAV: „Roger. Acknowledge task information – proceeding to location Echo-Charlie 5.“

Neben den Zuweisungen von Aufgaben an das UAV kann auch über Sprache ein Status zu dem Missions- sowie Aufgabenstatus abgefragt werden. Dazu ist ein vorgefertigtes Protokoll über mögliche Fragen und Kommandos sowie die damit in Verbindung stehenden Antworten im System hinterlegt. Das NL Interface Modul wandelt auch die natürlich-sprachlichen Kommandos des WSOs in für das UAV verständliche Daten um und umgekehrt. Das *Task Scheduling Modul* nutzt diese Daten, um daraus eine Liste von schrittweise abzuarbeitenden Aufgaben für das UAV abzuleiten. Eine Liste kann beispielsweise folgende Aufgaben beinhalten: „*flying to a waypoint X*“, und „*performing a search pattern*“ [Schouwenaars et al., 2005]. Ein weiteres Modul stellt das *Trajectory Generation Modul* dar, welches für die Planung der Flugtrajektorie in teilweise unbekanntem Operationsgebiet des UAVs zuständig ist.

Die luftgestützte Führung des UAVs erfolgt in dieser Studie in einer typischen *supervisory control* Beziehung über den zweiten Mann, also dem WSO, im Cockpit. Interessant an diesem Führungsansatz ist die ausschließliche Interaktion über eine Sprachschnittstelle. In einfachen Szenarien kann dies durchaus eine Möglichkeit sein, hingegen in komplexeren Missionen oder mit mehreren beteiligten Teammitgliedern ist mit Problemen zu rechnen. Vor allem in zeitkritischen Szenarien, in denen einem WSO mehrere UAVs unterstellt sind. Hierbei müsste der WSO ständig verbal jedes einzelne UAV fragen, wie der Status der zugewiesenen Teilaufgabe ist, um abhängige Teilaufgaben entsprechend koordinieren zu können. Neben einer relativen hohen WSO-Beanspruchung ist es gut vorstellbar, dass dies zur Beeinträchtigung des Situationsbewusstseins führen kann. Ein „externes Gedächtnis“, wie ein Display mit aktuellen Statusinformationen zu den einzelnen Teilaufgaben, bezogen auf das jeweilige UAV, könnte Abhilfe schaffen. Darüber hinaus schränkt das *Task Scheduling* die Bedienung des UAVs ein. Über das NL Interface konnten in der Realdemonstration lediglich die aktuelle Aufgabe geändert oder eine neue Aufgabe an die Aufgabenliste angehängt werden. Aufgaben, die bereits zugewiesen, aber noch nicht ausgeführt worden sind, konnten somit nicht mehr modifiziert werden. Diese Einschränkung wurde gewählt, um die Komplexität der Bedienung in Grenzen zu halten. In einem operationellen System ist diese fehlende Funktionalität unumgänglich.

2.2.4 Surrogate UAV

Im Auftrag des britischen Verteidigungsministeriums führte die Firma QinetiQ eine umfangreiche Studie samt Realversuchen zum Thema Führung von mehreren UAVs aus einem einsitzigen Kampfflugzeug durch [Baxter & Horn, 2005][Baxter, Horn & Leivers, 2008][Platts, Whitby & Richards, 2009][Baxter & Richards, 2010]. In den Realversuchen bestand die Mission in der Aufklärung und Bekämpfung eines mobilen Ziels. Für die Durchführung standen vier UAVs (1 reales, 3 simulierte) ausgestattet mit entsprechenden Aufklärungssensoren sowie Waffensystemen zur Verfügung [Baxter et al., 2008].

In Abbildung 10 ist die Systemarchitektur des Gesamtsystems in den Realversuchen dargestellt [Baxter et al., 2008]. Der UAV-Operateur, welcher zugleich der Pilot des bemannten Kampfflugzeuges (*Fast Jet*) ist, kann über eine Mensch-Maschine-Schnittstelle (*Human-Machine Interface*) die unbemannten Systeme (*Surrogate UAVs*) in einem *supervisory control* Verhältnis auf Missionsebene führen. Dazu kann dieser spezifische Missionsaufgaben an einen „Pool“ an kooperierenden UAVs zuweisen. Das *CASM* (*Command, Authorisation and Situation Manager*) bildet die Schnittstelle zwischen der Mensch-Maschine-Schnittstelle sowie einem Multi-Agenten-System. Dieses übersetzt die Piloteneingaben in entsprechende Anweisungen für die Agenten und versorgt die Mensch-

Maschine-Schnittstelle mit notwendigen und relevanten Informationen, damit der Pilot ein umfassendes Situationsbewusstsein erlangen kann. Das CASM ist für die Abhandlung von *PACT (Pilot Authorisation and Control of Tasks)* Interaktionen zuständig. Das PACT [Howitt & Richards, 2003] ermöglicht eine variable Autonomie abzubilden, indem für einzelne Aufgaben die Hierarchie der Interaktion zwischen Automation und dem Operator festgelegt wird [Baxter & Horn, 2005]. In der fünfstufigen Hierarchieskala ist in der untersten Ebene der Operator und in der obersten Ebene die Automation zuständig, um Entscheidungen zu treffen. Die Zwischenschritte stellen mehr oder weniger unterstützende Modi des Systems dar.

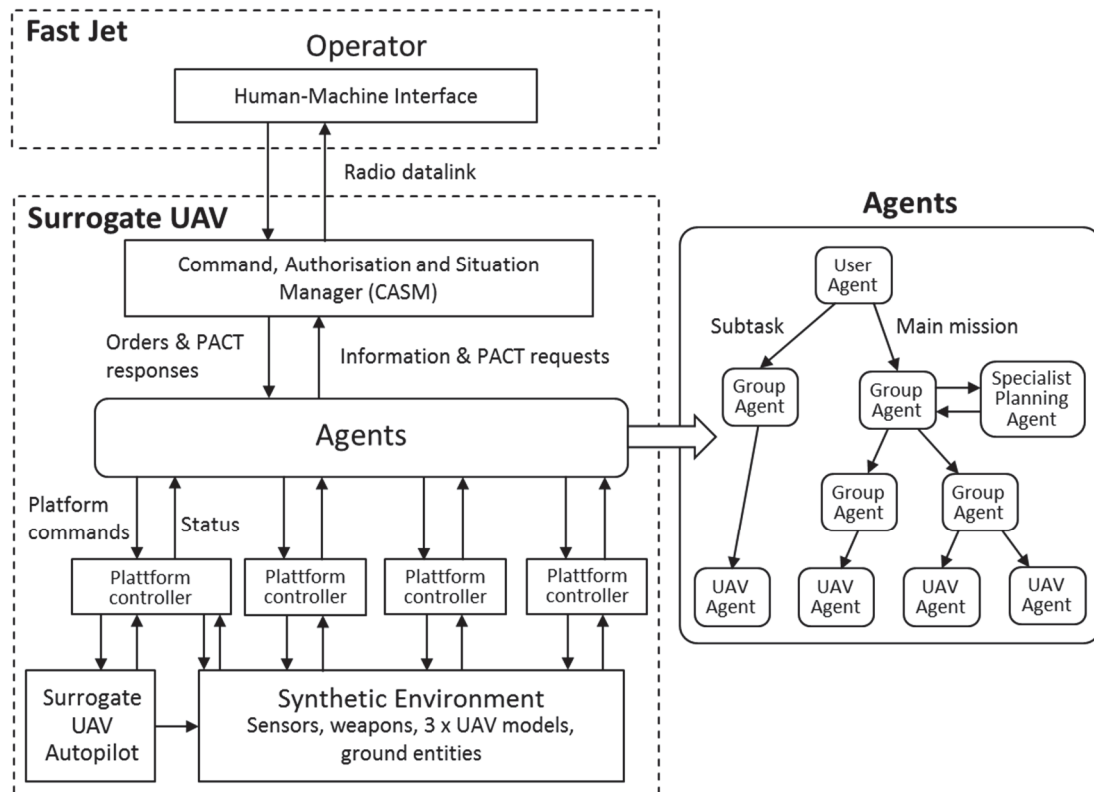


Abbildung 10: In Realversuchen verwendete Systemarchitektur zur luftgestützten Führung mehrerer UAVs (1 reales, 3 simulierte) nach [Baxter et al., 2008]

Im Mittelpunkt des Gesamtsystems steht das Multi-Agenten-System, das auf Basis der BDI-Agententheorie [Rao & Georgeff, 1995] entwickelt wurde. Insgesamt gibt es vier verschiedene Arten von Agenten (siehe Abbildung 10 – rechtes Bild). Vom *User Agent* existiert prinzipiell nur eine einzige Instanz. Dieser verwaltet die Anweisungen des Operators und versorgt diesen mit Informationen über die CASM. Darüber hinaus ist der User Agent für die Zuweisung von Aufgaben an einzelne UAVs zuständig. Dazu erzeugt, zerstört oder nutzt dieser bereits bestehende *Group Agenten*. Die Group Agenten sind für die Planung und Koordinierung der Ausführung von Aufgaben zuständig. Dazu kann ein Group Agent auf einen *Specialist Planning Agent* zugreifen, der entsprechende Planungsfunktionalitäten bereitstellt. Die Überwachung der Durchführung der übertragenen Aufgaben durch das zugewiesene UAV fällt in den Zuständigkeitsbereich des zugeordneten Group Agenten. Dazu nutzt dieser einen weiteren Group Agenten oder *UAV Agenten*. Der UAV Agent ist schlussendlich verantwortlich für die Führung der Plattform sowie der Nutzlast. Dazu sendet dieser Agent entsprechende Kommandos an den *Plattform*

Controller und reicht die zurückgesendeten Statusinformationen an hierarchisch übergeordnete Agenten weiter. Der Plattform Controller ist für die tatsächliche Steuerung der unbemannten Systeme zuständig.

Die Aufgabe des Piloten des bemannten Kampfflugzeuges liegt vorwiegend in der *supervisory control* Führung seiner ihm zugewiesenen UAVs. Die Erteilung von Genehmigungen zur Durchführung von Aufgaben fällt ebenfalls in seinen Aufgabenbereich. Das bemannte Kampfflugzeug ist nicht direkt in das Missionsgeschehen mit eingebunden, hat also keine aktiven, unmittelbar auf die Umwelt einwirkenden Handlungen auszuführen. Daher kann dieser auch prinzipiell außerhalb des Operationsgebiets in „sicherer Umgebung“ verweilen. Abgesehen von einer möglichen Bandbreitenproblematik der Datenlinks könnte somit die anfallenden UAV-Bediener Tätigkeiten auch ein Operateur aus einer BKS in sicherer Entfernung vornehmen.

Da der Pilot nicht aktiv im Missionsgeschehen operiert, besteht auch keine Abhängigkeit bzw. Beziehung zwischen den Aktivitäten der UAVs und dem Piloten. Es findet kein unmittelbares, bemannt-unbemanntes Zusammenwirken statt, um gemeinschaftlich ein übergeordnetes Arbeitsziel zu erreichen. Sollte der Pilot aktiv in das Missionsgeschehen integriert werden, wie in dieser vorliegenden Forschungsarbeit beabsichtigt, so kann dies als problematisch angesehen werden, da die eigentliche Planung, Koordination und Zuteilung von Aufgaben sowie die Überwachung der Durchführung das intelligente Agentensystem innehat. Das würde bedeuten, der Pilot müsste sich einem technischen System vollständig unterordnen.

2.3 Mensch-Maschine-System

In der in dieser Arbeit behandelten Thematik liegt ein sehr ausgeprägtes Problem der Mensch-Maschine-Aufgabenteilung zwischen dem Piloten und den hochautomatisierten Systemen vor. Im Nachfolgenden werden daher der Mensch und die Automation hinsichtlich allgemeiner Eigenschaften und Fähigkeiten sowie potentiell zu erwartender Probleme im Zusammenspiel mit der Führung von Luftfahrzeugen näher betrachtet.

Beginnend wird im Abschnitt 2.3.1 zunächst ein allgemeines Instrument zur Beschreibung und der Analyse von Mensch-Maschine-Systemen, das sogenannte *Arbeitssystem*, vorgestellt. Im Anschluss daran erfolgt im Abschnitt 2.3.2 eine Betrachtung verschiedener Ansätze zur Funktionsteilung zwischen Mensch und Automation innerhalb eines Arbeitssystems. Der Abschnitt 2.3.3 diskutiert die wesentlichen menschlichen Faktoren, die eine unmittelbare Auswirkung auf die Leistungsfähigkeit des Gesamtsystems haben. Abschließend werden in Abschnitt 2.3.4 bereits bekannte Probleme mit herkömmlicher Automation im Umfeld der Führung von Luftfahrzeugen betrachtet.

2.3.1 Das Arbeitssystem

Allgemein kann die Führung von unbemannten Luftfahrzeugen als ein dynamischer Arbeitsprozess in einem Mensch-Maschine-System angesehen werden [Onken & Schulte, 2010]. Während eines Arbeitsprozesses werden von den Bedienern verschiedenartige Automationsfunktionen herangezogen, um basierend auf den aktuellen Umweltbedingungen ein bestimmtes Arbeitsziel zu verfolgen. Betrachtet man nun die UAV-Führung

anhand des Arbeitsprozesses, so stehen die benötigten Automationsfunktionen zur Zielerreichung im Vordergrund. Eine andere Sichtweise aus dem ergonomischen Umfeld bietet das *Arbeitssystem*. Nach DIN EN ISO 6385:2004 wird ein Arbeitssystem definiert als ein

„[...] System, welches das Zusammenwirken eines einzelnen oder mehrerer Arbeitender/Benutzer mit den Arbeitsmitteln umfasst, um die Funktion des Systems innerhalb des Arbeitsraumes und der Arbeitsumgebung unter den durch die Arbeitsaufgaben vorgegebenen Bedingungen zu erfüllen.“ [International Organization for Standardization, 2004]

Dieser Ansatz verfolgt also die Darstellung eines Arbeitsprozesses über die im Prozess beteiligten physikalischen Objekte aus der realen Welt. Hierbei stehen die Betrachtung sowie die Analyse des Zusammenwirkens zwischen Mensch und Automation innerhalb eines soziotechnischen Systems im Vordergrund. Das Arbeitssystem wurde bereits mehrfach im Bereich der UAV-Flugführung gewinnbringend als Analysewerkzeug und beim Entwurf von Mensch-Maschine-Systemen eingesetzt, wie z.B. aus [Onken & Schulte, 2010] hervorgeht. In dieser Forschungsarbeit wird das Arbeitssystem als Designwerkzeug für den Entwurf des Mensch-Maschine-Systems in Kapitel 3 eingesetzt.

In Abbildung 11 ist der grundsätzliche Aufbau eines Arbeitssystems inklusive der Schnittstelle zur Umwelt dargestellt.

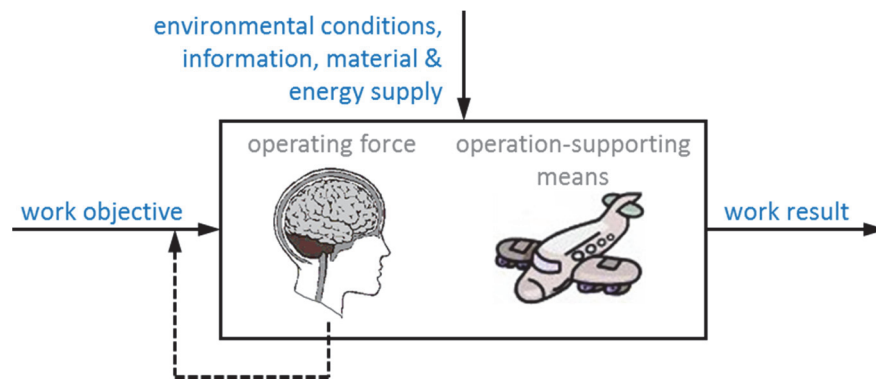


Abbildung 11: Grundsätzlicher Aufbau eines Arbeitssystems nach [Onken & Schulte, 2010]

Nach [Onken & Schulte, 2010] ist die Voraussetzung für die Existenz eines Arbeitssystems das Vorhandensein eines Arbeitsziels (*work objective*). Dieses Arbeitsziel kann durch einen Menschen im Arbeitssystem selbst definiert oder von außerhalb vorgegeben werden. Das Arbeitsziel spiegelt den gewünschten Sollzustand der Umwelt, der mit Hilfe des Arbeitssystems erlangt werden soll, wider.

Von außen wirken verschiedenartige *Umgebungsbedingungen* auf das Arbeitssystem ein. Die Umwelteinflüsse (*environmental conditions*) werden im Bereich der Flugführung z.B. durch atmosphärische Gegebenheiten repräsentiert. Weitere Umgebungsbedingungen stellen die Einbringung von relevanten Informationen (*information*), Material (*material*) sowie Energie (*energy supply*) in das Arbeitssystem dar.

Am Ausgang des Arbeitssystems kann das aktuelle Arbeitsergebnis (*work result*) beobachtet werden, welches durch die bereits durchgeführten Handlungen erzielt worden ist. Entspricht das Arbeitsergebnis dem Arbeitsziel, dann ist das gewünschte Ziel erreicht.

Im Inneren des Arbeitssystems findet eine Unterteilung in Bedienmannschaft (*Operating Force, OF*) und Arbeitsmittel (*Operation Supporting Means, OSM*) statt. Die OF repräsentiert die höchste Entscheidungsinstanz in einem Arbeitssystem und besteht aus mindestens einem Menschen (Bediener). Jeder dieser *Bediener* kennt das Arbeitsziel und ist sowohl fähig als auch bestrebt, dieses unter Verwendung der zur Verfügung stehenden Arbeitsmittel bestmöglich zu verfolgen. Die (menschlichen) Bediener können selbstständig das Arbeitsziel festlegen bzw. abändern. Dies ist in Abbildung 11 durch den gestrichelten Linienverlauf verdeutlicht. Nach [Onken & Schulte, 2010] handelt es sich hierbei um eine fundamentale Eigenschaft eines *autonomen* Systems. Neben menschlichen Bedienern können auch künstliche Teammitglieder Teil der OF sein. Dieser Fall, inklusive seiner Besonderheiten, wird im Abschnitt 2.4.3 näher betrachtet.

Die zweite Gruppe von Komponenten im Arbeitssystem bilden die OSMs. Diese werden auch als Arbeitsmittel oder technisches Hilfsmittel bezeichnet und von den Bedienern zur Aufgabenbewältigung herangezogen. Zu den OSMs zählen nach [Onken & Schulte, 2010] insbesondere die Arbeitsplatzumgebung, jede Art von Werkzeugen sowie Maschinen einschließlich Automationssystemen. Im Gegensatz zu der OF besitzen die OSMs keine Kenntnisse über das übergeordnete Arbeitsziel und können dieses somit auch nicht eigenständig verfolgen. Das Vorhandensein eines OSMs im Arbeitssystem ist optional. Im Bereich der Führung von unbemannten Luftfahrzeugen jedoch essentiell.

2.3.2 Ansätze zur Funktionsallokation

Innerhalb des hier betrachteten Mensch-Maschine-Systems kommt es zu einem Zusammenwirken zwischen einer sozialen Komponente, dem Piloten, sowie technischen Gerätschaften, den Automationssystemen. Zur Erfüllung des gemeinsamen Arbeitsziels müssen bestimmte Funktionen, wie die Steuerung und Überwachung der unbemannten Plattformen, ausgeführt werden. Wie bereits in Abschnitt 2.1.3 diskutiert, kann Automation auf verschiedenen Ebenen in der Führung von unbemannten Systemen eingebracht werden, um Teilfunktionen zu übernehmen. In diesem Abschnitt wird nun der Frage nachgegangen, wie eine Funktionsaufteilung zwischen Mensch und Automation grundsätzlich vorgenommen werden kann.

Die Funktionsallokation zwischen Mensch und Automation erfolgt oftmals anhand eines technikzentrierten Ansatzes. Hintergrund dieses Ansatzes ist die Annahme, dass Automationssysteme Funktionen schneller, fehlerfrei und somit zuverlässiger als Menschen ausführen können [Hollnagel & Woods, 2005]. Alle technologisch realisierbaren Funktionen, die eine Effizienzsteigerung wie die Erhöhung der Zuverlässigkeit oder Reduktion von Betriebskosten versprechen, werden demnach automatisiert. Dieser Ansatz wird oftmals auch als *Left-over Prinzip* bezeichnet (siehe z.B. [Hollnagel & Woods, 2005]). In Abbildung 12 ist dieses Prinzip schematisch veranschaulicht. Daraus lässt sich sehr gut erkennen, dass der Großteil der benötigten Funktionen zur Aufgabenerfüllung im Allgemeinen durch Automationssysteme abgedeckt wird. Jedoch verbleiben die Randbereiche beim Menschen. Der linke Randbereich umfasst Funktionen, die zum Teil sehr unregelmäßig im Arbeitsprozess benötigt werden und daher aus wirtschaftlicher Sicht keiner sinnhaften Automatisierung unterliegen. Den rechten Randbereich bilden komplexe Funktionen, die meist selten und sehr uneinheitlich auftreten.

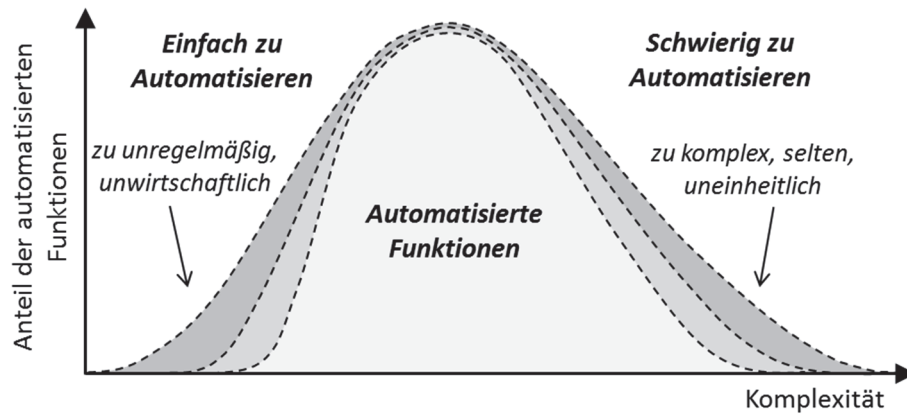


Abbildung 12: Darstellung des Left-over Prinzips in Anlehnung an [Hollnagel & Woods, 2005]

Das Left-over Prinzip bringt allerdings entscheidende Nachteile mit sich. Der Faktor Mensch sowie das Zusammenwirken zwischen Mensch und Automation wird nur ansatzweise bis gar nicht beachtet. Somit verbleiben die schwierigen, komplexen Funktionen, die in der Regel hohe mentale Anstrengungen erfordern und sinnvollerweise durch Automationsfunktionen übernommen werden sollten, weiterhin in der Obhut der Bediener.

Eine weitere Theorie zur Funktionsteilung stellt der MABA-MABA (*men are better at – machines are better at*) Ansatz dar [Fitts, 1951]. Dieser stammt aus dem Bereich der Ergonomie und berücksichtigt explizit den Faktor Mensch. Im Speziellen handelt es sich hierbei um einen fähigkeitszentrierten Ansatz, der eine strikte Teilung zwischen Mensch und Maschine hinsichtlich deren Fähigkeiten vornimmt. Alle Funktionen, für die ein Mensch besser als die Automation geeignet erscheint, werden diesem zugewiesen, die verbleibenden der Automation.

In den beiden zuvor erwähnten Prinzipien wird angenommen, dass Aufgaben bzw. die damit verbundenen Funktionen nicht weiter teilbar sind. Funktionen können also entweder von einem Menschen oder einer Automation ausgeführt werden. Ein explizites Zusammenwirken von Menschen und Automationssystemen zur gemeinschaftlichen Ausführung einer Funktion wird in diesen beiden Ansätzen nicht betrachtet.

Eine weitere Möglichkeit zur Funktionsallokation zwischen Mensch und Maschine kann anhand von Automationsgraden (*Level of Automation, LOA*) erfolgen. Eine der bekanntesten Theorien wurde dazu von [Sheridan & Verplank, 1978] aufgestellt. Hierbei wird davon ausgegangen, dass die Automation den Bediener hierarchisch untergeordnet ist und diesen bei seinen Aufgaben in unterschiedlichen Ausprägungsstufen unterstützen kann. Der Mensch tritt bei dieser Betrachtung der einzelnen Prozesse des Zusammenwirkens mit der Automation in den Mittelpunkt. Dies impliziert, dass die Automationssysteme grundsätzlich für den Menschen überwachbar sowie kontrollierbar sein müssen. Eine nach [Sheridan, 1992] modifizierte Form der 10-stufigen LOA-Skala ist in Tabelle 2 abgebildet.

Die niedrigste Stufe, LOA 1, sieht keine Unterstützung des Menschen durch technische Systeme vor. In den Stufen LOA 2-4 wird der Mensch durch Automationssysteme im Bereich der Entscheidungsfindung in unterschiedlichen Ausprägungen unterstützt. Der Unterschied liegt in der Anzahl der vorgeschlagenen Lösungsalternativen. Ab den LOA 5 bis LOA 9 wird der Mensch bei der Ausführung von Handlungen zusätzlich durch die Automation unterstützt. Innerhalb dieser Stufen kommt es zu Differenzierungen bezüglich

Interventionsmöglichkeiten durch den Menschen, sowie der Gestaltung der Informationsmitteilungen an den Menschen. Die höchste Stufe bildet der LOA 10, wobei hier der Mensch keinen Einfluss mehr auf die Automation nehmen kann. Die Funktion ist in dieser Stufe vollständig automatisiert. Bei Betrachtung dieser 10-stufigen Liste fällt auf, dass nur zwei wesentliche Prozesse der menschlichen Informationsverarbeitung (vgl. Abschnitt 2.3.3), die zentrale Informationsverarbeitung sowie die Reaktion (Handlungen), berücksichtigt werden.

LOA	Automation Description
1	The computer offers no assistance, human must do it all.
2	The computer offers a complete set of action alternatives, and
3	narrows the selection down to a few, or
4	suggests one, and
5	executes that suggestion if the human approves, or
6	allows the human a restricted time to veto before automatic execution, or
7	executes automatically, then necessarily informs the human, or
8	informs him after execution only if he asked, or
9	informs him after execution if it, the computer, decides to.
10	The computer decides everything and acts autonomously, ignoring the human.

Tabelle 2: Level of Automation (LOA) [Sheridan, 1992]

[Parasuraman et al., 2000] hat Sheridan's Liste explizit um die Gesichtspunkte der Informationsverarbeitung erweitert. Neben der LOA-Liste diente als Grundlage eine einfach gehaltene, 4-stufige Modellvorstellung über die menschliche Informationsverarbeitung. Im Gegensatz zu dem in Abschnitt 2.3.3 diskutierten Modell nach [Wickens, Lee, Liu & Becker, 2004] wird hier der Wahrnehmungsprozess weiter unterteilt in die Aufnahme von Informationen und in die eigentliche Wahrnehmung der Informationen. In Abbildung 13 ist die mögliche Funktionsverteilung nach [Parasuraman et al., 2000] zwischen Mensch und Maschine exemplarisch für zwei unterschiedliche Systeme dargestellt.

Aus Abbildung 13 geht hervor, dass zu jeder dieser Stufen der menschlichen Informationsverarbeitung der Mensch in unterschiedlichen Ausmaßen (LOA 1 bis 10) durch Automationsfunktionen unterstützt werden kann. Die erste Stufe bildet die Informationsbeschaffung (*Information Acquisition*). Im nicht automatisierten Fall ist der Mensch für die Beschaffung jeglicher Information selbst zuständig. Im Gegensatz dazu werden im vollautomatisierten Fall dem Menschen ausschließlich vorverarbeitete Informationen über eine Mensch-Maschine-Schnittstelle weitergereicht. Nicht relevante Informationen werden aus den Sensoreingangsdaten entfernt. Die zweite Stufe stellt die Informationsanalyse (*Information Analysis*) dar. Hier kann beispielsweise eine Automationsfunktion dem Bediener eine Voraussage über zukünftige Entwicklungen bestimmter Prozessgrößen liefern. Die nächste Stufe bildet die Entscheidungsauswahl (*Decision Selection*). Denkbar sind Automationsfunktionen, die den Menschen eine Auswahl von möglichen Lösungen zu einem vorliegenden Problem anbieten. Je nachdem, wie viele Lösungsvorschläge angeboten werden, liegt der LOA im Bereich von zwei bis vier. Die Ausführung von Aktionen (*Action Implementation*) stellt die letzte Stufe dar. Auch in diesem Fall reicht die

Bandbreite von einer nicht automatisierten bis zu einer vollautomatisierten Ausführung von Handlungen.

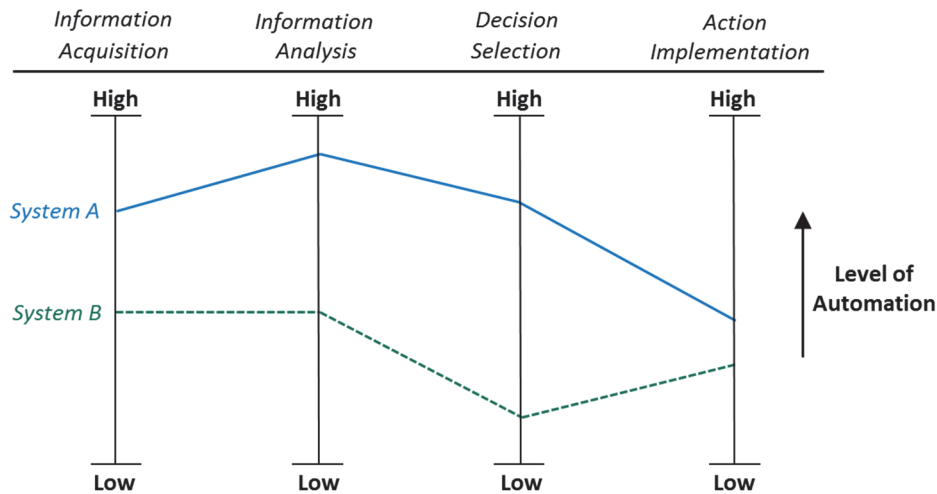


Abbildung 13: Automationsgrade in Abhängigkeit der Prozesse der menschlichen Informationsverarbeitung für zwei unabhängige Systeme nach [Parasuraman et al., 2000]

Die bis jetzt betrachteten Strategien zur Funktionsallokation berücksichtigen nur eine *statische* Verteilung. Eine Funktion, die entweder einem Menschen oder einer Automation zugeteilt wurde, verbleibt während des Zusammenwirkens auch bei dieser. In manchen Systemen ist es dem Bediener jedoch möglich diese Funktionsteilung dynamisch und eigenständig festzulegen. Hierbei handelt es sich um ein *adaptierbares System*. Wird hingegen eine Funktionsteilung in Abhängigkeit von bestimmten Kriterien (z.B. Umweltänderungen, zu hohe Arbeitsbelastung oder Müdigkeit des Bedieners) durch ein System eigenständig vorgenommen, spricht man von *adaptiver Automation*. Mehr zu diesem Thema kann zum Beispiel in [Oppermann, 1994][Miller, Funk, Goldman, Meisner & Wu, 2005][Parasuraman, Barnes & Cosenzo, 2007][Manzey, 2012] gefunden werden.

2.3.3 Menschliche Faktoren

Dieser Abschnitt setzt sich mit den wesentlichsten psychologischen Eigenschaften von Systembedienern auseinander, um eine bessere Vorstellung über die Grenzen sowie Einflüsse der menschlichen Faktoren (*Human Factors*), wie Wahrnehmung oder Kognition, auf die Leistungsfähigkeit eines hochautomatisierten Mensch-Maschine-Systems zu erhalten.

2.3.3.1 Menschliche Informationsverarbeitung

Zur Untersuchung der menschlichen Faktoren wird als Ausgangspunkt auf die Modellvorstellung zur menschlichen Informationsverarbeitung nach [Wickens et al., 2004] zurück gegriffen. In Abbildung 14 ist diese Modellvorstellung veranschaulicht. Die Verarbeitung der Informationen wird in drei grundlegenden Stufen (Wahrnehmung, zentrale Informationsverarbeitung, Reaktion) unterteilt. Darüber hinaus kommt den begrenzt verfügbaren Kapazitäten der Informationsverarbeitung, den limitierten mentalen Ressourcen, eine hervorgehobene Stellung zu.

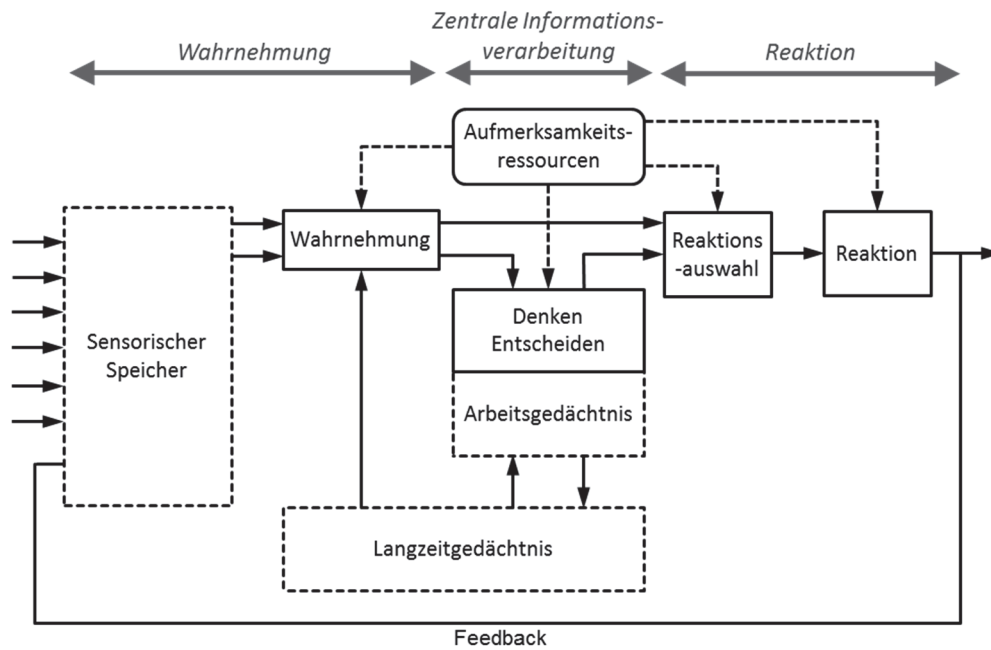


Abbildung 14: Modell der menschlichen Informationsverarbeitung nach [Wickens et al., 2004]

Zu Beginn werden über die verschiedenen Sinnesorgane, wie Augen und Ohren, bestimmte Informationen in der Form von Reizen erfasst und in einem sensorischen Speicher kurzzeitig zur weiteren Verarbeitung hinterlegt. Dieser Speicher dient der Bereithaltung der Informationen für die Wahrnehmungsprozesse der Mustererkennung und der Merkmalsbildung [Johannsen, 1993]. Nachdem die erfassten Informationen eine entsprechende Bedeutung, unter Einbezug von Wissen aus dem Langzeitgedächtnis, zugeordnet wurde, läuft eine bewusste, kognitive Verarbeitung ab. In der Modellvorstellung entspricht dies dem Prozess der zentralen Informationsverarbeitung. Während der kognitiven Prozesse findet ein ständiger Austausch von Informationen zwischen dem Arbeitsgedächtnis, oftmals auch als Kurzzeitgedächtnis bezeichnet, und dem Langzeitgedächtnis statt. Diese Informationen werden genutzt, um beispielsweise Probleme zu lösen, weitere Vorgehensweisen zu planen, die Situation zu interpretieren oder auch Entscheidungen hinsichtlich auszuführender Handlungen zu treffen. Das Arbeitsgedächtnis enthält dabei jene Informationen, welche für die aktuell vorliegende Situation im Hinblick auf die kognitiven Prozesse von Bedeutung sind. Die Speicherung dieser Informationen ist kurzfristig und die Menge sehr stark limitiert [Wickens et al., 2004]. Durch ständiges Wiederholen geht die Information in das Langzeitgedächtnis über. Dieser Vorgang bildet den Prozess des menschlichen *Lernens* ab. Das Ergebnis der zentralen Informationsverarbeitung kann als Basis für die Bestimmung zukünftiger Handlungsabläufe angesehen werden. Nachdem eine dedizierte Auswahl über eine Handlung getroffen worden ist, erfolgt die Ausführung. Dies ist in der Modellvorstellung durch den Block *Reaktion* angedeutet. In Abhängigkeit der Komplexität der Handlungen kann die Ausführung fertigkeitbasiert, regelbasiert oder auch wissensbasiert gemäß den drei Ebenen nach [Rasmussen, 1983] ausgeführt werden. Die Reaktion am Ausgang bildet das beobachtbare menschliche Verhalten.

Eine wesentliche Eigenschaft menschlicher Informationsverarbeitung stellt die endliche Verfügbarkeit von mentalen Ressourcen dar und limitiert damit auch die psychische Leistungsfähigkeit eines Menschen hinsichtlich Kapazität und Verarbeitungszeit [Wickens, 1992][Wickens et al., 2004]. In der Modellvorstellung in Abbildung 14 wird diese beschränkte Verfügbarkeit der mentalen Ressourcen durch eine limitierte Menge an

Aufmerksamkeitsressourcen, die auf unterschiedliche Bereiche der menschlichen Informationsverarbeitung verteilt werden können, zum Ausdruck gebracht. In [Schaub, 2012] wird die Größe Aufmerksamkeit folgenderweise definiert:

„Aufmerksamkeit ist ein psychischer Zustand gesteigerter Wachheit und Aufnahmebereitschaft, bei dem das Bewusstsein auf bestimmte Objekte, Vorgänge, Gedanken ausgerichtet ist. Die Aufmerksamkeit kann willkürlich (z.B. durch Interessen) gelenkt oder unwillkürlich (passiv) durch Reize erregt werden.“

Die Verteilung der Aufmerksamkeit findet somit auf unterschiedlichen Intensitätsniveaus, repräsentiert durch die eingesetzte „Menge“ an Aufmerksamkeitsressourcen, in willkürlicher sowie unwillkürlicher Art und Weise statt.

2.3.3.2 Belastung, Beanspruchung und Leistung

Die Auslastung der mentalen Ressourcen kennzeichnet die *mentale Beanspruchung* eines Menschen. Gemäß dem aus der Arbeitswissenschaft stammenden Konzept zur Belastungs-Beanspruchung ändert sich die Beanspruchung in Abhängigkeit der vorliegenden *Belastung*. Die Belastung impliziert gemäß DIN EN ISO 10075-1 (zitiert nach [Joiko, Schmauder & Wolff, 2006])

„ [...] die Gesamtheit der erfassbaren Einflüsse, die von außen auf den Menschen zukommen und auf ihn psychisch einwirken.“

Dieser Zusammenhang ist in Abbildung 15 unter Berücksichtigung einer weiteren involvierten Größe, der *Leistung*, verdeutlicht. Die Leistung stellt das durch die vom betrachteten Individuum ausgeführten Handlungen erzielte Resultat in der Umwelt dar und kann durch objektive Leistungsparameter wie Reaktionszeit, Fehlerhäufigkeit, Richtigkeit oder Genauigkeit von Reaktionen beschrieben werden [Johannsen, 1993]. Die Beanspruchung ist darüber hinaus ein sehr individuelles, interpersonelles sowie intra-individuelles Maß (siehe z.B. [Grandt & Ley, 2008]) und hängt von einer Vielzahl unterschiedlicher Einflussgrößen, wie Fähigkeiten, Motivation oder Erfahrungen, ab. Beispielsweise kann bei gleicher Belastung die ausgangseitige Leistung unterschiedlicher Personen sowie derselben Person aufgrund verschiedener „Tagesverfassungen“ oder Motivationszustände variieren.

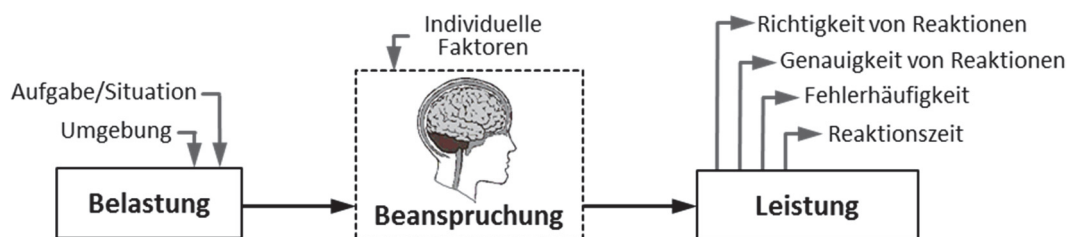


Abbildung 15: Zusammenhang zwischen Belastung, Beanspruchung und Leistung nach [Johannsen, 1993]

Ist die Arbeitsbelastung für einen Menschen zu hoch, oder anders formuliert, reichen die limitierten, mentalen Ressourcen nicht aus, um die gestellten Anforderungen zu bewältigen, führt dies unweigerlich zu Stress, Unwohlsein sowie höheren Fehlerwahrscheinlichkeiten (siehe z.B. [Zühlke, 2012]). Was in der Konsequenz zu einer Abnahme der Leistung führt. In diesem Zusammenhang wird von einer *Überforderung* des Menschen gesprochen. Nach [Johannsen, 1993] liegt eine Überforderungssituation vor, wenn die zur Aufgabenbewältigung benötigte Zeit größer ist, als die tatsächlich zur Verfügung stehende.

Der andere Extremfall liegt in der *Unterforderung*. Hierbei steht mehr Zeit zur Aufgabenbewältigung zur Verfügung als eigentlich notwendig wäre, was beispielsweise Müdigkeit, Langeweile oder Unaufmerksamkeit verursachen kann. Beide Extrema führen zu Leistungseinbußen, weshalb die Belastung möglichst in einem mittleren Beanspruchungsbereich liegen sollte (siehe Abbildung 16).

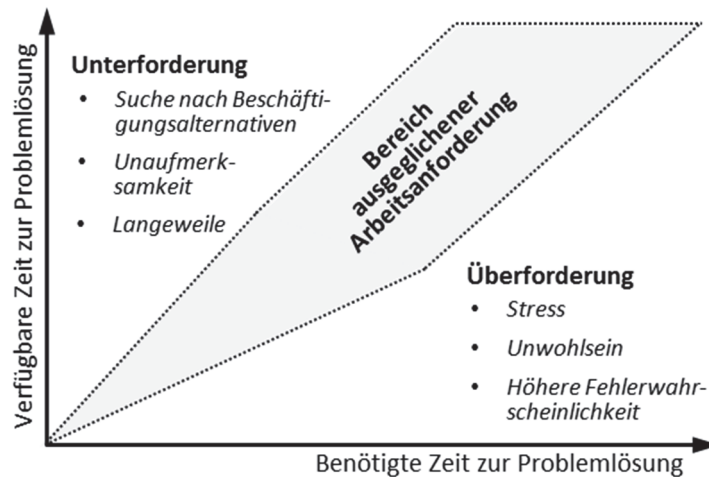


Abbildung 16: Über- und Unterforderung eines Menschen [Zühlke, 2012]

2.3.3.3 Situationsbewusstsein

Eine wesentliche Voraussetzung für die Erzielung einer guten Leistung stellt ein umfangreiches Verständnis über die vorliegende aufgabenbezogene Situation dar. Darauf aufbauend können weitere Vorgehensweisen geplant, Handlungsalternativen ausgewählt, Entscheidungen getroffen oder auch Probleme gelöst werden. In der Modellvorstellung nach [Wickens et al., 2004], aufgeführt in Abbildung 14, erfolgt die Generierung dieses Verständnisses unter Einsatz von mentalen Ressourcen vorwiegend im Prozess der zentralen Informationsverarbeitung. Dieses Verständnis wird fachbegrifflich als *Situationsbewusstsein* (*situation awareness, SA*) bezeichnet und aufgrund verschiedener Herangehensweisen sowie Theorien oftmals unterschiedlich betrachtet. In der Führung von Luftfahrzeugen hat sich vor allem die Theorie über SA nach [Endsley, 1988][Endsley, 1995] etabliert. Nach [Endsley, 1988] wird Situationsbewusstsein folgenderweise definiert:

“Situation awareness is the perception of the elements in the environment within a volume of time and space, the comprehension of their meaning, and the projection of their status in the near future.”

Neben dieser eher allgemein formulierten Definition hat [Endsley, 1995] über eine Modellvorstellung ihre Theorie zur SA detaillierter beschrieben (siehe Abbildung 17). Durch die Berücksichtigung der Wahrnehmung, der Aufmerksamkeit und des Gedächtnisses werden in diesem Modell auch die limitierten mentalen Ressourcen mit abgebildet. Im Gegensatz zum eingangs beschriebenen Modell (vgl. Abbildung 14) zur menschlichen Informationsverarbeitung fokussiert dieses Modell schwerpunktmäßig nur einen Teilaspekt, den der SA.

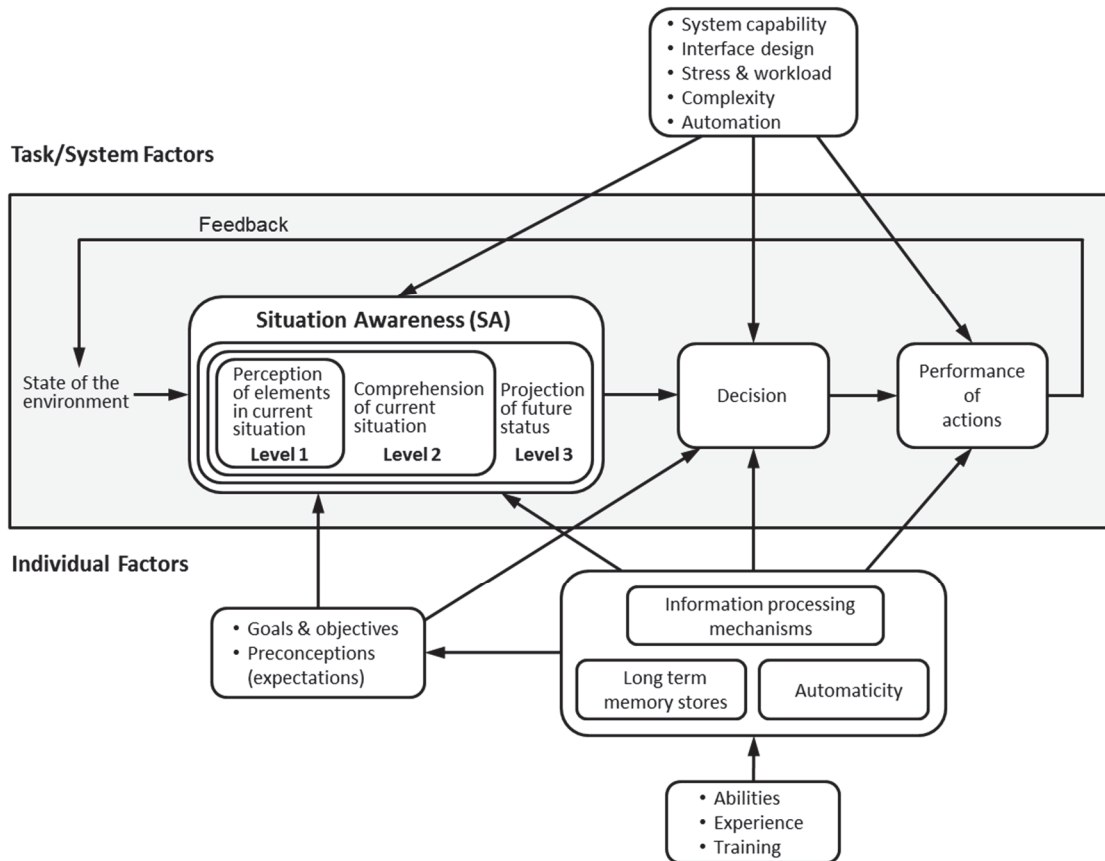


Abbildung 17: Modellvorstellung über das Situationsbewusstsein nach [Endsley, 1995]

Wie aus Abbildung 17 hervorgeht sind die individuellen Faktoren des Menschen (z.B. Zielvorstellung, Erwartungen oder Fähigkeiten) sowie die System- und Arbeitsfaktoren (z.B. Systemfähigkeit, Schnittstellendesign oder Arbeitsbelastung) für die Ausprägung des Situationsbewusstseins verantwortlich. Das Situationsbewusstsein selbst ist in dieser Modellvorstellung in drei aufeinander aufbauende Ebenen gegliedert. Die erste Ebene umfasst die Wahrnehmung von Informationen, welche zur Beurteilung der gegenwärtig vorliegenden Situation notwendig sind. Dies setzt voraus, dass der Mensch über einen entsprechenden Zugang zu diesen Informationen verfügt. Die Wahrnehmung der Informationen kann entweder direkt vom Menschen mit der Umwelt oder indirekt über ein Arbeitsmittel (z.B. Bildschirm) erfolgen. In der aufbauenden Ebene 2 findet die Interpretation sowie Verknüpfungen der wahrgenommenen Informationen zu einem Gesamtbild der aktuellen Situation statt. Schlussendlich wird das aktuelle Situationsabbild in die Zukunft projiziert (Ebene 3). Das daraus resultierende Situationswissen nutzt der Mensch zusammen mit den in seinem Gedächtnis hinterlegten Erfahrungen als Grundlage für seine Entscheidungen. Liegt nun ein defizitäres Situationswissen vor, weil zum Beispiel in Ebene 1 essentielle Informationen nicht wahrgenommen worden sind oder nicht zur Verfügung standen, so kann dies zu Fehlentscheidungen und somit zur Abnahme der Leistung führen.

2.3.3.4 Vertrauen

In einem soziotechnischen System spielt das *Vertrauen* eines menschlichen Bedieners in die weiteren beteiligten Individuen der OF sowie in die zur Verfügung stehenden Arbeitsmittel (Automation) in einem Arbeitssystem eine erhebliche Rolle. Nach [Lee & See, 2004] wird Vertrauen definiert als

“[...] the attitude that an agent will help achieve an individual’s goals in a situation characterized by uncertainty and vulnerability. [...] an agent can be automation or another person that actively interacts with the environment on behalf of the person.”

Das Vertrauen repräsentiert die persönliche Haltung und Einstellung eines Menschen gegenüber weiteren Elementen im Arbeitssystem. Im Nachfolgenden wird das Vertrauen eines Menschen in Automationssysteme näher betrachtet.

Nach [Parasuraman & Riley, 1997] handelt es sich bei dem Faktor „Vertrauen“ um einen Wert, der die Intensität der Verwendung von Arbeitsmitteln charakterisiert. Die Ausprägung des Vertrauens hängt im Allgemeinen von einer Vielzahl unterschiedlicher Faktoren ab. Als maßgebender Einflussfaktor kann die Zuverlässigkeit der Ausführung von Funktionen durch die Automation angesehen werden (siehe z.B. [Parasuraman & Miller, 2004][Manzey, 2012]).

In Abbildung 18 ist der Zusammenhang zwischen Vertrauen und der Zuverlässigkeit einer Automation dargestellt. Der optimale Wert wird durch *calibrated trust* abgebildet [Lee & See, 2004]. Hierbei entspricht die Ausprägung des vorhandenen Vertrauens, dem der Zuverlässigkeit der Automation. Abweichungen davon führen zu den Effekten übersteigertes (*overtrust*) oder mangelndes (*distrust*) Vertrauen in die Automation.

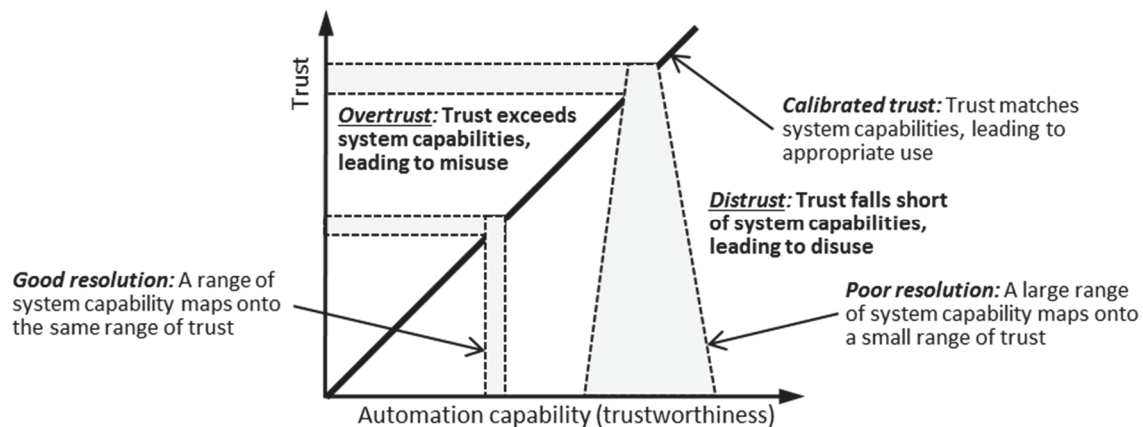


Abbildung 18: Zusammenhang zwischen dem menschlichen Faktor „Vertrauen“ und der Zuverlässigkeit einer Automation nach [Lee & See, 2004]

[Parasuraman & Riley, 1997] spricht in diesem Zusammenhang auch von fehlerhaften (*misuse*) und mangelnder (*disuse*) Nutzung von Automation. Ein übersteigertes Vertrauen in die Automation verursacht eine fehlerhafte Nutzung. Der Bediener ist hierbei bestrebt, Aufgaben so umfangreich wie möglich an die Automation zu übergeben und Überwachungstätigkeiten des technischen Systems zu vernachlässigen. Resultat ist der Verlust des vorher beschriebenen Situationsbewusstseins, sowie die Gefahr von nicht Wahrnehmungen von Problemen. Dagegen ist ein mangelndes Vertrauen in die Automation für die eingeschränkte Nutzung verantwortlich. In diesem Fall ist der Bediener bestrebt, zuverlässige Automationsfunktionen nicht bzw. eingeschränkt zu nutzen. Meist erfüllt der Bediener die Aufgabe selbstständig oder er weist nur vereinzelte Teile der Aufgabe einer Automation, unter Durchführung intensiver Kontrolltätigkeiten, zu. Mangelndes Vertrauen resultiert in zusätzlicher Beanspruchung des Bedieners und kann im Extremfall sogar zu einer Überforderung und somit zum Systemversagen führen.

2.3.4 Probleme konventioneller Automation in der Flugführung

Als Ausgangspunkt für die Betrachtung menschlicher Fehlleistungen in Verbindung mit hochautomatisierten Systemen wird der Teufelskreis (siehe Abbildung 19) nach [Onken & Schulte, 2010] am Beispiel der Führung eines bemannten Luftfahrzeuges herangezogen. Hierbei handelt es sich um eine allgemeine Darstellung der zu erwartenden Probleme mit herkömmlicher Automation in einem Mensch-Maschine-System. Zu Beginn wird von einem Arbeitssystem zur manuellen Führung (*manual control*) eines Luftfahrzeuges über primäre Bedienelemente ausgegangen. Das Luftfahrzeug ist dazu mit keiner bzw. wenig Automation ausgestattet, die grundsätzlich keine oder vernachlässigbare Überwachungstätigkeiten seitens des Piloten erfordert. Innerhalb eines solchen Arbeitssystems treten mit hoher Wahrscheinlichkeit menschliche Fehlleistungen (*human error*), z.B. aufgrund einer zu hohen Arbeitsbelastung (vgl. Abschnitt 2.3.3), auf. Um solche Fehlleistungen reaktiv zu beseitigen oder per Design auszuschließen, werden zusätzliche Automationssysteme (*extended automation*), wie ein Autopilot, zur Reduktion der Arbeitsbelastung in das Arbeitssystem eingefügt. Dies führt bei dem angegebenen Beispiel auch zum Übergang von einer manuellen Führung zu einer leitenden Kontrolle (*supervisory control*) des Luftfahrzeuges. Das resultierende Arbeitssystem weist aufgrund der zusätzlichen Automationssysteme einen höheren Grad an Komplexität (*higher complexity*) auf. Darüber hinaus entlastet es den Piloten bei der anfänglich vorliegenden, sehr arbeitsintensiven, manuellen Steuerung. Im Gegenzug dazu wird der Pilot mit neuen, zusätzlichen Überwachungstätigkeiten der Automation (*increasing human system monitoring tasks*) belastet, die wiederum zu neuen Arten von menschlichen Fehlern führen können – der Kreis beginnt somit von neuem.

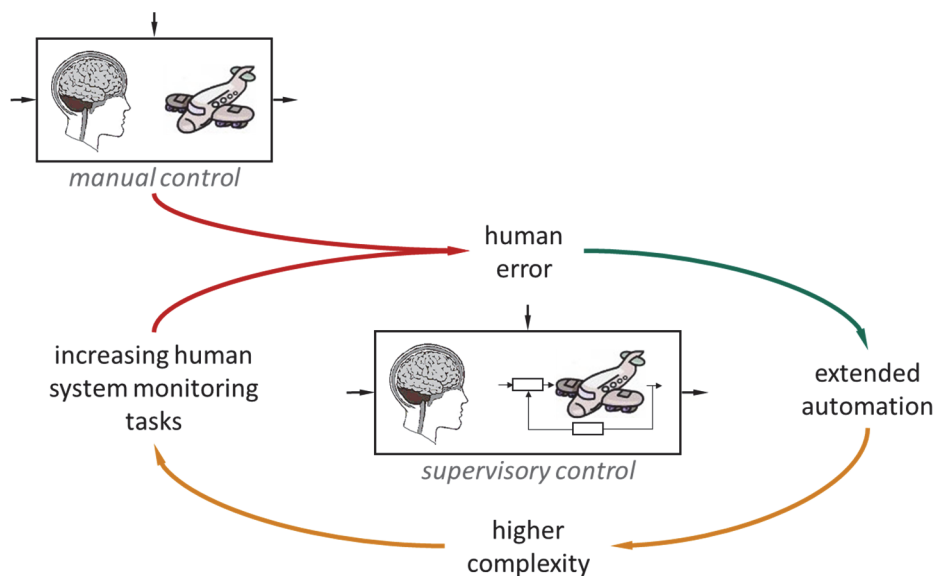


Abbildung 19: Teufelskreis der Automation mit konventioneller Technologie nach [Onken & Schulte, 2010]

In diesem Zusammenhang listet [Billings, 1997] in seiner Automationskritik verschiedenartige Probleme mit dem Einsatz von konventioneller Automation im Umfeld der bemannten Luftfahrt auf. Zu diesen zählen:

- *Complexity* – Die Automation bildet ein hochkomplexes System mit einer Vielzahl an unterschiedlichen Betriebsarten, die es einem Menschen nicht mehr ermöglicht, jeden Systemzustand zu jedem Zeitpunkt vollständig mental zu erfassen.

- *Brittleness* – Der Einsatz der Automation durch den Bediener erfolgt außerhalb der vom Designer festgelegten Betriebsgrenzen und weist somit ein unvorhersehbares Verhalten auf.
- *Opacity* – Der Bediener besitzt ein fehlerhaftes oder unvollständiges mentales Modell über den Zustand der Automation, da diese unzureichende Erklärungen zur Verfügung stellt.
- *Literalism* – Die Automation verfügt weder über Wissen über das Arbeitsziel noch über die Absichten des Bedieners und setzt somit die implementierten Funktionen ohne Berücksichtigung dieser Faktoren um.
- *Clumsy Automation* – Die Automation reduziert die Belastung von Bedienern in Situationen niedriger Beanspruchung und erhöht diese in Situationen hoher Beanspruchungen. Die *Clumsy Automation* geht auf [Wiener, 1989] zurück.
- *Data Overload* – Die Automation stellt zu große Mengen an Informationen den Bediener dar. Die Aufnahme sowie die Verarbeitung dieser belasten die mentalen Ressourcen stark. Auch besteht die Gefahr des „Übersehens“ relevanter Informationen.
- *Monitoring Requirements* – Durch die Überwachungstätigkeiten der korrekten Funktionsweise der Automationssysteme wird der Bediener kognitiv beansprucht.

In der Domäne der Führung unbemannter Systeme wurde von [Williams, 2004] festgehalten, dass neben technischen Problemen sehr häufig auch der Faktor Mensch (*Human Error*) in Verbindung mit der Bedienung komplexer Automationssysteme die Ursache von Unfällen ist. Dies lässt annehmen, dass einige der zuvor erwähnten Kritikpunkte von [Billings, 1997] auch auf unbemannte Systeme zutreffen.

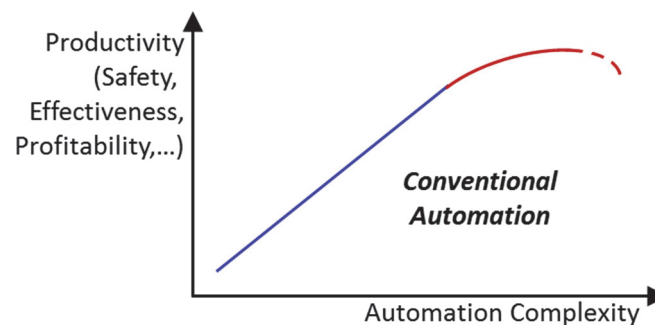


Abbildung 20: Produktivität konventioneller Automation in Abhängigkeit der Systemkomplexität [Onken & Schulte, 2010]

Wie aus dem Teufelskreis und den damit verbundenen *supervisory control* Problemen konventioneller Automation ersichtlich ist, kann eine Beseitigung von menschlicher Fehlleistung durch die Hinzunahme weiterer Automationstechnologien bei gleichbleibendem Arbeitsziel (z.B. Durchführung eines Airliner-Fluges) nicht unmittelbar verhindert werden. Da menschliche Fehlleistung als ein Resultat unangemessener Arbeitsbelastung (vgl. Abschnitt 2.3.3) angesehen werden kann, ist durch die Hinzunahme weiterer Automationsfunktionen in einem hochkomplexen Mensch-Maschine-System keine wesentliche Leistungssteigerung zu erwarten. Nach [Onken & Schulte, 2010] ist die Erhöhung der Leistungsfähigkeit durch Erhöhung der konventionellen Automationskomplexität bei gleichbleibendem Arbeitsziel nur in einem begrenzten Bereich möglich und zweckmäßig (siehe Abbildung 20). Ab einer gewissen Komplexität steigt der Leistungszuwachs durch die Einbringung von weiterer konventioneller Automation in das Arbeitssystem nur mehr

geringfügig an. Im Extremfall kann dies sogar zu einer Abnahme der Leistungsfähigkeit sowie zu einem Systemversagen führen.

Heute im Einsatz befindliche, unbemannte Systeme weisen bereits eine sehr hohe Systemkomplexität auf. Dies geht sowohl aus der Notwendigkeit mehrerer Bediener für den operationellen Betrieb (vgl. Abschnitt 2.1.1) als auch bei der Betrachtung von UAV-Flugunfällen (z.B. [Williams, 2004]) hervor. Durch das weitere Hinzufügen von konventionellen Automationstechnologien sind gemäß den soeben erläuterten Erkenntnissen keine allzu großen Leistungssteigerungen zu erwarten. Diese wären jedoch für die Führung von mehreren unbemannten Systemen aus einem Kampfflugzeug durchaus notwendig.

Eine Erklärung lässt sich in dem zugrunde liegenden Führungsparadigma der *supervisory control* in Verbindung mit konventioneller Automation finden. Der Mensch steht unabhängig vom Abstraktionsgrad der UAV-Führung in der Verantwortung, aus dem Gesamtkontext sinnvolle Teilaufgaben zu extrahieren und den konventionellen Automationsystemen zuzuweisen. Jegliche kognitive Funktionen, wie Probleme zu lösen, die weiteren Vorgehensweisen zu planen oder Entscheidungen zu treffen, verbleiben nach wie vor beim menschlichen Systembediener.

2.4 Dual-Mode Cognitive Automation

Wie in Abschnitt 2.3 bereits erwähnt, verfügen konventionelle Automationssysteme gegenwärtig noch nicht über Fähigkeiten wie zieleorientierte Situationsbewertung oder über Planungs- und Problemlösefähigkeiten. Möchte man den Menschen in diesen Bereichen ebenfalls adäquat unterstützen, so müssen kognitive Fähigkeiten schrittweise in die Automation implementiert werden. Der Theorieansatz der *kognitiven Automation* [Onken & Schulte, 2010] zeigt hierfür einen Lösungsansatz auf, der im Folgenden näher betrachtet wird.

Im Abschnitt 2.4.1 wird zunächst auf die wesentlichen Unterschiede und die daraus resultierenden Vorteile der kognitiven Automation im Vergleich zu konventioneller Automation eingegangen. Darauf aufbauend werden die beiden möglichen Varianten zur Integration von kognitiver Automation in ein Arbeitssystem angeführt. Da diese Varianten einen besonderen Stellenwert in dieser Forschungsarbeit haben, erfolgt eine getrennte Diskussion in Abschnitt 2.4.2 und 2.4.3. Inhalt des Abschnitts 2.4.4 ist eine zusammenfassende Darlegung von Möglichkeiten zur technischen Realisierung kognitiver Automation. Abschließend werden im Abschnitt 2.4.5 wesentliche, bereits realisierte Funktionsprototypen basierend auf diesem Theorieansatz angeführt.

2.4.1 Kognitive Automation im Arbeitssystem

Die Theorie der *kognitiven Automation* [Onken & Schulte, 2010] liefert im Vergleich zur konventionellen Automation Architektur- bzw. Verarbeitungsansätze, um höhere kognitive Fähigkeiten auf maschinellen Systemen (i.A. Computer) abzubilden. Eine herausragende Eigenschaft kognitiver Automation stellt die zielgerichtete Handlungsweise bei der Durchführung von Aufgaben dar. Voraussetzung dafür ist ein unabhängiges Situationsverständnis über die im Aufgabenkontext relevanten Umgebungsbedingungen, wie beispielsweise die aktuelle taktische Lage. Basierend auf diesem Verständnis werden

rationale Entscheidungen über die weiteren auszuführenden Handlungen im Hinblick auf eine effektive Zielerreichung getroffen. Nach [Meitinger, 2008] ermöglicht diese zielorientierte „*Denkweise*“ einem technischen System auch eigenständig auf unerwartete Situationsänderungen sinnvoll zu reagieren und weiter das übergeordnete Ziel ohne Zutun eines Bedieners zu verfolgen.

Durch die Einbringung von kognitiver Automation in ein Arbeitssystem kann nach [Onken & Schulte, 2010] die Leistungsfähigkeit gegenüber konventioneller Automation gesteigert werden, bei gleichzeitiger Zunahme der Systemkomplexität. Durch die zielgerichtete Verfolgung expliziter Ziele kognitiver Automation kann jedoch dem ansteigenden Grad der Systemkomplexität und den damit verbundenen negativen Effekten, wie z.B. Abnahme des Situationsbewusstseins, entgegen gehalten werden [Onken & Schulte, 2010]. Neben der Vermeidung der einhergehenden Probleme der Systemkomplexität können nach [Onken & Schulte, 2010] mithilfe des Automatisierungsansatzes der kognitiven Automation auch weitere bekannte Probleme aus dem Umfeld konventioneller Automation (vgl. Abschnitt 2.3.4) vermieden werden:

“[...] *cognitive automation* [...] is capable to make up for all deficiencies which were experienced with conventional automation, i.e. brittleness, opacity, literalism, and clumsiness.”

Die systemtechnische Implementation kognitiver Automation erfolgt in der Form intelligenter Agenten als künstlich kognitive Einheiten (*Artificial Cognitive Unit, ACU*). In Abbildung 21 sind die beiden prinzipiell möglichen Varianten von kognitiver Automation, repräsentiert durch die Roboterkopfsymbole, in einem Arbeitssystem dargestellt. Die beiden Varianten werden gemäß [Onken & Schulte, 2010] auch als „*dual mode*“ bezeichnet und unterscheiden sich nach der Zugehörigkeit zu den verschiedenen Objektgruppen im Arbeitssystem. Wird eine ACU auf der Seite der OSM eingebracht, dann handelt es sich um eine *Supporting Cognitive Unit (SCU)*. Wird eine ACU auf der Seite der OF integriert, liegt eine *Operating Cognitive Unit (OCU)* vor. Alternativ wird oftmals die begriffliche Bezeichnung *Mode 1* für die Ausprägungsform SCU und *Mode 2* für OCU verwendet.

Innerhalb eines Arbeitssystems in Verbindung mit künstlich kognitiven Agenten können verschiedenartige Beziehungen zwischen den unterschiedlichen Objekten auftreten. Zwischen den Entitäten der OF und der OSM besteht eine klassische *supervisory control* [Sheridan, 1992] Beziehung. Die Tätigkeiten zur Bedienung und Überwachung der Arbeitsmittel, ob konventioneller oder kognitiver Natur, kann von einem menschlichen sowie kognitiven Bediener ausgeübt werden. So kann auch in einem Arbeitssystem eine OCU für die Aufgabenzuweisung und Überwachung einer SCU zuständig sein. Neben dieser Beziehungsform kann eine weitere Form, eine *Kooperation*, innerhalb eines Mensch-Maschine-Systems auftreten. In Abhängigkeit der präsenten Entitäten innerhalb der OF können unterschiedliche Kooperationsformen in Erscheinung treten. Im Detail sind dies die Mensch-Mensch-Kooperation, Mensch-ACU-Kooperation und ACU-ACU-Kooperation. Im Zusammenhang der Mensch-ACU-Kooperation sprechen [Onken & Schulte, 2010] auch von einer *cooperative control* Beziehung.

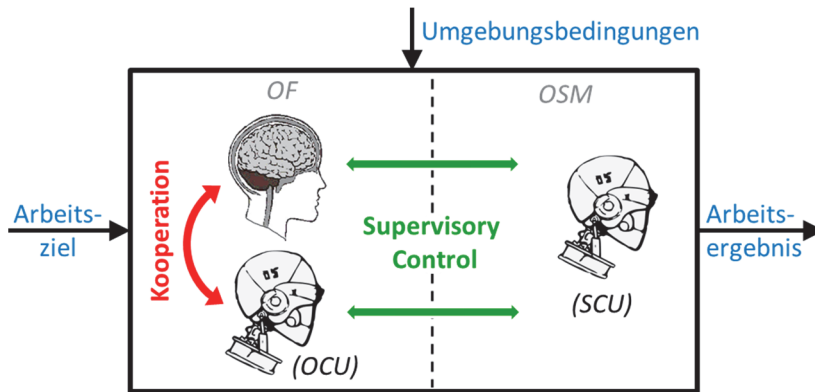


Abbildung 21: Übersicht über die verschiedenen Möglichkeiten der Einbringung kognitiver Automation in ein Arbeitssystem

2.4.2 Supporting ACUs

Ein möglicher Ansatz zur Reduzierung der Arbeitsbelastung bei der Führung von unbemannten Systemen ist die Einführung einer SCU als Teil der Arbeitsmittel. Die Vorteile gegenüber konventionellen Arbeitsmitteln liegen vor allem in der zielgerichteten Ausrichtung von Handlungen in komplexen Arbeitsprozessen und in der eigenständigen Reaktionsfähigkeit auf unvorhersehbare Situationsänderungen, wodurch Probleme wie *brittleness*, *literalism*, *opacity* oder *clumsiness* vermieden bzw. reduziert werden können (siehe z.B. [Meitinger, 2008][Onken & Schulte, 2010]). Eine SCU ist ein Arbeitsmittel, das in der Lage ist, von Bedienern an sie delegierte Teilaufgaben eigenständig und sinnvoll auszuführen, die mit herkömmlicher Automation nicht umsetzbar wären.

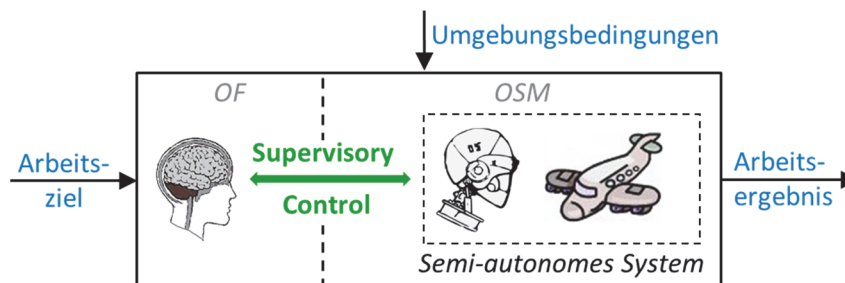


Abbildung 22: Arbeitssystem zur Führung eines Luftfahrzeuges mit einer SCU

Die Integration einer SCU in ein Arbeitssystem erfolgt oftmals in der Form eines *semi-autonomen Systems* (vgl. [Kriegel & Schulte, 2006][Schulte, Meitinger & Onken, 2008][Onken & Schulte, 2010]) – siehe Abbildung 22. Dabei werden der SCU konventionelle Automationssysteme, wie beispielsweise ein Autopilot, zur Seite gestellt. Diese werden zur Bearbeitung von delegierten Teilaufgaben herangezogen. Prinzipiell liegt zwischen der SCU und den konventionellen Automationssystemen eine *supervisory control* Beziehung vor. [Clauß, Kriegel & Schulte, 2013][Clauß & Schulte, 2014] sprechen in diesem Zusammenhang von einer *Agent Supervisory Control (ASC)* Beziehung.

Da eine SCU ausschließlich Teil der Arbeitsmittel ist, verfügt sie über kein Wissen zum übergeordneten Arbeitsziel. Sie ist lediglich über die auszuführende Teilaufgabe im Bilde und kann demgemäß nur im Rahmen dieses Wissens rational und sinnvoll handeln. Der Bediener der SCU ist in diesem Zusammenhang verantwortlich, aus dem Gesamtkontext

des übergeordneten Arbeitsziels entsprechende Teilaufgaben abzuleiten und an die Arbeitsmittel zu delegieren. Darüber hinaus ist der Bediener für die Anpassung einer bereits an eine SCU zugewiesene Teilaufgabe im Falle von gravierenden Änderungen in der Umwelt oder der Zielvorstellung verantwortlich. In Abhängigkeit vom Arbeitsziel sowie der Umgebungsbedingungen beansprucht diese Tätigkeit die mentalen Ressourcen eines menschlichen Bedieners in einem entsprechenden Maß.

2.4.3 Assistenzsysteme als Teil der OF

Neben der zuvor diskutierten Variante kann kognitive Automation auch auf der Seite der OF in das Arbeitssystem eingebracht werden. Hierbei wird ein kooperierender Ansatz des Zusammenwirkens zwischen Mensch und Automation verfolgt, indem neben dem Menschen auch die Automation eigeninitiativ das Arbeitsziel verfolgt. Dabei muss die Automation neben kognitiven Fähigkeiten über kooperative Fähigkeiten verfügen. Eine ACU, die diese Fähigkeiten besitzt, wird als OCU oder auch als *Assistenzsystem* bezeichnet. Im Vergleich zu einer SCU liegt der Vorteil einer OCU nach [Onken & Schulte, 2010] in der Erzielung höherer Leistungspotentiale bei gleichzeitiger verbesserter Vermeidung der bekannten Automationsprobleme. Diese Aussage lässt sich nachvollziehen, wenn die gestellten Anforderungen und Eigenschaften an eine OCU, die sich aufgrund der kooperativen Zusammenarbeit ergeben, genauer betrachtet werden. In Abbildung 23 sind diese bezogen auf die Führung von Luftfahrzeugen aufgeführt.

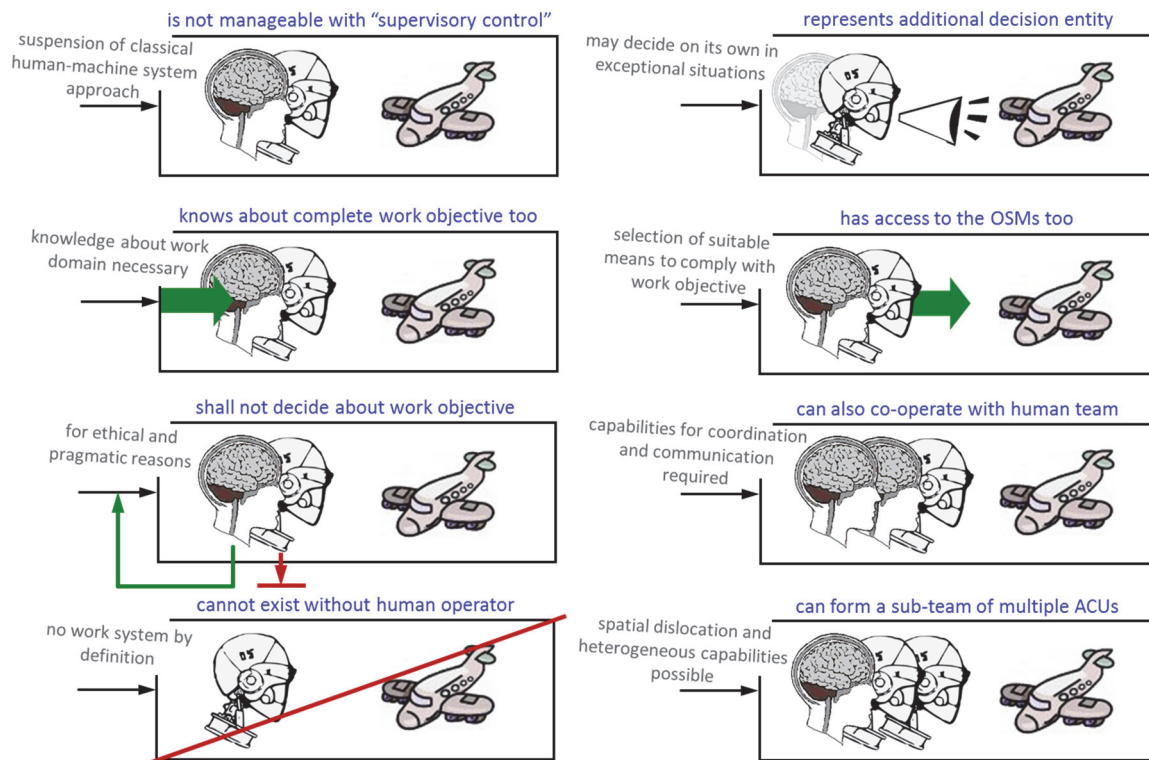


Abbildung 23: Anforderungen und Eigenschaften von Operating Cognitive Units in einem Arbeitssystem nach [Onken & Schulte, 2010]

Klassische Automatisierungsansätze (siehe z.B. [Johannsen, 1993]) sehen die Übernahme von menschlichen Tätigkeiten durch zusätzliche Automationssysteme auf der Seite der OSMs vor. Dabei wird von einer vorliegenden *supervisory control* Beziehung zwischen der

OF und den OSMs ausgegangen. Im Falle einer kooperativen Beziehung zwischen einem Menschen und einer Automation treffen aufgrund des Paradigmenwechsels diese klassischen Automatisierungsansätze nicht mehr zu. Da die OCU wie auch der Mensch Bestandteil der OF ist, benötigt diese ein umfassendes Domänenwissen, um sinnvoll im Hinblick auf die Zielerfüllung wirken zu können. Dies setzt zwingend voraus, dass der OCU das übergeordnete Arbeitsziel bekannt ist. Die Festlegung oder Änderung des Arbeitsziels, welches prinzipiell jede Entität der OF vornehmen kann, ist nach [Onken & Schulte, 2010] aus ethischen sowie pragmatischen Gründen ausschließlich den Menschen im Arbeitssystem vorbehalten. Ein „autonomes“ Luftfahrzeug für den Reiseverkehr das sich die Arbeitsziele und somit den Startzeitpunkt, die Flugroute und auch das Reiseziel selbst definieren kann, macht aus Sicht des Nutzers, also der Menschen, keinen Sinn. Ein Arbeitssystem kann darüber hinaus ohne einen Menschen nicht existieren, da gemäß Definition mindestens ein Mensch im Arbeitssystem enthalten sein muss. Eine OCU repräsentiert eine zusätzliche Entscheidungsinstanz im Arbeitssystem, die durchaus in Ausnahmesituationen missionsrelevante Entscheidungen treffen kann. Für die Bearbeitung von Aufgaben im Sinne der Erfüllung des Arbeitsziels kann die OCU die zur Verfügung stehenden OSMs heranziehen. In manchen Fällen kann die Anforderung zur Zusammenarbeit mit einem Team aus mehreren Menschen oder auch mehreren OCUs bestehen. Hierfür muss die OCU über entsprechende Fähigkeiten zur Kommunikation sowie Koordination verfügen.

Wie zu Beginn bereits erwähnt, besteht zwischen einem Menschen und einer OCU im selben Arbeitssystem eine kooperative Beziehung. In diesem Zusammenhang leiteten [Onken & Schulte, 2010] drei *Grundforderungen (GF)* zur Ausgestaltung dieser Beziehungsform aufbauend auf den Ansatz der „*Human Centered Automation*“ nach [Billings, 1997] ab. Genauer genommen spezifizieren diese GF ein erwünschtes Verhalten einer OCU gegenüber einem Menschen im selben Arbeitssystem. Dies erfolgt in Anknüpfung an die vorliegenden Zustände. Die GF umfassen nach [Onken & Schulte, 2010]:

- 1: *„The assistant system has to be able to present the full picture of the work situation from its own perspective and has to do its best by own initiatives to ensure that the attention of the assisted human operator(s) is placed with priority on the objectively most urgent task or subtask.“*
- 2: *„If according to requirement 1 the assistant system can securely identify as part of the situation interpretation that the human operator(s) cannot carry out the objectively most urgent task because of overtaxing, then the assistant system has to do its best by own initiatives to automatically transfer this situation into another one which can be handled normally by the assisted human operator(s).“*
- 3: *„If there are cognitive tasks, the human operator(s) is(are) principally not capable to accomplish, or which are of too high risk or likely a cause of too high costs, these tasks are to be allocated to the assistant system or operation supporting means, possibly a supporting cognitive unit.“*

Aus diesen Grundforderungen lassen sich zwei verschiedene Verhaltensschwerpunkte ableiten. In den GF 1 und 2 wird der Pilot im Rahmen seiner auszuübenden Tätigkeiten in unterschiedlichen Ausmaßen durch das Assistenzsystem unterstützt. Hingegen kommt es in der dritten GF zu einer vollständigen Übernahme einer Aufgabe durch die OCU.

Je nach dem welcher der beiden Verhaltensschwerpunkt bei einer OCU per Design überwiegt, wird nach [Gangl, Lettl & Schulte, 2013b] entweder von einer *Assisting OCU* oder *Complementing OCU* gesprochen. Die primäre Aufgabe einer Assisting OCU ist es

die Aufmerksamkeit des Bedieners bei Bedarf zu lenken und diesen in Überforderungssituationen entsprechend zu unterstützen. Es handelt sich um ein Assistenzsystem im Sinne von [Flemisch & Onken, 1998][Onken & Walsdorf, 2001][Maiwald, 2013] oder [Rauschert, 2013]. Im Gegensatz dazu kann der primäre Grundgedanke einer Complementing OCU in der Erhöhung der Leistungsfähigkeit auf der Seite der OF gesehen werden. Hier wird ein zusätzliches, virtuelles Teammitglied eingebracht, welches in kooperativer Abstimmung mit den verbleibenden Mitgliedern im Arbeitssystem die per Design zugewiesenen Aufgaben erfüllt. Grundsätzlich ist eine Kombination der angeführten Verhaltensschwerpunkte für eine singuläre OCU vorstellbar.

Neben den Grundforderungen wurden von [Onken & Schulte, 2010] verschiedene Rollen, die eine OCU einnehmen kann, spezifiziert. Diese Rollen treffen vorwiegend für die Realisierung einer Assisting OCU zu. Eine OCU kann nach [Onken & Schulte, 2010] folgende Rollen inne haben.

- *Associative assistance* – In dieser Rolle bietet das Assistenzsystem dem Operateur kontinuierliche Lösungsvorschläge an, ohne dessen Aufmerksamkeit aktiv zu beeinflussen. Der Operateur kann diese Vorschläge nutzen oder auch ignorieren, die Entscheidung liegt ausschließlich bei ihm.
- *Alerting assistance* – Das Assistenzsystem erfasst ein unangemessenes Verhalten des Operateurs und lenkt aktiv dessen Aufmerksamkeit auf den entsprechenden Misstand.
- *Substituting assistance* – In der letzten Rolle wird dem Assistenzsystem die Fähigkeit zugesprochen, entweder temporär (*temporarily substituting*) oder permanent (*permanently substituting*) eine Aufgabe zu übernehmen. In der temporären Ausprägung wird eine dem Operateur zugeordnete Aufgabe zeitlich beschränkt von einem Assistenzsystem übernommen. Der Auslöser zur Entscheidung einer Übernahme liegt beim Assistenzsystem, jedoch kann die Möglichkeit zu einer Intervention des Operateurs bestehen. In der permanenten Rolle wird die Aufgabe bereits zu Beginn eines Arbeitsprozesses oder noch früher, im Designprozess, dem Assistenzsystem zugeteilt. Dies entspricht dem Grundsatz einer Complementing OCU.

2.4.4 Kognitive Agenten

In den vorangegangenen Abschnitten des Kapitels 2.4 wurden die wesentlichsten Teile der Theorie der kognitiven Automation behandelt, die im Rahmen dieser Arbeit von Interesse sind. In diesem Zusammenhang stellt sich die Frage, wie die technische Realisierung solcher kognitiver Agenten erfolgen kann.

Generell werden kognitive Fähigkeiten auf Rechnersysteme über kognitive Architekturen abgebildet. Im Allgemeinen ist unter einer kognitiven Architektur eine im Rechner umgesetzte Theorie über Mechanismen und Strukturen menschlicher Kognition zu verstehen [Lehman, Laird & Rosenbloom, 2007]. Zu den relevantesten Architekturansätze der letzten Jahren zählen vor allem ACT-R [Anderson & Lebiere, 1998][Anderson et al., 2004], EPIC [Meyer & Kieras, 1997] und SOAR [Laird, Newell & Rosenbloom, 1987] [Laird, 2008]. Einen guten Überblick über diese sowie weitere kognitive Systemarchitekturen liefern beispielweise [Langley, Laird & Rogers, 2009].

Im Rahmen dieser Forschungsarbeit wird die *Cognitive System Architecture (COSA)* [Putzer & Onken, 2001] als Architekturansatz für die Realisierung kognitiver Agenten

genutzt. Diese Architektur wurde am Institut für Flugsysteme entwickelt und implementiert als theoretisches Konstrukt menschlichen Verhaltens den *kognitiven Prozess (KP)* [Putzer & Onken, 2001]. Für eine detaillierte Betrachtung des KPs sowie des Architekturansatzes COSA sei hier auf [Putzer & Onken, 2001][Putzer & Onken, 2003][Putzer, 2004][Onken & Schulte, 2010] verwiesen.

Der Architekturansatz COSA wurde in den letzten Jahren am Institut für Flugsysteme weiterentwickelt und liegt in der Zwischenzeit in einer neueren und performanteren Generation, nämlich *COSA² (Cognitive System Architecture with Centralized Ontology and Specific Algorithms)* vor. Detaillierte Informationen zu *COSA²* können beispielsweise aus [Brüggenwirth, Pecher & Schulte, 2011] oder [Brüggenwirth & Schulte, 2012] entnommen werden.

2.4.5 Realisierte kognitive Funktionsprototypen

Der folgende Abschnitt widmet sich einigen bereits realisierten Funktionsprototypen basierend auf kognitiver Automation im Forschungsumfeld der Führung von Luftfahrzeugen, welche am Institut für Flugsysteme entwickelt wurden. Zu Beginn werden Forschungsprojekte behandelt, die kognitive Agenten als Arbeitsmittel nutzen. Im Anschluss daran werden Studien aus dem Umfeld der Assistenzsysteme aufgegriffen, bevor die Vorgängerstudie dieser Dissertation zusammengefasst dargelegt wird.

2.4.5.1 Cognitive System for Flight-Domain

Das erste mit COSA (vgl. Abschnitt 2.4.4) realisierte System, *Cognitive System for Flight-Domain (COSY^{Flight})* [Putzer, 2004], wurde zum Zwecke der Validierung von COSA entwickelt. Dazu wurde das Verhalten eines unbemannten Flächenflugzeuges mit dem *kognitiven Prozess* in der Form einer SCU realisiert und in eine Simulationsumgebung integriert. Das Einsatzspektrum dieses UAVs umfasste die selbstständige Durchführung einer militärischen Aufklärungsmission in einem sehr einfach gehaltenen Szenario mit vereinzelt dynamischen Umweltänderungen. Die entwickelte SCU war in der Lage, das Luftfahrzeug zu führen, feindliche Flugabwehrstellungen über Sensoren zu erfassen und über eine plattformgebundene Kamera geeignetes Aufklärungsmaterial zu generieren. Darüber hinaus verfügte die SCU über Wissen, um eine Kollisionsvermeidung mit anderen Luftfahrzeugen sowie eine Gefährdungsvermeidung von feindlichen Bedrohungen „bordautonom“ unter Einbeziehung der zur Verfügung stehenden OSMs, wie das *Traffic Alert and Collision Avoidance System (TCAS)*, durchzuführen. In [Frey, 2005] wurde die in *COSY^{Flight}* entwickelte SCU aufgegriffen und um eine Kontrollschicht erweitert. Die Aufgabe der Kontrollschicht bestand darin, das von der ursprünglichen SCU generierte Verhalten auf ähnliche Art und Weise wie ein menschlicher Operateur zu überwachen und zu kontrollieren. Dazu wurde die Kontrollschicht mit verschiedenen Wissens-elementen ausgestattet, um den eigenen Wissenszustand zyklisch zu analysieren und festgestellte Probleme oder Abweichungen zu beheben. Das erweiterte kognitive System *COSY^{Flight}* wurde in Simulationsversuchen erfolgreich getestet.

2.4.5.2 Knowledge Configured Vehicle

Im Projekt *Knowledge Configured Vehicle (KCV)* [Kriegel, Brüggenwirth & Schulte, 2011][Kriegel, 2011] wurde erstmals eine auf COSA basierende SCU in ein Realsystem transferiert und erfolgreich in Flugversuchen getestet. Eine Besonderheit der an Bord

integrierten SCU stellte die Trennung von fluggerätespezifischem und missionspezifischem Wissen im kognitiven Prozess dar, mit dem Grundgedanken, einen plattformunabhängigen Agenten zu realisieren. Dazu enthielt die fluggerätespezifische Schicht Wissen über die Trägerplattform, deren Automation sowie Nutzlast und somit über die Fähigkeiten des UAVs. Neben der Bedienung der zu Verfügung stehenden Arbeitsmittel, wie Autopilot oder FMS, ist diese Schicht auch für die Überwachung der Trägerplattform samt Systemen verantwortlich. Im Gegensatz dazu besaß die missionspezifische Schicht ausschließlich Wissen über die Durchführung von Missionsaufgaben. Ein Wissen über die tatsächliche Umsetzung auf physikalischer Ebene lag nicht vor. Durch die Verknüpfung der beiden Schichten über die KCV-Schicht wurde diese Supporting ACU befähigt einen Auftrag selbstständig mit den auf der Trägerplattform zur Verfügung stehenden Arbeitsmitteln durchzuführen.

2.4.5.3 MUM-T und MiRA-T

Ein weiteres unter Nutzung von COSA realisiertes Projekt stellte *MUM-T (Manned-Unmanned-Teaming)* [Benzler et al., 2011][Strenzke et al., 2011] aus dem Bereich der Hubschrauberdomäne dar. In diesem Forschungsvorhaben wurde die Führung von mehreren UAVs aus dem Cockpit eines militärischen, bemannten Transporthubschraubers in einer gemeinsamen Verbundmission untersucht. Der Kommandant, der zusammen mit dem Piloten die Besatzung des bemannten Hubschraubers bildete, konnte die UAVs zur Voraufklärung der beabsichtigten Flugroute und des Einsatzgebietes sowie zur Überwachung von Landeplätzen und feindlichen Kräften heranziehen. Dabei erfolgte die Führung der UAVs auf einem LOI von 4. Jedes einzelne UAV war mit einer kooperativen SCU ausgestattet, die neben der eigentlichen Flugführung der Trägerplattform in der Lage war, vom Kommandanten zugewiesene Aufträge auf dem Abstraktionsniveau von Aufgaben selbstständig umzusetzen [Uhrmann, Strenzke & Schulte, 2010][Uhrmann & Schulte, 2011][Uhrmann, 2013]. Diese implementierte *auftragsbasierte Führung (Task Based Guidance, TBG)* [Uhrmann et al., 2010] ermöglichte eine Aufgabe unspezifisch sowie mit zusätzlichen Informationen an ein UAV zu kommandieren. So konnte beispielsweise der Kommandant eine Gebietsaufklärung an ein UAV delegieren oder diesen Auftrag um weitere Informationen, wie zu nutzenden Korridor, detaillierter spezifizieren. Der erste Fall benötigte im Allgemeinen geringere mentale Ressourcen als der zweite und war demnach für Situationen höherer subjektiver Belastung angedacht.

Im Projekt MUM-T war der Kommandant für die auftragsbasierte Führung der UAVs im Missionskontext verantwortlich. Um den Kommandanten in seinen Aufgaben zu unterstützen, wurde zusätzlich eine Assisting OCU für den Kommandanten in das Arbeitssystem mit aufgenommen [Donath, Rauschert & Schulte, 2010][Rauschert & Schulte, 2011][Rauschert, 2013]. Dabei überwachte das in den Hubschrauber integrierte Assistenzsystem den Kommandanten bei der Ausübung seiner Tätigkeiten durch die Erfassung der manuellen Interaktionen. Bei identifizierten Problemen, wie ungünstiger Aufmerksamkeitsverteilung oder Überforderung des Kommandanten, war das Assistenzsystem in der Lage, den detektierten Problemen über situationsadaptive Unterstützungsfunktionen (Aufmerksamkeitslenkung, Aufgabenvereinfachung und Aufgabenübernahme) effektiv entgegenzuwirken.

Damit der Kommandant über notwendige, freie Ressourcenkapazitäten zur Multi-UAV Führung verfügte, wurden ursprüngliche Kommandantentätigkeiten, wie Navigation und Systemmanagement, an den Hubschrauberpiloten übertragen. Damit dieser durch die Erweiterung seines Aufgabenspektrums nicht überfordert wurde, erfolgte im Rahmen des

Projektes *MiRA-T* (*Military Rotorcraft Associate-Teaming*) die Entwicklung eines wissensbasierten Pilotenassistenzsystems [Maiwald & Schulte, 2011b][Maiwald & Schulte, 2011a][Maiwald & Schulte, 2012][Maiwald, 2013]. Eine Übersicht über das kombinierte Arbeitssystem *MUM-T* und *MiRA-T* kann der Abbildung 24 entnommen werden.

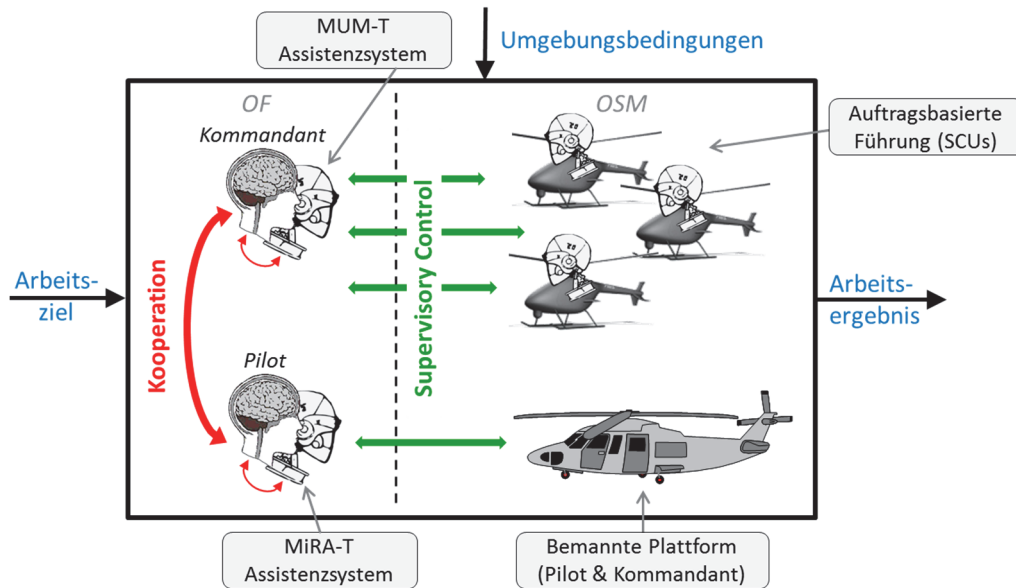


Abbildung 24: Gesamtarbeitssystem der Funktionsprototypen *MUM-T* und *MiRA-T* nach [Strenzke et al., 2011]

Das *MiRA-T* Assistenzsystem war in der Lage, den Piloten im Bereich der Navigation, Flugführung, Funkkommunikation sowie Missionsmanagement zu unterstützen. Eine Besonderheit dieses entwickelten Systems war die Fähigkeit die mentale Beanspruchung bzw. die noch freien Ressourcen des Hubschrauberpiloten kontinuierlich zu prognostizieren und im Falle einer herannahenden Überforderung proaktiv entgegenzuwirken. Ausgangspunkt der Feststellung war die Bestimmung des Aufmerksamkeitsfokus des Piloten. Dazu wurde die aktuell vorliegende Situation erfasst und daraus der Missionsfortschritt erhoben. Dieser diente als Eingangsgröße eines normativen Pilotenaufgabenmodells, um die aktuellen *Sollaufgaben* des Piloten zu eruieren. Unter Miteinbeziehung der Kommunikation, der gegenwärtigen Systemeinstellungen sowie der manuellen und visuellen Interaktion des Piloten mit dem System bzw. Umwelt wurden die *Istaufgaben* festgestellt. Diese Aufgaben repräsentierten die gegenwärtig bearbeiteten Pilotenaufgaben. Ein entwickeltes Pilotenressourcenmodell bewertete jede dieser Einzelaufgaben im Hinblick auf die benötigten mentalen Ressourcen und fügte diese zu einem sogenannten *Demandvektor* zusammen, welcher als Maß für die Beanspruchung der verschiedenen Ressourcen nach [Wickens, 2002] diente. Mit dieser vermuteten Pilotenbeanspruchung war das Assistenzsystem in der Lage, eine Überforderung des Piloten rechtzeitig (proaktiv) zu erkennen und geeignete Maßnahmen zur Reduktion zu ergreifen.

2.4.5.4 PILAS

Im Projekt *PILAS* (*PILoten-Assistenz-System für Luftfahrzeuge*) [Donath & Schulte, 2008] wurde ein wissensbasiertes Assistenzsystem für *HEMS* (*Helicopter Emergency Medical Services*)-Missionen entwickelt. Dieses Assistenzsystem war in der Lage, den Piloten bei der Entscheidung über die Durchführbarkeit von Aufträgen zu unterstützen, indem eine an Bord integrierte OCU eine Auftragsinterpretation [Groth, Meitinger, Donath & Schulte, 2006] in Abhängigkeit der aktuell vorliegenden Situation durchführte. Dazu wurde der

empfangene Auftrag erfasst und in eine Liste überführt, die alle notwendigen durchzuführenden Aufgaben enthielt, wie beispielsweise Starten, Transit zu Position X, Aufnahme von Personen. Mit Hilfe dieser Liste wurde wiederum der Gesamtressourcenbedarf (z.B. benötigte Treibstoffmenge oder Zeit) in Abhängigkeit von den vorliegenden Umweltbedingungen erhoben. Aufbauend auf dem generierten Situationsverständnis und Wissen konnte das Assistenzsystem den Rettungshubschrauberpiloten bei der Missionsdurchführung und Entscheidungen über die Annahme oder Ablehnung eines Auftrages kooperativ unterstützen.

2.4.5.5 Kooperatives UAV-Team

Am Institut für Flugsysteme wurde das Thema kooperative UAV-Flugführung in der Forschungsstudie *COSY^{Team}* behandelt (siehe z.B. [Meitinger & Schulte, 2006a] [Meitinger & Schulte, 2006b][Meitinger & Schulte, 2007a][Meitinger & Schulte, 2007b] [Meitinger, 2008]). Diese Studie stellt das Vorgängerprojekt der vorliegenden Arbeit dar.

In der Abbildung 25 ist das finale Arbeitssystem zur Führung mehrerer UAVs durch einen einzelnen Operator dargestellt. Hierbei steht dem Operator ein semi-autonomes UAV-Team als Arbeitsmittel zur Erfüllung des Arbeitsziels zur Verfügung. Zwischen dem semi-autonomen Team und dem Operator besteht eine typische *supervisory control* Beziehung. Aus dem Arbeitssystem ist ersichtlich, dass jedes einzelne UAV mit einer an Bord integrierten SCU ausgestattet ist. Zwischen diesen existiert eine kommunikative Verbindung, um Informationen auf der Ebene einer Maschine-Maschine-Kooperation innerhalb des Teams auszutauschen. Für die technische Realisierung der SCUs wurde die kognitive Architektur COSA (siehe Abschnitt 2.4.4) eingesetzt.

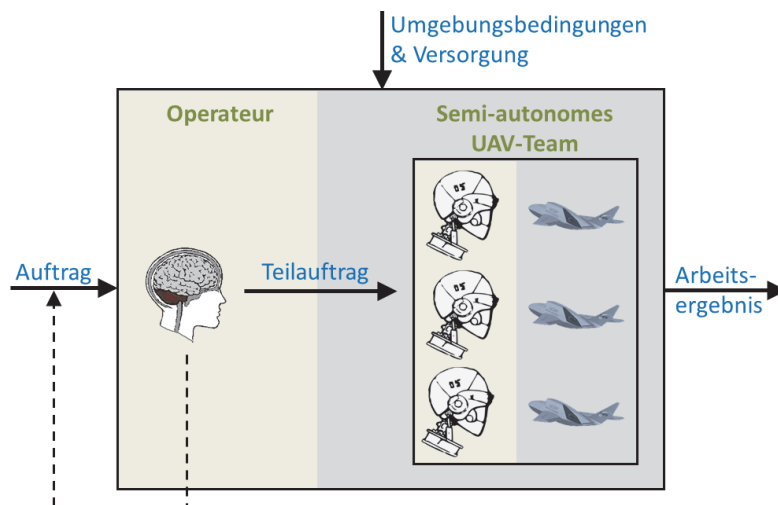


Abbildung 25: Arbeitssystem bestehend aus einem Operator und Team aus Supporting ACUs [Meitinger, 2008]

Der Operator kann diesem semi-autonomen UAV-Team einen Teilauftrag zuweisen. Die SCUs der Teammitglieder ermitteln daraus selbstständig alle notwendigen Teilaufgaben, die zur Erfüllung notwendig sind und verteilen diese eigenständig ohne Zutun des Operators innerhalb des Teams. Diese kognitiven Agenten sind in der Lage, essentielle Informationen zur Erfüllung des Teilauftrages für andere Teammitglieder bereit zu stellen, um ein einheitliches Situationsverständnis zu generieren. Dies ist vor allem notwendig, um abhängige, zwischen den einzelnen Teammitgliedern verteilte Aktivitäten zu koordinieren oder unverzüglich auf Situationsänderungen reagieren zu können. Dieses semi-autonome

Team besitzt also die Fähigkeit, eigenständig einen vom Operateur zugewiesenen Teilauftrag im vollen Umfang „autonom“ zu erfüllen.

In der Abschlussphase der Studie wurde dem Arbeitssystem in Abbildung 25 ein weiteres hinzugefügt, um erste Voruntersuchungen der Kooperation zwischen Mensch und künstlich kognitiven Agenten anstellen zu können (vgl. [Meitinger, 2008][Onken & Schulte, 2010]). Das resultierende Gesamtsystem ist in der Abbildung 26 dargestellt. Die Zusammenarbeit zwischen den beiden Arbeitssystemen erfolgt durch den Austausch von Nachrichten. Aus Sicht des Kampfflugzeugpiloten stellen die künstlich kognitiven Agenten gemäß der Theorie der kognitiven Automation weder zusätzliche Arbeitsmittel (SCUs) noch gleichberechtigte Kooperationspartner (OCUs) dar. In [Meitinger, 2008] wird dies als ein Zwischenschritt in Richtung Mensch-Maschine-Kooperation angesehen.

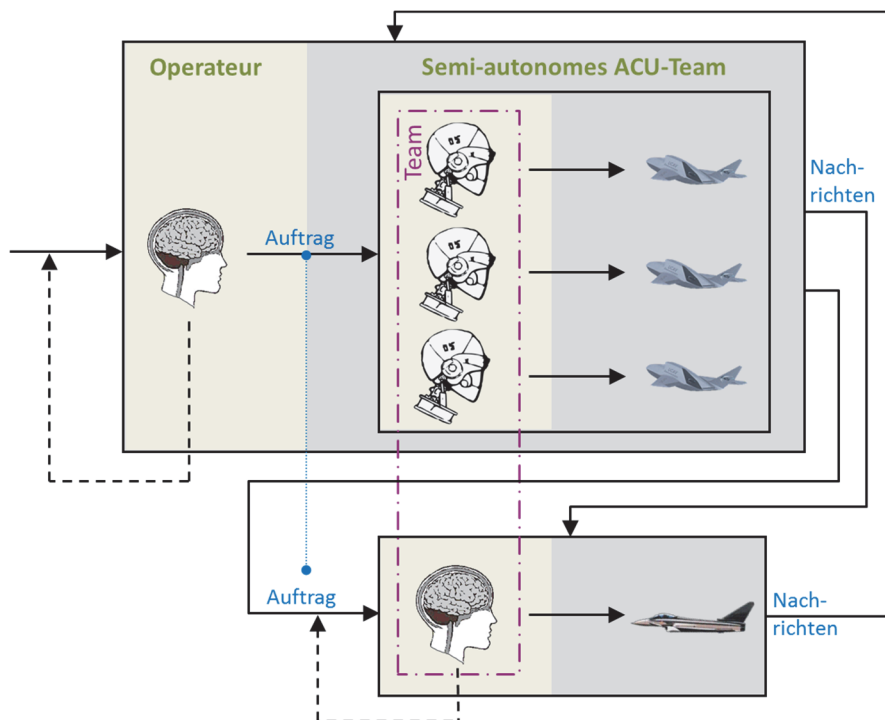


Abbildung 26: Arbeitssysteme für die Untersuchung des Zusammenwirkens zwischen einem bemannten Kampfflugzeug und einem semi-autonomen ACU-Team [Meitinger, 2008]

Für die Evaluierung des weiterentwickelten Ansatzes wurde eine Simulationsumgebung mit einem einfach gestalteten Pilotenarbeitsplatz aufgebaut. Dieser Arbeitsplatz bestand aus zwei berührungsempfindlichen Bildschirmen (Touchscreens). Das *Navigationsdisplay* visualisierte die bekannte taktische Lage. Das *Teamdisplay* bot eine Übersicht über die Fähigkeiten und Ressourcen der einzelnen UAVs sowie über die Verteilung der Teilaufgaben innerhalb des Teams. Die Kommunikation mit den UAVs wurde ebenfalls über dieses Display abgehandelt. Die eigentliche Führung des bemannten Kampfflugzeuges fand durch situationsabhängige Anpassung von Autopilotenparameter für Geschwindigkeit und Kurs durch diskrete Eingaben über eine PC-Tastatur statt.

Bei den durchgeführten Mensch-Maschine-Experimenten wurden insgesamt vier verschiedene Teamkonfigurationen im Rahmen von Luft-Boden-Angriffsmissionen untersucht. Als Probanden standen fünf ausgebildete und erfahrene Piloten bzw. Waffensystemoffiziere (WSO) der Bundeswehr zur Verfügung. Ein sehr markantes Ergebnis aus diesen Experimenten ist in Abbildung 27 dargestellt. Hierbei wurde die Belastung der

Probanden mit dem NASA-TLX Verfahren [S. G. Hart & Staveland, 1988] in Abhängigkeit von der Teamkonfiguration ausgewertet. Die Belastung der Piloten, in den verschiedenen Konfigurationen, war im Durchschnitt im mittleren Bereich angesiedelt. Der Anstieg der Beanspruchung in Abhängigkeit von der Erhöhung der Anzahl der unbemannten Luftfahrzeuge war ebenfalls gering, aber trotzdem gegeben. Ebenfalls geht aus dem Diagramm hervor, dass auch die zugewiesene Rolle (Attacker/SEAD) einen Einfluss auf die Beanspruchung der Piloten hat.

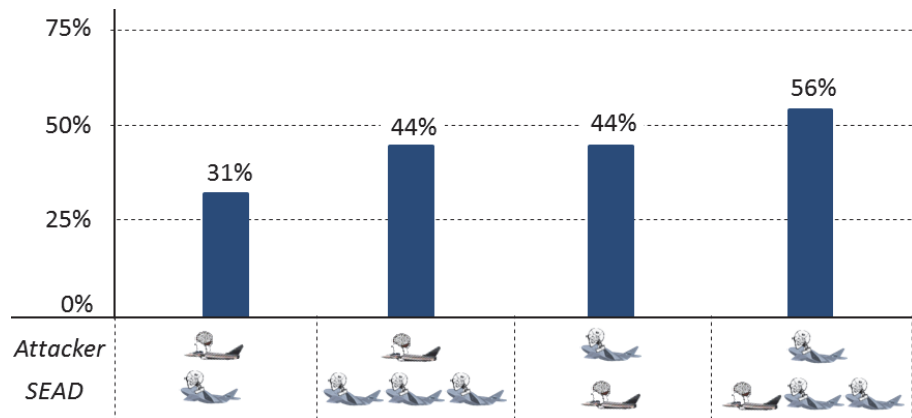


Abbildung 27: Beanspruchung des bemannten Piloten in Abhängigkeit der Teamkonfiguration [Onken & Schulte, 2010]

Diese Voruntersuchung zur Mensch-ACU-Kooperation hat gezeigt, dass eine Zusammenarbeit zwischen Mensch und kognitiver und kooperativer Automation unter vertretbarer Beanspruchung prinzipiell möglich ist.

3 Konzept

Im vorangegangenen Kapitel wurde bereits das wissenschaftliche Umfeld hinsichtlich relevanter Forschungsstudien für diese Arbeit untersucht. Zu der Thematik der luftgestützten Führung mehrerer unbemannter Kampfflugzeuge durch einen Piloten eines einsitzigen Kampfflugzeuges konnten nur vereinzelte Studien ausfindig gemacht werden, die meist nur Teilbereiche behandelten. In einigen Studien wurde ausschließlich die luftgestützte Führung eines einzelnen UAVs betrachtet. Für die Führung der unbemannten Systeme standen häufig ein oder mehrere Bediener zur Verfügung, deren meist einzige Aufgabe es war, diese in einer *supervisory control* Beziehung zu führen. Darüber hinaus waren die Bediener des UAV-Führungssystems teilweise nicht im aktiven Missionsgeschehen involviert. Es erfolgte somit keine bemannt-unbemannte Zusammenarbeit, so wie es im Kontext dieser Arbeit betrachtet werden soll, um durch gemeinschaftliche Handlungen ein Arbeitsziel zu erfüllen.

Im Nachfolgenden wird nun die schrittweise Ableitung eines Konzepts vorgestellt, welches die Führung mehrerer Kampfflugzeuge durch einen Piloten in einer kooperativen Zusammenarbeit ermöglicht. Hierzu werden zunächst in Abschnitt 3.1 grundlegende Designoptionen kognitiver Automation in der Führung unbemannter Systeme betrachtet. Abschnitt 3.2 beschäftigt sich mit der Herleitung des Arbeitssystemkonzeptes. Dieses bezieht die Betrachtung eines ausschließlich bemannten Kampfflugzeugteams sowie eine konventionelle, bemannt-unbemannte Konfiguration mit ein. Im Vordergrund der Arbeit steht die Verbesserung der Mensch-Maschine-Kooperation. Diese wird in Abschnitt 3.3 ausführlich im Hinblick auf mögliche Unterstützungsfunktionalitäten untersucht. Die Erkenntnisse daraus werden im Abschnitt 3.4 genutzt, um unter Verwendung von kognitiver Automation einen Lösungsansatz zu erarbeiten. Das Kapitel endet mit der Konzeptionierung der Mensch-Maschine-Schnittstelle zur Führung mehrererUCAVs (siehe Abschnitt 3.5).

3.1 Designoptionen kognitiver Automation

Im folgenden Abschnitt werden grundlegende Designoptionen kognitiver Automation in einem Arbeitssystem betrachtet. Dazu werden in Abschnitt 3.1.1 die verschiedenen Designoptionen für kognitive Systeme aufgezeigt. Anhand dieser erfolgt im Abschnitt 3.1.2 eine Einordnung bereits realisierter, auf kognitiver Automation basierender Funktionsprototypen in eine Matrix. Ziel ist es hierbei, das Forschungsumfeld dieser Arbeit hinsichtlich kognitiver Automation näher zu betrachten und das Basisdesign festzulegen.

3.1.1 Mögliche Designoptionen

Kognitive Automation kann auf unterschiedliche Arten in das Arbeitssystem als künstlich kognitive Einheiten (*Artificial Cognitive Unit, ACU*) eingebracht werden. Entweder ist die ACU Teil der OSMs oder der OF (vgl. Abschnitt 2.4.1). Ebenso kann eine ACU *lokal* oder

disloziert in Bezug auf einen Operateur in ein Gesamtsystem integriert werden. Das bedeutet im Falle der lokalen Anordnung, dass sich die ACU in derselben technischen Apparatur wie der Operateur befindet. Im Falle einer dislozierten Anordnung ist die ACU nicht im selben Teilsystem wie der Operateur untergebracht. In Abbildung 28 sind diese beiden prinzipiellen Designoptionen im Zusammenhang mit der Führung eines unbemannten Kampfflugzeuges in einer Matrix gegenüber gestellt.

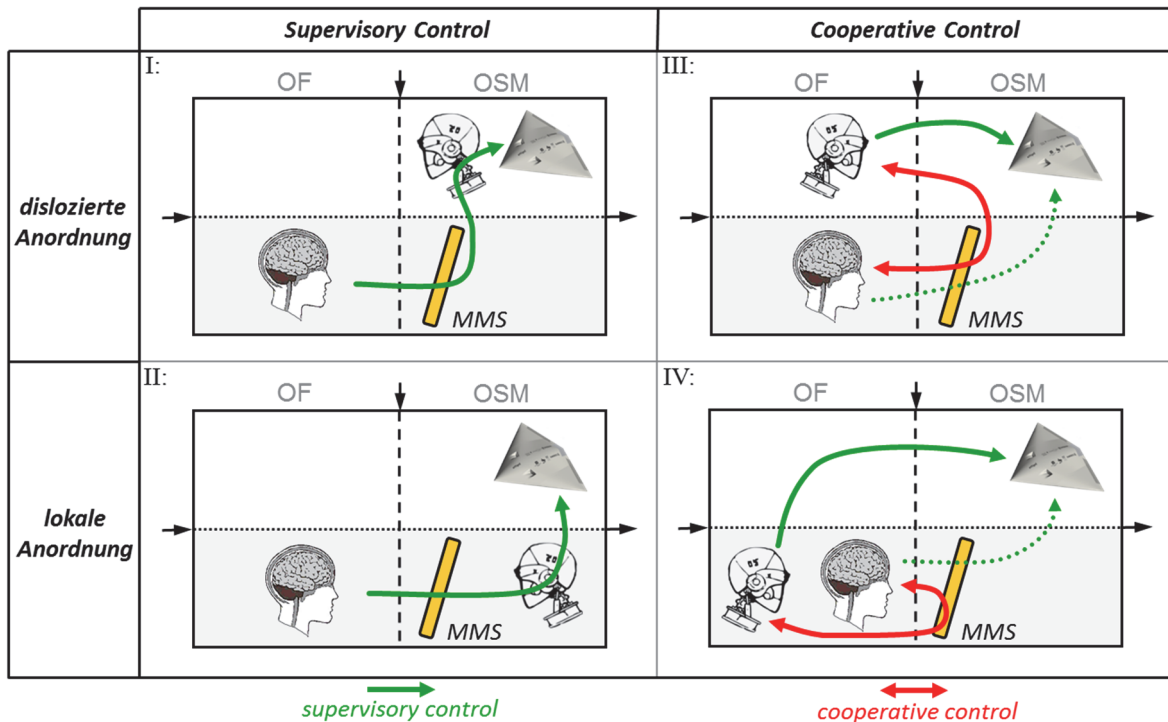


Abbildung 28: Mögliche Designoptionen der Dual-Mode Cognitive Automation

In der linken Spalte (Arbeitssystem I und II) ist die kognitive Automation als SCU in das Arbeitssystem eingebracht. In diesem Fall steht dem Operateur, als Teil der OF, die künstlich kognitive Einheit als Arbeitsmittel im Gesamtsystem zur Verfügung. Zwischen dem Operateur und der ACU liegt eine typische *supervisory control* Beziehung (dargestellt durch grüne Pfeile) vor. Der Operateur ist somit vorwiegend für die Überwachung und Delegation von Aufgaben oder auch einzelner Parameter, abhängig vom zugrunde liegenden Abstraktionsgrad der UCAV-Führung, an die Agenten zuständig. Die ACU wiederum nutzt das Arbeitsmittel UCAV, um das Delegierte umzusetzen. Prinzipiell ist es möglich, die SCU lokal, also auf der Seite der Bodenkontrollstation bzw. eines luftgestützten UCAV-Führungssystems oder disloziert in Bezug auf den Operateur auf der Seite der fliegenden Plattform, dem UCAV, unterzubringen. Im Betrachtungsfall einer lokalen Anordnung der SCU muss bedacht werden, dass in der Regel eine kontinuierliche Datenlinkverbindung zwischen dem Führungssystem und der fliegenden Plattform bestehen muss. Im Falle eines Datenlinkverlustes könnte dies zu einem vorzeitigen Missionsabbruch oder sogar zum Verlust der Plattform führen. Bei einer dislozierten Anordnung kann die SCU mit notwendigem Wissen ausgestattet werden, wie bei Verlust der Datenlinkverbindung zu verfahren ist, um so zumindest einen Missionsteilerfolg zu erzielen.

In der zweiten Spalte (Arbeitssystem III und IV) ist die kognitive Automation in Form einer OCU in das Arbeitssystem eingebracht. Die OCU ist eine zusätzliche Instanz der OF und arbeitet mit dem menschlichen Operateur, der ebenfalls Bestandteil der OF ist, kooperativ

(dargestellt durch rote Pfeile) zusammen. Zusätzlich zur Kooperation existiert mindestens eine *supervisory control* Beziehung zwischen einer Instanz der OF und dem Arbeitsmittel UCAV. Das bedeutet für die beiden soeben betrachteten Arbeitssysteme, dass entweder die OCU, der Operateur oder beide in einem *supervisory control* Verhältnis zu der fliegenden Plattform stehen können.

Wird einem UCAV-Bediener eine Assisting OCU (vgl. Abschnitt 2.4.3) im Arbeitssystem zur Führung eines UCAVs zur Seite gestellt, so besteht die primäre Aufgabe der OCU in der situationsabhängigen Unterstützung des Operateurs bei der Führung des UCAVs. In diesem Fall würden sowohl der Operateur als auch die OCU sinnvollerweise in einem *supervisory control* Verhältnis zur Plattform stehen. Eine andere Möglichkeit wäre die Implementierung einer Complementing OCU (vgl. Abschnitt 2.4.3), die für die eigentliche Führung des UCAVs verantwortlich ist, um gemeinschaftlich mit einem Operateur das Arbeitsziel zu erfüllen. Hierbei würde der Operateur nicht zwingend einen direkten Zugriff auf die fliegende Plattform benötigen. Die OCU würde dabei primär in einem *supervisory control* Verhältnis zum Arbeitsmittel UCAV stehen.

Auch im Falle eines kooperierenden Agenten ist es möglich, die ACU entweder lokal als auch disloziert in Bezug auf den Operateur anzuordnen. Je nach Anwendungsfall kann es zweckmäßig sein, die OCU entweder beim Operateur oder auf dem UCAV zu platzieren. Im ersten der obigen Beispiele wäre es sinnvoll, die Assisting OCU in das Führungssystem des Operateurs zu integrieren, da die Haupttätigkeit in der Überwachung und nicht in der Führung des UCAVs liegt. Im Falle einer Complementing OCU, deren Hauptaufgabe in der Führung der Plattform liegt, wäre eine bordseitige Integration im Regelfall geeigneter.

Insgesamt ergeben sich vier unterschiedliche Designoptionen (I-IV) zur Anordnung einer ACU im Arbeitssystem zur Führung eines UCAVs, wobei grundsätzlich auch Mischformen denkbar sind. In einem Arbeitssystem können sowohl eine SCU als auch eine OCU vorhanden sein. Die SCU könnte dabei disloziert (vgl. Arbeitssystem I) im UCAV und die OCU lokal (vgl. Arbeitssystem IV) in Bezug auf den Operateur angeordnet sein.

3.1.2 Festlegung des Basisdesigns

Am Institut für Flugsysteme wurden bereits verschiedene Forschungsarbeiten im Umfeld der Führung unbemannter aber auch bemannter Flugsysteme und Assistenzsysteme basierend auf der Theorie der kognitiven Automation [Onken & Schulte, 2010] durchgeführt. Einen Überblick samt Erläuterungen zu einigen dieser können dem Abschnitt 2.4.5 entnommen werden. Neben diesen existieren noch weitere Studien, welche jedoch nicht explizit im Abschnitt 2.4.5 aufgelistet wurden. Dazu zählen beispielsweise die entwickelten Assistenzsysteme CASSY (*Cockpit Assistant System*) [Onken & Prevot, 1994] und CAMA (*Crew Assistant Military Aircraft*) [Lenz & Onken, 2000], deren Aufgabe es war, den Piloten bei der Durchführung von Instrumentenflügen bzw. Lufttransportmissionen zu unterstützen. In der Arbeit ASC (*Agent Supervisory Control*) [Clauß et al., 2013] erfolgte die Untersuchung der Doppelrolle eines kognitiven Agenten als Untergebener des menschlichen Operateurs und als Leiter des automatisierten UAV-Systems. Eine weitere Arbeit stellt ZertAP (*Zertifizierbarer Autopilot*) [Wohler & Schulte, 2013] dar. Dabei wurde ein UAV mit einer OCU ausgestattet, mit dem Ziel die Systemzuverlässigkeit zu erhöhen, um einen Beitrag zur Integration der unbemannten Plattform in den zivilen Luftraum zu liefern. Der Fokus hierbei war die Entwicklung kognitiver Verarbeitungsansätze zur autonomen Verhaltensentscheidung an Bord des UAVs.

In Tabelle 3 sind die verschiedenen Forschungsarbeiten gemäß den prinzipiell möglichen vier Designoptionen der „Dual-Mode Cognitive Automation“ eingeordnet. Wie bereits erwähnt, können auch Mischformen der verschiedenen Designoptionen in einem Arbeitssystem vorliegen. Der Funktionsprototyp MUM-T verfügt beispielsweise über ein im bemannten Hubschrauber angeordnetes Assistenzsystem sowie über unbemannte Systeme mit integrierten SCUs, die auftragsbasiert (*Task based Guidance, TBG*) geführt werden. Dementsprechend können die beiden kognitiven Teilsysteme unterschiedlichen Bereichen zugeordnet werden.

	Supervisory Control	Cooperative Control
Dislozierte Anordnung	COSY ^{Flight} COSY ^{Team} KCV MUM-T TBG ASC	ZertAP (COSY ^{Team})
Lokale Anordnung	–	PILAS MUM-T Assistenzsystem MiRA-T CASSY CAMA

Tabelle 3: Einordnung verschiedener Forschungsarbeiten hinsichtlich der möglichen Designoptionen kognitiver Automation

Der Bereich der dislozierten Anordnung einer SCU in Bezug auf die menschliche Komponente in einem technischen System wurde bereits in mehreren Forschungsprojekten realisiert. Ebenso ist der Bereich einer lokal angeordneten OCU in Bezug auf den menschlichen Operateur als Teil der Operating Force ausgiebig in diversen Forschungsprojekten untersucht worden. Bei den entwickelten OCUs handelte es sich hauptsächlich um Assisting OCUs (vgl. Abschnitt 2.4.3), also um Assistenzsysteme zur Unterstützung des Piloten an seinem Arbeitsplatz.

Der Bereich in Tabelle 3, lokale Anordnung mit Verbindung von *supervisory control*, wurde im Zuge von wissenschaftlichen Arbeiten nicht wesentlich behandelt. Dies lässt sich auf die ständig benötigte Datenlinkverbindung zwischen der getrennt angeordneten SCU und der fliegenden Plattform zurückführen. Eine dislozierte Anordnung in Bezug auf den Operateur, also an Bord der Plattform, erscheint daher sinnvoller. Die letzte verbleibende Designoption stellt die dislozierte Anordnung in Verbindung zu einer *cooperative control* Beziehung dar. Als Vorreiterprojekt kann hier die Weiterentwicklung von COSY^{Team} angesehen werden (vgl. Abschnitt 2.4.5.5), jedoch kamen zur Ausgestaltung der Mensch-Maschine-Kooperation noch keine Verhaltensgrundsätze nach [Onken & Schulte, 2010] zum Einsatz. Gleiches gilt für ZertAP. [Meitinger, 2008] sah COSY^{Team} als einen Zwischenschritt von *supervisory control* zu *cooperativ control* an. Bis auf die Weiterentwicklung von COSY^{Team} und ZertAP wurden in diesem Bereich noch keine weiteren wissenschaftlichen Untersuchungen am Institut angestellt.

Im vorigen Kapitel wurde das Führungsparadigma der *supervisory control* bereits als ein Problemfeld in der Führung von mehreren unbemannten Systemen aufgezeigt. Kognitive Funktionen, wie Probleme lösen, Vorgehensweisen planen oder Entscheidungen treffen,

verbleiben stets beim menschlichen Bediener. In dieser Arbeit wird daher das Führungsparadigma der *cooperative control* angestrebt, um den Piloten bei der Bewältigung von kognitiven Aufgaben im Zusammenhang mit der Multi-UCAV Führung zu unterstützen. Bezogen auf die möglichen Designoptionen kann diese Arbeit daher in die rechte Spalte der Tabelle 3 eingeordnet werden. Wie im späteren Verlauf dieses Konzeptkapitels noch aufgezeigt wird, ist kognitive Automation im finalen Arbeitssystem sowohl lokal als auch disloziert zum Piloten anzufinden.

3.2 Arbeitssystemkonzept zur Führung unbemannter Luftfahrzeuge

Ziel des folgenden Abschnittes ist es, ein Arbeitssystemkonzept für die luftgestützte Führung mehrerer unbemannter Kampfflugzeuge aus einem einsitzigen Kampfflugzeug zu entwerfen. Zunächst wird im Abschnitt 3.2.1 eine Arbeitssystemanalyse eines vergleichbaren aber rein bemannten Kampfflugzeugteams (eine detailliertere Betrachtung kann in [Gangl, Lettl & Schulte, 2014] gefunden werden) und eines konventionellen, bemannt-unbemannten Teams durchgeführt. Ausgehend von diesen Erkenntnissen wird schrittweise im Abschnitt 3.2.3 unter Anwendung der Theorie der kognitiven Automation das Grundkonzept zur Führung mehrerer UCAVs aus einem einsitzigen Kampfflugzeug abgeleitet.

3.2.1 Analyse eines bemannten Kampfflugzeugteams

Bevor das Arbeitssystem für ein konventionelles, also rein bemanntes, Kampfflugzeugteam aufgestellt werden kann, muss vorab das grundlegende Szenario bekannt sein. Die wesentlichsten Aspekte des Szenarios werden daher im Folgenden kurz erläutert und gelten analog für nachfolgende Betrachtungen. Eine detaillierte Beschreibung des Szenarios kann dem Abschnitt 5.1.4 entnommen werden.

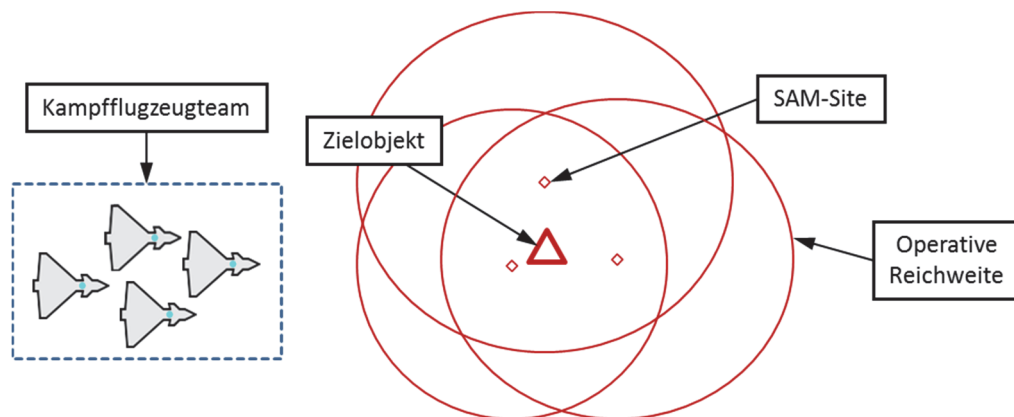


Abbildung 29: Skizzierte Luft-Boden-Angriffsmission mit feindlichen Kräften

Als Szenario wird eine militärische Luft-Boden-Angriffsmission verwendet (siehe Abbildung 29). Die Hauptaufgabe stellt die Bekämpfung eines von mehreren Flugabwehrstellungen, den sogenannten *SAM (Surface-to-Air Missile)-Sites*, beschützten Zielobjektes (rotes Dreieck) mit einer lasergelenkten Bombe dar. Die roten Kreise in Abbildung 29 entsprechen den operativen Reichweiten der Flugabwehrstellungen. Des Weiteren

stehen für die Auftragserfüllung mehrere Kampfflugzeuge mit entsprechender Ausrüstung an Effektoren und Sensoren zur Verfügung.

Die Gesamtfähigkeit des Teams ist auf die einzelnen Teammitglieder verteilt. Das bedeutet, nicht jedes Kampfflugzeug ist mit allen missionsrelevanten Ressourcen ausgestattet, um jede Teilaufgabe der Mission durchführen zu können. Ein Kampfflugzeug, der sogenannte *Attacker*, ist mit Ressourcen ausgestattet, um ein Bodenziel (*Interdiction Strike, IDS*) zu bekämpfen. Die verbleibenden Teammitglieder bilden zusammen ein Subteam und verfügen über Ressourcen, um unterstützende Aufgaben ausüben zu können (siehe Abbildung 30), wie die Unterdrückung von SAM-Stellungen (*Suppression of Enemy Air Defense, SEAD*), die Aufklärung (*Reconnaissance, RECCE*) und Markierung (*Designation*) von Objekten sowie die Durchführung eines Begleitschutzes (*Escort*) für den Attacker im feindlichen Missionsgebiet.

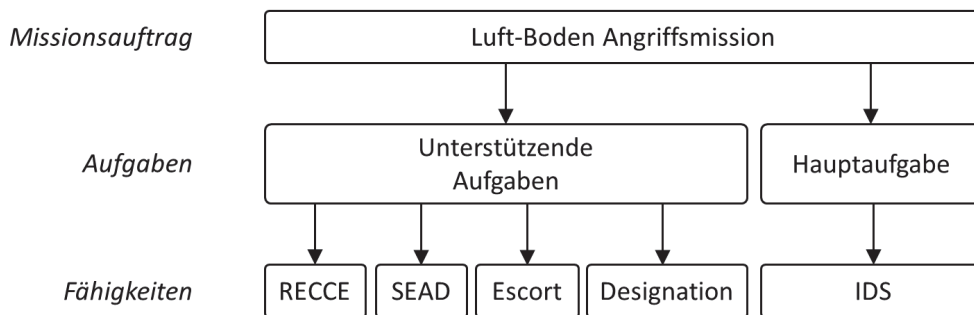


Abbildung 30: Benötigte Teamfähigkeiten zur Erfüllung des Missionsauftrages separiert in Haupt- und unterstützende Missionsaufgaben

In Abbildung 31 sind die Arbeitssysteme (vgl. Abschnitt 2.3.1) eines entsprechenden bemannten Kampfflugzeugteams für den soeben aufgezeigten Anwendungsfall dargestellt. Am Eingang wird das Arbeitsziel in der Form eines Missionsauftrages durch eine hierarchisch übergeordnete Kommandostelle dem Kampfflugzeugteam zugesprochen. Wie der Vorgang der Bekanntgabe im Detail vor sich geht, spielt an dieser Stelle keine Rolle. Entscheidend ist, dass jedes der Teammitglieder über das übergeordnete Arbeitsziel im Bilde ist und dementsprechend handeln kann. Am Ausgang der Arbeitssysteme sind die Veränderungen an der Umwelt, die durch das Einwirken der Kampfflugzeuge auf diese verursacht wurden, dargestellt. Erfüllt das Arbeitsergebnis die Vorgaben des Arbeitsziels, so kann von einer erfolgreichen Missionsdurchführung gesprochen werden. Im hier beschriebenen Anwendungsfall beinhaltet das Arbeitsziel die erfolgreiche Bekämpfung eines Zielobjektes.

Jeder Pilot bildet zusammen mit seinem Kampfflugzeug ein eigenständiges Arbeitssystem. Der Pilot repräsentiert die OF und das Kampfflugzeug das dazugehörige Arbeitsmittel. Zwischen diesen besteht vorwiegend eine *supervisory control* Beziehung. Die durch den grünen Pfeil im Arbeitssystem gekennzeichnet ist. Eine wesentliche Aufgabe des Piloten stellt die Überwachung und Änderung von systemspezifischen Parametern der an Bord integrierten konventionellen Automationssysteme des zugeordneten Kampfflugzeuges dar.

Zwischen den Piloten der verschiedenen Arbeitssysteme besteht eine kooperative Beziehung, die durch eine rote Umrandung in der Abbildung 31 angedeutet ist. Das Kampfflugzeugteam ist somit in der Lage, durch gemeinschaftliches Zusammenwirken das übergeordnete Arbeitsziel zu verfolgen. Dazu werden Informationen von einem Arbeitssystem in die verbleibenden transferiert. In Abbildung 31 ist dies durch die Linienverläufe hervorgehoben, die von den Ausgängen der unterschiedlichen Arbeitssysteme zu

den Schnittstellen der Umgebungsbedingungen der verbleibenden verlaufen. Anzumerken ist in diesem Zusammenhang, dass in militärischen Teams grundsätzlich eine hierarchische Beziehung zwischen den einzelnen Teammitgliedern besteht. Einem Teamführer sind die verbleibenden Teammitglieder unterstellt. Die kooperative Zusammenarbeit findet dennoch auf einer gleichberechtigten Ebene statt. In Situationen, in denen eine Uneinigkeit im Team vorliegt, kann der Teamführer eine bindende Entscheidung bzw. Anweisung aussprechen.

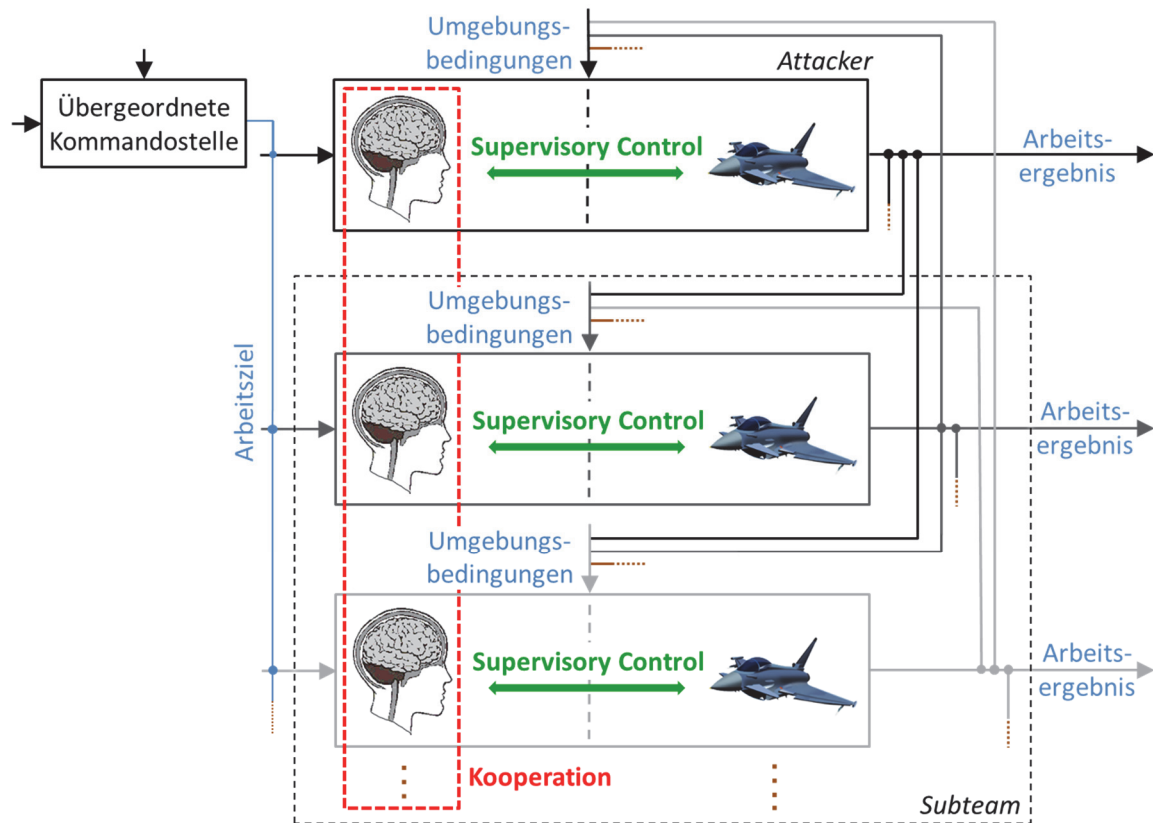


Abbildung 31: Arbeitssysteme eines bemannten Kampfflugzeugteams

Im betrachteten Anwendungsfall spielen vor allem die Umgebungsbedingungen, taktische Lage, aber auch Gesichtspunkte, wie das Wettergeschehen im Einsatzgebiet eine Rolle. Informationen dazu können entweder von einem Teammitglied, Sensoren oder auch von einer externen Stelle, wie einer übergeordneten Kommandostelle, stammen. Die taktische Lage spiegelt die vorliegende bekannte Missionssituation wider. Diese kann sich im Zuge der Missionsausführung sehr dynamisch, beispielsweise durch neu detektierte feindliche Flugabwehrstellungen, ändern. Allgemein zählen zur taktischen Lage alle Informationen über Feind- und Freundkräfte sowie relevante Missionselemente, wie Stützpunkte oder Flugbeschränkungsgebiete. Auch hat das Wettergeschehen im hier betrachteten Anwendungsfall eine unmittelbare Auswirkung auf die Durchführung der Mission. Eine Zielbeleuchtung kann mittels eines Laserdesignators grundsätzlich nur dann durchgeführt werden, wenn zwischen dem Beleuchter und dem Zielobjekt Sichtkontakt (frei von Wolken) besteht. Eine vorhandene Wolkenschicht kann gleichzeitig einen visuellen Sichtschutz vor bodenstationierten feindlichen Bedrohungen bieten.

3.2.2 Analyse eines bemannt-unbemannten Kampfflugzeugteams

Als Ausgangsbasis zur Konzeptionierung des bemannt-unbemannten Arbeitssystems dient die in Abschnitt 3.2.1 erläuterte, rein bemannte Teamkonstellation. Darüber hinaus werden Erkenntnisse aus dem Vorgängerprojekt (vgl. Abschnitt 2.4.5.5) herangezogen. Hierbei konnte mittels Experteninterviews festgehalten werden, dass ein menschliches Teammitglied innerhalb eines bemannt-unbemannten Teams in militärischen Operationen über eine hervorgehobene Position verfügen möchte und auch soll. Diese Aussage konnte von [Meitinger, 2008] zusätzlich über die erfassten Werte der subjektiven Beanspruchung in Abhängigkeit von der Aufgabenrolle (vgl. Abbildung 27) belegt werden. Um dies in den Arbeitssystemansatz einfließen lassen zu können, wird dem Piloten eine übergeordnete hierarchische Teamstellung sowie herausragende Position in funktionaler Hinsicht eingeräumt. Der Pilot soll daher im bemannt-unbemannten Team neben der Erfüllung der Teamführerrolle auch für die eigentliche Bekämpfung des Zielobjektes zuständig sein.

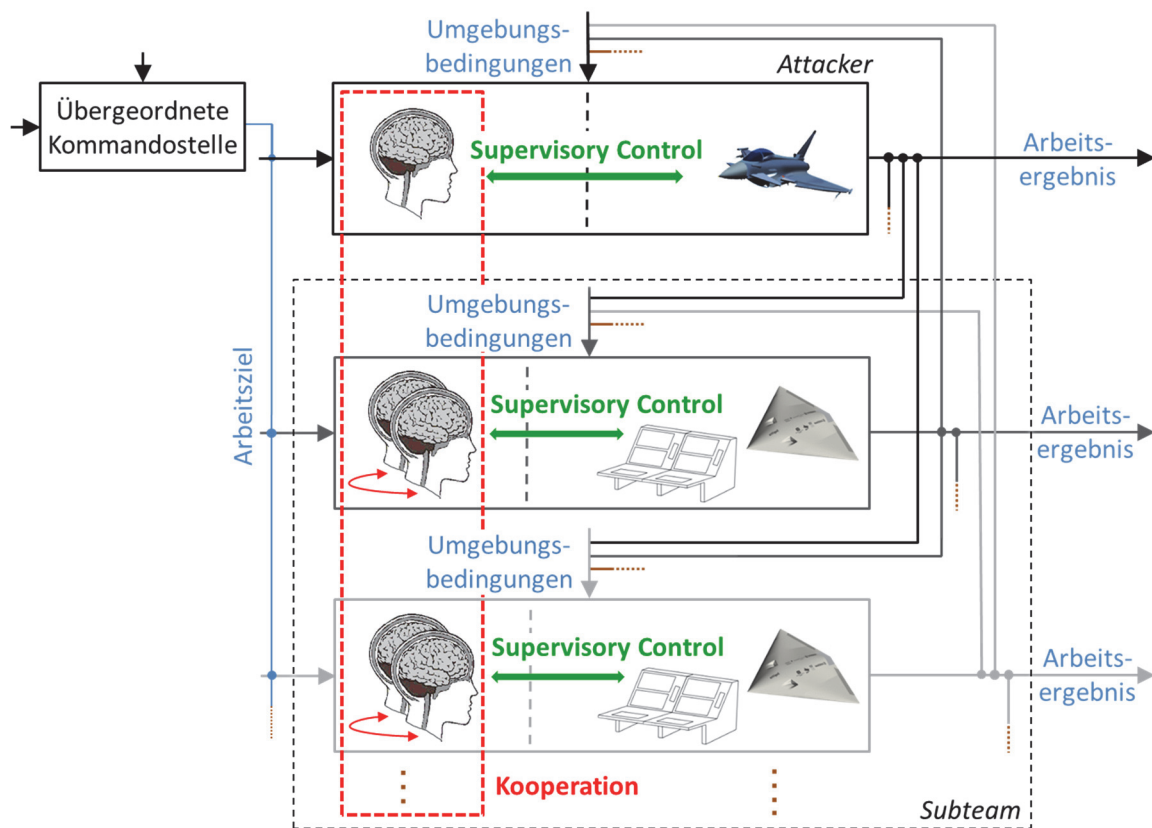


Abbildung 32: Arbeitssysteme eines bemannt-unbemannten Kampfflugzeugteams

Im Folgenden werden die Teammitglieder des Subteams der ursprünglich rein bemannten Teamkonstellation durch herkömmliche unbemannte Systeme ersetzt. Für die Führung der UCAVs wird exemplarisch eine in modernen UAV-Systemen häufig anzutreffende Bedienmannschaft angenommen. Diese besteht aus einem AVO und MPO (vgl. Abschnitt 2.1.1). Das resultierende Gesamtsystem, dargestellt in Abbildung 32, setzt sich aus mehreren, allerdings verschiedenartigen Arbeitssystemen zusammen. Ein Arbeitssystem repräsentiert das bemannte Kampfflugzeug und die verbleibenden unbemannten Systeme. Unabhängig vom betrachteten Arbeitssystem stehen die Mitglieder der OF in einem *supervisory control* Verhältnis zu den dazugehörigen Plattformen und/oder Nutzlasten. Die UCAV-Operateure benötigen zusätzlich zur Plattform eine Kontrollstation als technisches Arbeitsmittel, um

die Führung der unbemannten Systeme samt Nutzlast bewerkstelligen zu können. Die Kontrollstationen können bodengebunden oder auch in einem Luftfahrzeug, wie in einem AWACS (*Airborne Warning and Control System*), angeordnet sein. Zwischen den Operateuren eines UCAVs sowie zwischen den Operateuren unterschiedlicher UCAV-Plattformen und dem Piloten liegen kooperative Beziehungen vor.

Für die Führung von herkömmlichen unbemannten Systemen sind am Markt bzw. im Forschungssektor bereits verschiedenste Automationsfunktionalitäten mit unterschiedlichen Technologiereifegraden verfügbar. So zählen, wie bereits eingehender ausgeführt, der Autopilot oder das Flight Management System (vgl. Abschnitt 2.1.3) im Bereich der Führung der Plattform zu wichtigen Vertretern. Im Hinblick auf diese Forschungsarbeit spielen auch Automationsfunktionen auf den Gebieten der Kollisions- und Hindernisvermeidung (siehe z.B. [Utt, McCalmont & Deschenes, 2005][Watanabe, Calise & Johnson, 2007]), der Trajektorien- und Pfadplanung (siehe z.B. [Bortoff, 2000][Besada-Portas, de la Torre, de la Cruz & de Andrés-Toro, 2010]) zur Erstellung von Flugrouten oder auch dem Formations- bzw. Schwarmflug (siehe z.B. [Wang, Yadav & Balakrishnan, 2007] [Sauter, Matthews, Parunak & Brueckner, 2005]) in kontrollierten sowie nicht kontrollierten Lufträumen eine Rolle. In den nachfolgenden Betrachtungen wird davon ausgegangen, dass diese Automationsfunktionen in den benötigten Umfängen und Technologiereifegraden in den einzelnen UCAVs zur Verfügung stehen.

3.2.3 Einbringung von kognitiver Automation

Der Pilot des bemannten Kampfflugzeuges soll in dieser Arbeit neben der Führung seines eigenen auch für die luftgestützte Führung der drei unbemannten Kampfflugzeuge zuständig sein. Die Beweggründe dafür, wie z.B. Erhöhung der Effizienz bei geringerem Personalaufwand/-kosten oder effektivere Gestaltung der Informationsflüsse im Team, wurden bereits in Kapitel 1 dargelegt. Bezogen auf das Arbeitssystem in Abbildung 32 muss der Pilot somit prinzipiell die Tätigkeiten aller UCAV-Operateure (2 Operateure pro UCAV) übernehmen. Bei Verwendung von konventionellen Automationssystemen zur Führung der UCAVs kann davon ausgegangen werden, dass der Kampfflugzeugpilot diese zusätzliche Aufgabe nicht unter vertretbarer Arbeitsbelastung bewältigen kann (vgl. dazu Kapitel 2).

Um trotzdem das Ziel, der Führung mehrerer UCAVs aus einem einsitzigen Kampfflugzeug, zu erreichen, wird an dieser Stelle auf die kognitive Automation [Onken & Schulte, 2010] zurückgegriffen (vgl. Abschnitt 2.4). In Abschnitt 3.1.2 wurde dazu bereits das Basisdesign des Arbeitssystemkonzepts in groben Zügen festgelegt. Hierzu soll die kognitive Automation auf der Seite der OF als kooperierender Partner in das Arbeitssystem eingebracht werden, um vor allem die bereits erwähnten Probleme mit *supervisory control* zu umgehen. Betrachtet man zunächst ein singuläres Arbeitssystem eines unbemannten Systems (siehe Abbildung 33) und ersetzt die Operateure samt Kontrollstation durch einen kognitiven Agenten, so resultiert daraus kein Arbeitssystem mehr. Per Definition nach [Onken & Schulte, 2010] muss mindestens ein Mensch auf der Seite der OF enthalten sein. Das bedeutet, die einzelnen Komponenten (kognitiver Agent, unbemannte Plattform) wandern in ein anderes Arbeitssystem, in dem ein Mensch enthalten ist.

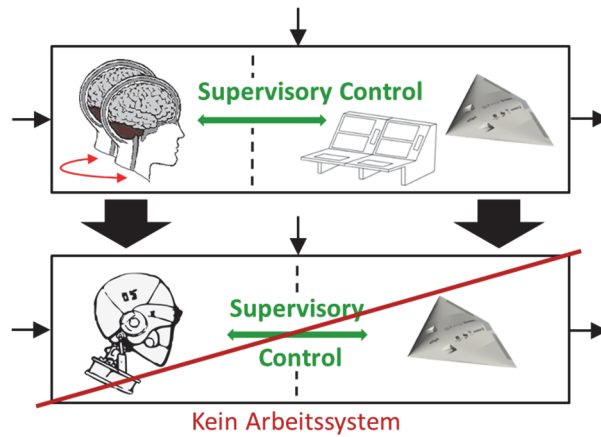


Abbildung 33: Ersetzen der UCAV-Operateure durch kognitive Automation führt nicht zu einem eigenständigen Arbeitssystem

Werden nun alle Arbeitssysteme der unbemannten Teammitglieder aus Abbildung 32 dementsprechend abgeändert, so lässt sich ein Arbeitssystem zur Führung mehrerer UCAVs durch einen Piloten unter Einbeziehung von kognitiver Automation ableiten. Im resultierenden Arbeitssystem, dargestellt in Abbildung 34, steht jeder kognitive Agent in Verantwortung jeweils eine unbemannte Plattform über eine *supervisory control* Beziehung zu führen. Bei diesen Agenten handelt es sich um Complementing OCUs (vgl. Abschnitt 2.4.3), also um zusätzliche Teammitglieder, welche die Fähigkeiten des Arbeitssystems erweitern. Die Anordnung der OCUs erfolgt sinnvollerweise aus den in Abschnitt 3.1.1 erläuterten Gründen disloziert zum Piloten. Zwischen den einzelnen Mitgliedern der OF existiert ein kooperatives Verhältnis, wobei der Pilot die Rolle des Teamführers übernimmt. Des Weiteren ist aus dem Arbeitssystem ersichtlich, dass der Pilot über keinen direkten Zugriff auf die an Bord der UCAVs befindlichen Automationssysteme besitzt. In diesem Arbeitssystem ist ausschließlich die OCU für die Bedienung und Überwachung der konventionellen Automation sowie Nutzlast der dazugehörigen unbemannten Plattform in der Assistenzsystemrolle *permanently substituting assistance* [Onken & Schulte, 2010] verantwortlich. Es besteht grundsätzlich die Möglichkeit, dass der Pilot kooperativ Einfluss auf die Führung der UCAVs samt Nutzlast nehmen kann. Eine Kooperation der OCUs untereinander, ohne dass der Pilot notwendigerweise darauf dedizierten Einfluss nehmen muss, ist in dieser Konstellation ebenfalls denkbar.

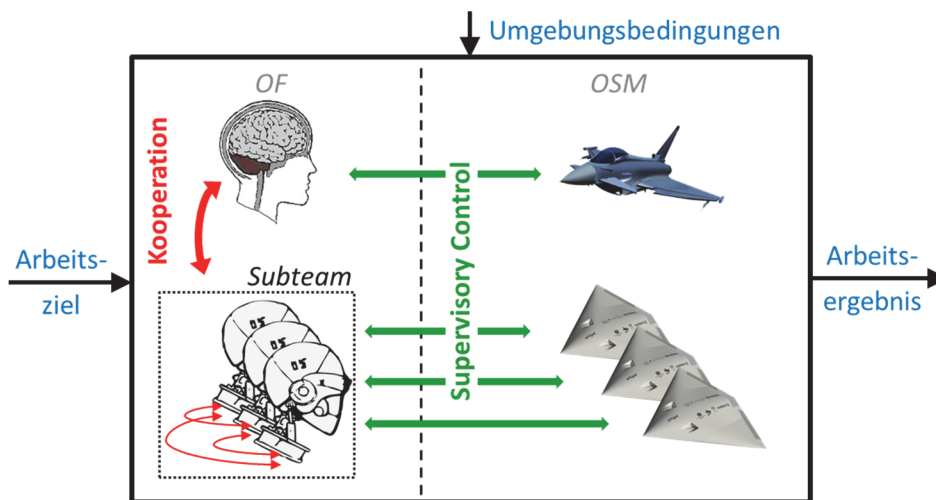


Abbildung 34: Abgeleitetes Arbeitssystem zur Führung mehrerer UCAVs unter Einsatz von kognitiver Automation

Der verbleibende Pilot hat im Arbeitssystem die Verantwortung für die Führung der UCAVs. Um diese Mehrbelastung sehr gering ausfallen zu lassen, soll die Führung auf einer hohen und abstrakt gehaltenen Eingriffsebene stattfinden. Heute am Markt erhältliche Systeme werden oftmals auf einer FMS-basierten Ebene geführt. Hinsichtlich dieser Eingriffsebene hat bereits [Donath, 2012] in experimentellen Untersuchungen nachgewiesen, dass eine FMS-basierte Führung von drei unbemannten Luftfahrzeugen aus einem Zwei-Mann-Hubschraubercockpit durch einen „Vollzeit“ UAV-Operator nicht unter vertretbarer mentaler Beanspruchung möglich ist. Eine abstraktere Ebene stellt beispielsweise die von [Uhrmann, 2013] im Rahmen des Projektes MUM-T untersuchte *aufgabenbasierte Führung* dar (vgl. Abschnitt 2.4.5). Doch auch dieser Führungsansatz erforderte eine separate Person, den Kommandanten des Hubschraubers. Auch musste die ursprüngliche Aufgabenteilung zwischen dem Piloten und dem Kommandanten abgeändert werden [Benzler et al., 2011], um über freie Kommandantenkapazitäten zur Multi-UAV Führung verfügen zu können.

Eine weitere, noch abstraktere Möglichkeit zur Führung der UCAVs stellt eine *teambasierte Führung* (siehe z.B. [Gangl, Lettl & Schulte, 2013a][Gangl et al., 2014]) dar. Bei dieser Art der Führung werden nicht einzelne Missionsteilaufgaben an ein bestimmtes UCAV übergeben, vielmehr werden gesamte Aufgabenpakete an das unbemannte UCAV-Team übertragen. Die Aufteilung der darin enthaltenen Teilaufgaben erfolgt im Team eigenständig gemäß deren Fähigkeiten. Voraussetzung dafür sind kooperative Fähigkeiten zwischen den einzelnen Agentensystemen. Benötigt ein Pilot unter Verwendung einer derartigen Mensch-ACU-Konstellation die Unterdrückung von Flugabwehrstellungen in einem Operationsgebiet, so setzt dieser sein unbemanntes Team darüber in Kenntnis. Die dabei implizierten Aufgaben werden eigenständig vom unbemannten Team gemäß den freien Ressourcen und Fähigkeiten verteilt. Ähnliche Ansätze wurden beispielsweise auch in [Baxter & Horn, 2005][Meitinger, 2008][Cummings, 2015] verfolgt.

Damit der teambasierte Führungsansatz in das Arbeitssystemkonzept transferiert werden kann, werden die einzelnen OCUs zu einem virtuellen Team, dem sogenannten *OCU-Subteam*, zusammengefasst. Durch diese Aggregation sinkt die Anzahl der Kooperationspartner des Piloten von ursprünglich mehreren auf einen einzigen Teamvertreter. In Abbildung 35 ist das ursprüngliche Arbeitssystem um die teambasierte Führung erweitert worden.

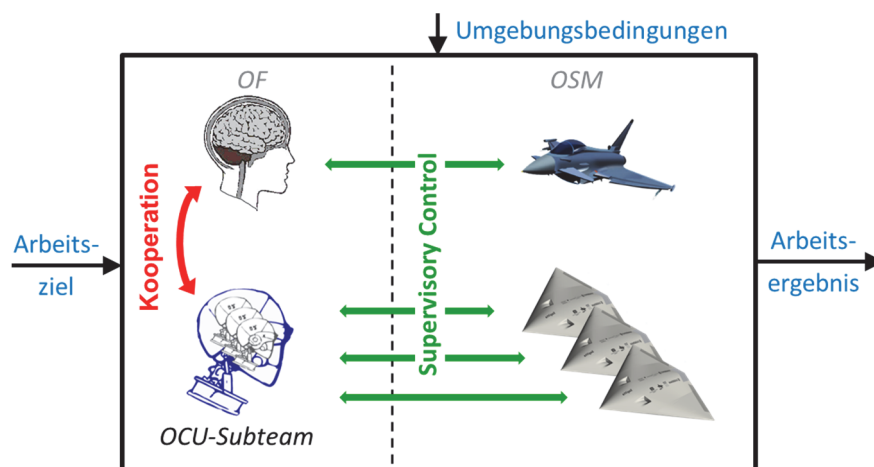


Abbildung 35: Erweitertes Arbeitssystem zur teambasierten Führung mehrerer UCAVs

Hervorzuheben in diesem Arbeitssystem ist, dass trotz Zusammenfassung der kognitiven Agenten zu einem OCU-Subteam nach wie vor jedes UCAV mit einer eigenen OCU ausgestattet ist. Diese werden nicht physisch, sondern funktional zu einem virtuellen Team zusammengeschlossen.

Prinzipiell muss jeder dieser kognitiven Agenten im erweiterten Arbeitssystem (siehe Abbildung 35) über ähnliche Fähigkeiten wie die Operateure eines äquivalenten UCAV-Systems (vgl. Abschnitt 3.2.2) verfügen. Jeder kognitiver Agent muss in der Lage sein, die dazugehörige Plattform in einer *supervisory control* Beziehung zu führen, selbstständig Missionsaufgaben zu bearbeiten und mit anderen Teammitgliedern der OF zu kooperieren. Einige dieser benötigten ACU-Fähigkeiten wurden bereits in verschiedenen Funktionsprototypen am Institut für Flugsysteme integriert und erfolgreich getestet (siehe dazu auch Abschnitt 2.4.5). Ein noch gänzlich unbehandelter Bereich stellt die Ausgestaltung der kooperativen Beziehung zwischen einem Menschen und mehreren OCUs im Anwendungsfall der teambasierten Führung dar. Die Fragestellung, wie eine solche Mensch-ACU-Kooperation schlussendlich gestaltet werden kann, wird in den nachfolgenden Abschnitten behandelt.

3.3 Weiterführende konzeptionelle Überlegungen

Nachdem im vorhergehenden Abschnitt ein Arbeitssystem zur teambasierten Führung mehrerer UCAVs vorgestellt worden ist, beschäftigt sich dieser Abschnitt mit weiterführenden konzeptionellen Überlegungen zur Ausgestaltung der im Arbeitssystem vorliegenden Mensch-Maschine-Kooperation zwischen dem Piloten und dem OCU-Subteam. Neben dieser kooperativen Beziehung besteht innerhalb des unbemannten Teams ein weiteres kooperatives Verhältnis. Hierbei handelt es sich um eine reine Maschine-Maschine-Kooperation. Diese Art der Kooperation wird im Rahmen dieser Arbeit nicht explizit betrachtet, stellt allerdings eine für die hier angestellten Überlegungen wichtige Determinante dar. Zur Thematik der Maschine-Maschine-Kooperation sei auf die Arbeit von [Meitinger, 2008] verwiesen.

Ausgehend von der Betrachtung der in diesem Anwendungsfall vorliegenden Teamstruktur in Abschnitt 3.3.1, werden verschiedene Hauptaspekte zur Kooperation, welche wesentliche Einflüsse auf die Ausgestaltung der Mensch-Maschine-Beziehung nehmen, im Abschnitt 3.3.2 abgeleitet. Im Anschluss daran werden im Abschnitt 3.3.3 und 3.3.4 die kooperative Teamkoordination mit den dazugehörigen Prozessen und domänenspezifischen Informationsanforderungen, um eine effektive Ausprägung dieser zu erzielen, diskutiert. Abschließend behandelt der Abschnitt 3.3.5 die verschiedenen Arten und Formen der Kommunikation sowie deren Eigenschaften, um eine möglichst gut gestaltete Kommunikation zwischen dem Piloten und den unbemannten Kräften zu realisieren.

3.3.1 Teamstrukturen

Ein Team wird durch den Zusammenschluss von mehreren Entitäten der OF gebildet, um kooperativ an der gemeinschaftlichen Erfüllung eines übergeordneten Ziels zu arbeiten. Eine häufig anzutreffende Teamdefinition stellt die von [Salas, Dickinson, Converse & Tannenbaum, 1992] dar:

“[...] a distinguishable set of two or more people who interact, dynamically, interdependently, and adaptively toward a common and valued goal/objective/mission, who have each been assigned specific roles or functions to perform, and who have a limited life-span of membership.”

Neben dieser Definition sind in der Literatur weitere, etablierte Definitionen zu finden (siehe z.B. [Hackman, 1987][Guzzo & Dickson, 1996][Sundstrom, De Meuse & Futrell, 1990]). In allen diesen Definitionen begründet der Zusammenschluss von mindestens zwei Personen zur gemeinsamen Bearbeitung einer Aufgabe für eine limitierte Zeitdauer ein Team. Die Teammitglieder können unter Einbeziehung der Theorie der kognitiven Automation neben Personen auch von OCUs bekleidet werden. Ein weiteres Merkmal der angeführten Teamdefinitionen stellt die gemeinschaftliche Bearbeitung einer übergeordneten Aufgabe dar. Im Umkehrschluss bedeutet dies, dass zwischen den Teammitgliedern kein konkurrierendes Verhältnis vorliegt, sondern sich die einzelnen Teammitglieder gegenseitig unterstützen, um das gemeinschaftliche Ziel zu erreichen. Es besteht somit eine wechselseitige Abhängigkeit der Leistungen der jeweiligen Teammitglieder untereinander. Zusätzlich dazu wird in der Definition von [Salas et al., 1992] auch explizit auf die Zuweisung von *Rollen* oder Funktionen an einzelne Teammitglieder hingewiesen. Eine Rolle fasst verschiedene Funktionen oder Tätigkeiten zusammen, die ein Teammitglied innehat. So kann beispielsweise ein Teammitglied in einer militärischen Einsatzmission die Rolle eines Aufklärers ausüben. Innerhalb eines Teams können Mitglieder identische sowie verschiedene Rollen einnehmen.

Die Zuweisung dieser Rollen innerhalb eines Teams erfolgt im militärischen Bereich grundsätzlich über eine übergeordnete Kommandostelle unter Berücksichtigung der Fähigkeiten des Einzelnen. Die Fähigkeiten der Teammitglieder können sowohl ähnlich als auch sehr unterschiedlich (also ergänzend) ausfallen. Dementsprechend liegt eine *homogene* oder *heterogene Teamkomposition* vor. Der Vorteil eines homogenen Teams liegt in der ähnlichen Denkweise und dem daraus resultierenden Verständnis für die Handlungsweisen der anderen Mitglieder. Allerdings ist ein solches Team in der Regel in seinen Fähigkeiten beschränkt. In einem heterogenen Team verfügen Teammitglieder über unterschiedliche, meist ergänzende Fähigkeiten. Durch das unterschiedliche Wissen ist es oft schwierig, die Handlungsweisen der anderen Mitglieder im Einzelnen nachvollziehen oder vorhersehen zu können. Diesem Problem kann durch ausreichendes Teamtraining entgegengewirkt werden (siehe z.B. [Guzzo & Dickson, 1996][Salas et al., 2008]).

Nach [Onken & Schulte, 2010] stellt die Voraussetzung für die Erzielung einer guten Teamleistung eine klare *Teamstrukturierung* dar. Durch eine entsprechende Rollenverteilung innerhalb eines Teams entsteht eine statische Teamstruktur, die sich im Laufe des Zusammenwirkens aufgrund dynamischer Prozesse ändern kann. Beispielsweise kann es aufgrund eines unerwarteten Problems (z.B. technischer Defekt) zu einem Rollentausch zwischen Teammitgliedern kommen.

Verfügen in einem Team mehrere Mitglieder über dieselben Fähigkeiten, stellt sich die Frage, wie die Verteilung von Aufgaben und somit Verantwortlichkeiten zwischen diesen erfolgen kann. Dazu kann die Strukturierung eines Teams neben der Eingliederung nach den Rollen auch bezüglich der Verantwortlichkeit vorgenommen werden. Im Allgemeinen kann zwischen *hierarchischen* und *nicht hierarchischen Teamstrukturen* unterschieden werden (siehe z.B. [Urban, Weaver, Bowers & Rhodenizer, 1996][Paris, Salas & Cannon-Bowers, 2000][Biggers & Ioerger, 2001]).

In einer hierarchischen Struktur liegen unterschiedliche Rangordnungen zwischen den jeweiligen Teammitgliedern vor. Der Ranghöchste, der Teamführer, weist den untergebenen Teammitgliedern dedizierte Aufgaben zu und trägt grundsätzlich auch die Verantwortung für die Zielerfüllung. Die restlichen Teammitglieder sind ausschließlich für die Erfüllung der zugewiesenen Aufgaben und die damit im Zusammenhang stehenden Entscheidungen verantwortlich.

In nicht hierarchischen Teamstrukturen, die von [Biggers & Ioerger, 2001] auch als verteilte Teamstruktur bezeichnet werden, existieren keine hierarchischen Verhältnisse zwischen den einzelnen Teammitgliedern. Alle Teammitglieder sind sozusagen im betrachteten Arbeitssystem gleichgestellt. Die Teammitglieder können untereinander in Kontakt treten, um sich abzustimmen, welches Mitglied welche Aufgabe zu welchem Zeitpunkt bearbeiten soll [Biggers & Ioerger, 2001]. Damit eine solche Teamstruktur überhaupt funktionieren kann, muss eine allgemeine Bereitschaft der Mitarbeit zur Verfolgung des übergeordneten Arbeitsziels bei allen Teammitgliedern vorhanden sein. Das Team hat die Verantwortung alle Aufgaben, die bearbeitet werden müssen, auf die einzelnen Teammitglieder entsprechend deren Fähigkeiten und Ressourcen zu verteilen. Darüber hinaus muss jedes Teammitglied den Arbeitsfortschritt jedes anderen Teammitgliedes kennen, die unmittelbar Auswirkungen auf seine eigenen Tätigkeiten nehmen. Nach [Paris et al., 2000] ist der Koordinations- und Kommunikationsaufwand grundsätzlich höher einzustufen als in einer hierarchischen Teamstruktur.

Die erläuterten Teamstrukturen im Hinblick auf die Einteilung nach Verantwortlichkeit können in dem erarbeiteten Arbeitssystem (siehe Abbildung 35) sowohl zwischen dem Piloten und den OCU-Subteam als auch zwischen den OCUs prinzipiell vorliegen. Dem Piloten wurde bereits im Abschnitt 3.2.2 die Aufgabe des Teamführers sowie die IDS-Rolle in der Mission zugeordnet. Zwischen dem Piloten und dem OCU-Subteam liegt somit eine hierarchische Teamstruktur vor. Innerhalb des unbemannten Teams nehmen alle Mitglieder denselben hierarchischen Rang ein und sind zuständig für die Ausübung unterstützender Tätigkeiten, um effektiv das gemeinschaftliche Ziel zu erreichen. In Abbildung 36 ist neben der Zuweisung der Verantwortlichkeiten auch die Verteilung der Rollen im heterogenen Team aufgezeigt.

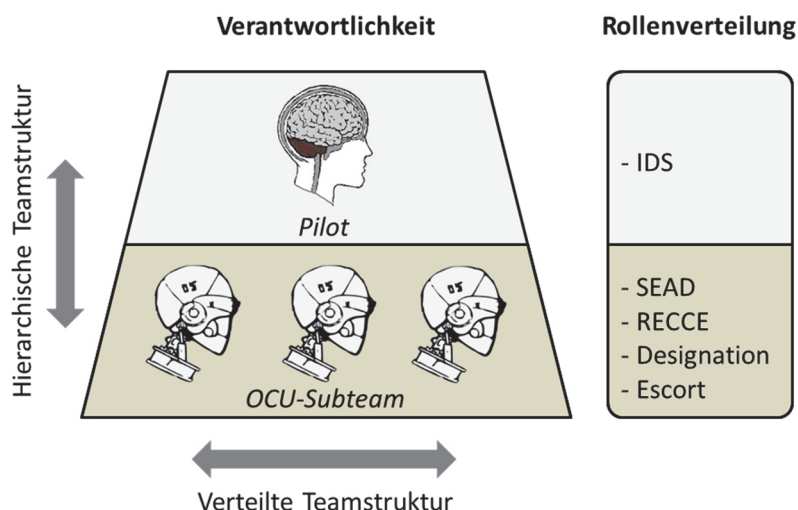


Abbildung 36: Vorliegende Teamstrukturen im erweiterten Arbeitssystem zur teambasierten Führung von mehreren UCAVs aus einem einsitzigen Kampfflugzeug (vgl. Abbildung 35)

3.3.2 Kooperation zwischen Teammitgliedern

Arbeiten mehrere Menschen und/oder auch kognitive Agenten in einem Team gemeinschaftlich an der Erfüllung eines Arbeitsziels, welches sich aus mehreren einzelnen Teilaufgaben zusammensetzt, so fällt ein höherer Arbeitsaufwand an. Dieser Mehraufwand wird durch verschiedenste Tätigkeiten im Zuge der Kooperation zwischen den beteiligten Mitgliedern im Team verursacht. Das bedeutet auch, dass die beste und effektivste Lösung die Bearbeitung des Arbeitsziels durch eine Einzelperson prinzipiell darstellen würde. Allerdings gibt es verschiedene Gründe, die eine Zusammenarbeit und somit Kooperation zur gemeinschaftlichen Bearbeitung einer übergeordneten Aufgabe sinnvoll oder gar unumgänglich machen können. Dazu zählen (vgl. [Jennings, 1996] [Wooldridge, 2002] [Onken & Schulte, 2010]):

- Kein Teammitglied verfügt über ausreichende Fähigkeiten, Ressourcen oder Informationen, um die gesamte Aufgabenstellung alleine zu bearbeiten.
- Es existieren Abhängigkeiten zwischen Aktivitäten einzelner Teammitglieder im Hinblick auf eine gemeinsame genutzte Ressource oder Ergebnisse einer vorher abgeschlossenen Aktivität.
- Die Effektivität des zugrunde liegenden Arbeitsprozesses oder die Qualität des Arbeitsergebnisses kann durch die Zusammenarbeit gesteigert werden.

Trifft mindestens einer dieser Gründe zu, ergibt sich daraus die Notwendigkeit zur Kooperation zwischen Teammitgliedern. Dem in dieser Arbeit betrachteten Problem kann jeder dieser drei Punkte grundsätzlich zugeordnet werden. Kein einziges Teammitglied verfügt über die Fähigkeiten sowie Ressourcen, um die Mission eigenständig durchführen zu können. Beispielsweise kann durch die bereits festgelegte Rollenaufteilung der Pilot durch fehlende Bewaffnung keine feindliche Flugabwehrstellung unterdrücken. Zwischen den einzelnen auszuführenden Teilaufgaben bestehen oftmals sehr enge Abhängigkeiten. So kann z.B. der Pilot erst dann das Zielobjekt mit einem Wirkmittel bekämpfen, wenn dieses zuvor von einem anderen Teammitglied aufgeklärt worden ist. Auch sind durch die Zusammenarbeit Effektivitätssteigerungen im Arbeitsprozess zu erwarten, vor allem durch die Fähigkeit zur parallelen Bearbeitung von Teilaufgaben.

Für weiterführende konzeptionelle Überlegungen zur Gestaltung der Kooperation zwischen dem Piloten und dem OCU-Subteam ist es notwendig abzuklären, welche primären Aspekte einen unmittelbaren Einfluss auf die kooperative Leistung nehmen. Dazu sei zunächst aus dem Umfeld der Arbeitspsychologie folgende Definition nach [Hacker & Pierre, 2014] genannt:

„Unter Kooperation oder kooperativer Tätigkeit wird eine Tätigkeits- bzw. Arbeitsform verstanden, bei der mehrere einen Auftrag bzw. eine selbstgestellte Aufgabe gemeinschaftlich erfüllen, dazu gemeinsame Zielstellungen verfolgen, eine Ordnung ihres Zusammenwirkens aufweisen und in auftragsbezogenen Kommunikationen miteinander stehen.“

Neben dieser Definition sind in der Literatur weitere Definitionen, wie in [Deutsch, 1962] [Elke, Konradt, Majonica & Zimolong, 1993][Millot & Lemoine, 1998][Hoc, 2001] [Borghoff & Schlichter, 2000] zu finden. In diesen Beschreibungen ist grundsätzlich von einem gemeinsamen übergeordneten Ziel sowie Abhängigkeiten zwischen den Teammitgliedern die Rede. Aus diesen Definitionen können zusammengefasst drei grundlegende Aspekte zur Kooperation abgeleitet werden:

- die gemeinschaftliche und zielstrebige Verfolgung eines übergeordneten Ziels,

- die aktive Koordinierung voneinander abhängiger Aufgaben zwischen den involvierten Teammitgliedern,
- die Kommunikation einzelner Teammitglieder untereinander.

Bei genauerer Betrachtung dieser drei Aspekte könnte geschlussfolgert werden, dass Kooperation unweigerlich mit Koordination gleichzusetzen ist, insofern alle Teammitglieder gemeinschaftlich an der Erfüllung des Arbeitsziels arbeiten. Das ist nicht der Fall. Bei der Koordination kann die Abstimmung der Arbeitsprozesse der einzelnen Teammitglieder prinzipiell auch von einer Instanz außerhalb des Arbeitssystems vorgenommen werden. Hierbei würde sich die Koordination hauptsächlich auf zeitliche und räumliche Aspekte beziehen. Eine Kommunikation zwischen den Einzelnen ist nicht zwingend erforderlich. Ein Beispiel dafür ist die Fertigungsstraße zur Produktion eines Kraftfahrzeuges. Jeder der Fließbandmitarbeiter kennt seine Aufgaben und die damit verbundenen Aktivitäten. Diese Aktivitäten werden in Bezug auf das übergeordnete Arbeitsziel, ein Auto zu produzieren, koordiniert ausgeführt. Zunächst muss eine Fahrzeugachse montiert werden, bevor die Räder befestigt werden können. In diesem geschilderten Herstellungsprozess handelt es sich um einen relativ statischen Ablauf, welcher grundsätzlich nur zeitliche Koordination von bestimmten Tätigkeiten zwischen den Beteiligten verlangt. Die Koordinationsabläufe werden bei der Planung des Herstellungsprozesses durch Dritte festgelegt. Hingegen erfolgt bei der Kooperation nach [Elke et al., 1993] die Abstimmung der verschiedenen Arbeitsprozesse durch die aktive Beteiligung aller betroffenen Teammitglieder eigenständig.

Neben diesen Hauptaspekten wirkt sich auch das Vertrauen (vgl. Abschnitt 2.3.3), welche als eine rein Mensch bezogene Eigenschaft angesehen werden kann, auf die Qualität der Kooperation aus (siehe z.B. [Deutsch, 1962][Parasuraman & Miller, 2004]). Für weiterführende Informationen zu dem Thema Vertrauen im Umfeld der bemannt-unbemannten Kooperation sei hier auf die Arbeit von [Lettl & Schulte, 2013] verwiesen.

Unter Berücksichtigung der soeben hergeleiteten Erkenntnisse arbeiten die Entitäten der Operating Force in dem Abschnitt 3.2.3 hergeleiteten Arbeitssystem gemeinschaftlich und eng an der Erfüllung des übergeordneten Arbeitsziels in einem kooperativen Verhältnis zusammen. Dabei wird in diesem Anwendungsfall, wie es im militärischen Kontext üblich ist, der Auftrag (Arbeitsziel) von einer übergeordneten Kommandostelle vorgegeben. Eine Änderung des Arbeitsziels innerhalb des Teams ist prinzipiell unter Absprache mit der übergeordneten Kommandostelle vorstellbar, wird aber hier nicht näher betrachtet. Jedes beteiligte Teammitglied versucht bestmögliche Leistungen zu erbringen, um gemeinschaftlich das übergeordnete Arbeitsziel zu erreichen. Das Zusammenwirken der einzelnen Aktivitäten der Teammitglieder weist eine bestimmte Ordnung auf. Dabei erfolgt die Koordination der Abhängigkeiten zwischen den Aktivitäten, eigenständig durch alle Beteiligten. Damit die Teammitglieder ihre Aktivitäten schlussendlich koordinieren können, besteht die Notwendigkeit zur Kommunikation.

3.3.3 Kooperative Teamkoordination

Im vorangegangenen Abschnitt wurde bereits festgestellt, dass die Koordination einen sehr wichtigen und integralen Teilaspekt der Kooperation darstellt. Die Grundzüge dieses Aspekts werden in Abschnitt 3.3.3.1 näher behandelt. Dabei wird zunächst der Begriff Koordination für diese Arbeit genauer definiert sowie auf die verschiedenen Komponenten und Prozesse der Koordination nach [Malone & Crowston, 1994] Bezug genommen. Im Anschluss daran findet im Abschnitt 3.3.3.2 eine allgemeine Betrachtung der möglichen

Abhängigkeitstypen zwischen verschiedenen Aktivitäten statt. Aufbauend darauf wird im Abschnitt 3.3.3.3 der konkrete Anwendungsfall dieser Arbeit (eine Luft-Boden-Angriffsmission) herangezogen und hinsichtlich Abhängigkeiten zwischen Missionsaktivitäten analysiert.

3.3.3.1 Koordination und die dazugehörigen Komponenten und Prozesse

Im Rahmen einer interdisziplinären Studie zum Thema Koordination wurde von [Malone & Crowston, 1994] eine sehr allgemein gehaltene Definition angeführt:

“Coordination is managing dependencies between activities.”

Demnach zählen alle Vorgänge, die der Auflösung von Abhängigkeiten zwischen Aktivitäten dienen, zur Koordination. Die Notwendigkeit einer Zusammenarbeit mehrerer Individuen sowie die Verfolgung eines gemeinsamen übergeordneten Arbeitsziels bestehen nicht (siehe z.B. [Bair, 1989]). Dies sind typische Charakteristika eines Teams (vgl. Abschnitt 3.3.1) bzw. Kriterien einer Kooperation (vgl. Abschnitt 3.3.2).

In dem in dieser Arbeit betrachteten Anwendungsfall wirken mehrere Teammitglieder zusammen, um ein gemeinsames übergeordnetes Arbeitsziel zu erfüllen. Aufgrund dynamischer Änderungen in der Umwelt (z.B. Pop-Up Bedrohung) und der starken Abhängigkeit zwischen den verteilten Teilaufgaben/Fähigkeiten müssen die einzelnen Teammitglieder kontinuierlich ihre Aktivitäten in einer kooperativen Beziehungsform koordinieren. Nur so kann das Missionsziel effektiv erreicht werden. Im weiteren Verlauf dieser Arbeit wird im Speziellen nur diese soeben erwähnte Ausprägungsform von Koordination betrachtet. Zur Verdeutlichung wird von einer *kooperativen Teamkoordination* gesprochen.

Nach [Malone & Crowston, 1990][Malone & Crowston, 1994] kann Koordination allgemein aus einer Zusammensetzung von vier unterschiedlichen *Komponenten* und den damit in Verbindung stehenden *Prozessen* aufgefasst werden. Eine Übersicht dazu ist in Abbildung 37 dargestellt. Betrachtet man diese hinsichtlich einer kooperativen Teamkoordination, so entspricht das Ziel grundlegend dem bereits aus dem Arbeitssystemkonzept [Onken & Schulte, 2010] stammenden Begriff des Arbeitsziels. Für die Erfüllung des koordinativen Ziels müssen meist mehrere verschiedenartige *Aktivitäten* ausgeführt werden. Eine Aktivität entspricht dabei einer auszuführenden Handlung. Diese Aktivitäten werden aus den bereits in Abschnitt 3.3.2 aufgezeigten Gründen auf verschiedene *Teammitglieder (=Akteure)* verteilt. Zwischen den einzelnen Aktivitäten und somit Teammitgliedern liegen meistens mehr oder minder stark ausgeprägte *Abhängigkeitsbeziehungen* vor.

Ein Koordinationsprozess umfasst alle erforderlichen Vorgänge, um gemeinschaftliche Entscheidungen treffen sowie Informationen zur Erlangung eines einheitlichen Verständnisses zu den jeweiligen Komponenten zwischen allen beteiligten Instanzen erzielen zu können. Im Nachfolgenden werden die verschiedenen Koordinationsprozesse herangezogen und auf den konkreten Anwendungsfall dieser Arbeit appliziert.

Koordinationsprozess – Ziele

Prinzipiell ist es vorstellbar, dass ein Team selbstständig ein Ziel identifiziert. In diesem Fall sind oftmals umfangreiche Koordinationsprozesse notwendig, um ein gemeinschaftliches Ziel zu sichten und festzulegen. Nach [Onken & Schulte, 2010] darf eine Änderung des Arbeitsziels jedoch nicht automatisiert und somit nur von einem Menschen vorgenommen werden. Somit verbleibt diese Aufgabe beim Piloten bzw. wird diesem, wie im militärischen Umfeld üblich, ein Ziel in der Form eines Missionsauftrags von außerhalb

vorgegeben. Der Pilot muss in seiner Rolle als Teamführer dafür sorgen, dass diese Informationen auch dem unbemannten Subteam bekannt sind.

Koordinationsprozess – Aktivitäten

Grundsätzlich könnte eine zentrale Planungsinstanz aus der Zielvorstellung eine Liste an erforderlichen Aktivitäten ableiten. In dieser Arbeit soll dieser Vorgang nicht zentral, sondern dezentral erfolgen, um auf stark veränderliche Umweltbedingungen flexibel reagieren zu können (siehe z.B. [Meitinger, 2008]). Dazu soll sowohl der Pilot als auch das OCU-Subteam in der Lage sein, sich eigenständig eine Aktivitätsliste abzuleiten und diese mit dem Gegenüber abzugleichen.

Koordinationsprozess – Akteure

In dieser Arbeit wurde bereits in Abschnitt 3.3.1 eine statische Rollenverteilung zwischen dem Piloten und dem OCU-Subteam vorgenommen. Koordinationsprozesse zur Aufteilung der einzelnen Missionsaktivitäten zwischen dem Piloten und dem OCU-Subteam sind daher nicht erforderlich.

Koordinationsprozess – Abhängigkeiten

Der verbleibende Koordinationsprozess hat die Auflösung von Abhängigkeiten zwischen unterschiedlichen Aktivitäten zum Inhalt. Besonders in diesem Bereich ist mit umfangreicheren Prozessen zwischen Teammitgliedern zu rechnen, da diese Abhängigkeiten im Laufe einer dynamischen Mission meist kontinuierlichen Änderungen unterliegen.

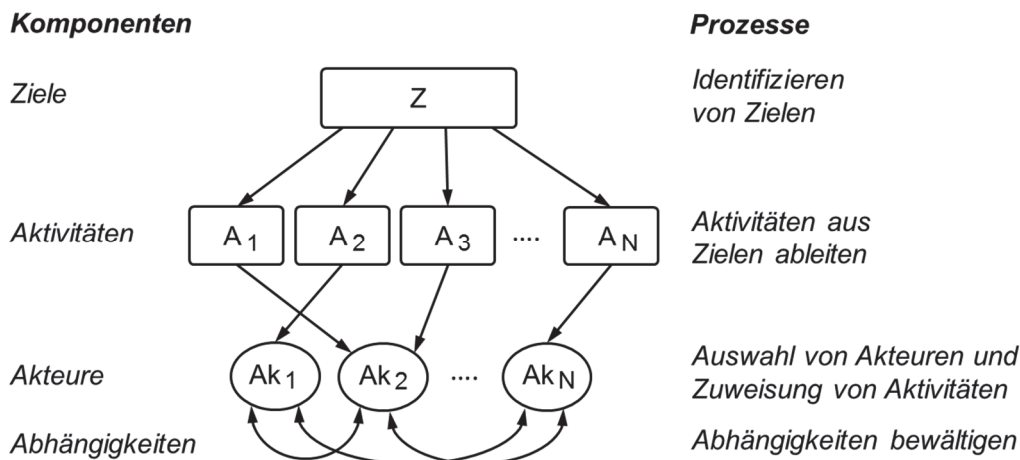


Abbildung 37: Die Komponenten und Prozesse der Koordination nach [Malone & Crowston, 1990]

3.3.3.2 Arten von Abhängigkeiten

Im vorangegangenen Abschnitt wurde bereits aufgezeigt, dass Koordination als eine Zusammensetzung mehrerer Komponenten und damit in Zusammenhang stehender Prozesse aufgefasst werden kann. Ein Teil dieser Komponenten ist bereits durch den betrachteten Anwendungsfall selbst bestimmt (vgl. Anwendung 3.3.3.1). So wird beispielsweise das Arbeitsziel grundsätzlich von einer außenstehenden Instanz (z.B. Kommandostelle) vorgegeben. Die zur Zielerreichung notwendigen Aktivitäten lassen sich ebenfalls unmittelbar daraus ableiten. Des Weiteren ist durch die getroffene Rollenverteilung die Zuweisung von Aktivitäten an spezifische Teammitglieder festgelegt worden. Die verbleibende Komponente „Abhängigkeit“ samt notwendigen Prozessen liegt hingegen

noch unspezifisch definiert vor. Daher soll diese im Nachfolgenden eingehender betrachtet werden.

Gemäß der Koordinationstheorie von [Malone & Crowston, 1990] können drei verschiedenartige, generische Abhängigkeitstypen zwischen Aktivitäten vorliegen. Diese sind:

- Voraussetzung (*prerequisite*)
- gemeinsame Ressource (*shared resources*)
- Simultanität (*simultaneity*)

Eine *voraussetzende Abhängigkeit* zwischen Aktivitäten liegt dann vor, wenn das Ergebnis einer vorangegangenen Aktivität benötigt wird, um eine darauffolgende Aktivität durchführen zu können. In Abbildung 38 links ist diese Abhängigkeit schematisch dargestellt. Der Kopplungsgrad zwischen abhängigen Aktivitäten kann unterschiedlich groß sein. Als Maß dafür kann die zeitliche Differenz Δt herangezogen werden. Je kleiner dieser Wert in Bezug auf den Missionskontext sein darf, desto fester sind die beteiligten Aktivitäten miteinander gekoppelt.

Der nächste Abhängigkeitstyp stellt eine *gemeinsame Ressource* innerhalb des Teams dar. Diese Ressource wird sozusagen für mehrere Aktivitäten von unterschiedlichen Teammitgliedern benötigt. Betrachtet man den zeitlichen Verlauf in Abbildung 38, so können grundsätzlich zwei Fälle auftreten. Im ersten Fall (A_1 - A_2) wird die Ressource zeitlich versetzt zur Aktivitätsbewältigung herangezogen – es liegt also kein Ressourcenkonflikt vor. Im zweiten Fall (A_2 - A_3) wird diese limitierte Ressource von mehreren Mitgliedern in überlappenden Zeitbereichen benötigt. Um diesen Konflikt zu vermeiden, gibt es verschiedene Ansätze. Bekannte Vertreter sind das *First Come – First Served* oder das *Prioritäten* Prinzip (siehe z.B. [Malone & Crowston, 1994]).

Der letzte Abhängigkeitstyp ist die *Simultanität*. Hierbei werden mehrere Aktivitäten gleichzeitig, also simultan, ausgeführt, um einen gewünschten Effekt in der Umwelt zu erzielen. Die Simultanität muss dabei nicht die gesamte Durchführungsdauer der einzelnen involvierten Aktivitäten umfassen, sondern kann sich auch auf einzelne Teile, also Zeitbereiche, beschränken (siehe Abbildung 38). Diese Art der Abhängigkeit zwischen Aktivitäten erfordert einen ständigen Austausch an Koordinationsinformationen, um die simultane Abhängigkeitsbeziehung kontinuierlich zu synchronisieren.

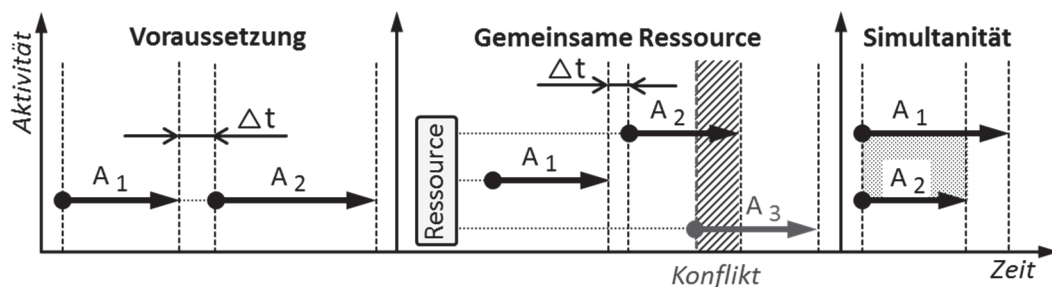


Abbildung 38: Zeitlicher Verlauf verschiedener Abhängigkeitstypen zwischen Aktivitäten

3.3.3.3 Analyse von Abhängigkeiten zwischen Aktivitäten

Im Nachfolgenden wird der konkrete Anwendungsfall dieser Arbeit herangezogen und hinsichtlich Abhängigkeiten zwischen Missionsaktivitäten betrachtet. Wie im Abschnitt 3.2.1 erläutert, begründet das Arbeitsziel die erfolgreiche Bekämpfung eines Zielobjektes mit einer lasergelenkten Bombe. Für die Zielerfüllung müssen verschiedene Aktivitäten ausgeführt werden. Dazu zählen:

- Freigaben einzuholen und Meldungen abzusetzen,
- Flugabwehrstellungen zu unterdrücken,
- Objekte aufzuklären und zu verifizieren,
- Zielobjekte zu beleuchten und zu bekämpfen,
- Schadensbeurteilungen durchzuführen und
- Begleitschutz für das bemannte Teammitglied zu übernehmen.

Bei diesen Aktivitäten handelt es sich nicht um „elementare“ Handlungen. Vielmehr setzt sich jede dieser Aktivitäten aus einer Vielzahl weiterer zusammen. An dieser Stelle genügt diese abstrakte Sichtweise, da die Abhängigkeiten zwischen den oben angeführten Aktivitäten grundsätzlich auf dieser Abstraktionsebene im betrachteten Anwendungsfall vorliegen.

Während einer Mission müssen über Sprechfunk unterschiedliche Freigaben (z.B. Einflug in ausgewiesene Lufträume) eingeholt sowie Meldungen (z.B. erfolgreiche Bekämpfung des Zielobjektes) abgesetzt werden. Für diese Aktivitäten steht in dieser Arbeit der Teamführer in Verantwortung. Diese Aktivitäten sind stark durch voraussetzende Abhängigkeiten geprägt. So kann eine erfolgreiche Bekämpfung erst nach einer positiven Wirkungsaufnahme gemeldet werden.

Die Durchführung der Unterdrückung feindlicher Flugabwehrstellungen obliegt den unbemannten Kräften (siehe Abbildung 39 – linkes Bild). Diese Aktivitäten sind stark von voraussetzenden Abhängigkeiten geprägt. Zunächst muss eine positive Freigabe über den Waffeneinsatz vorliegen. Des Weiteren muss sichergestellt werden, dass entlang der Flugroute zur Flugabwehrstellung jede andere Bedrohung vorab unterdrückt worden ist.

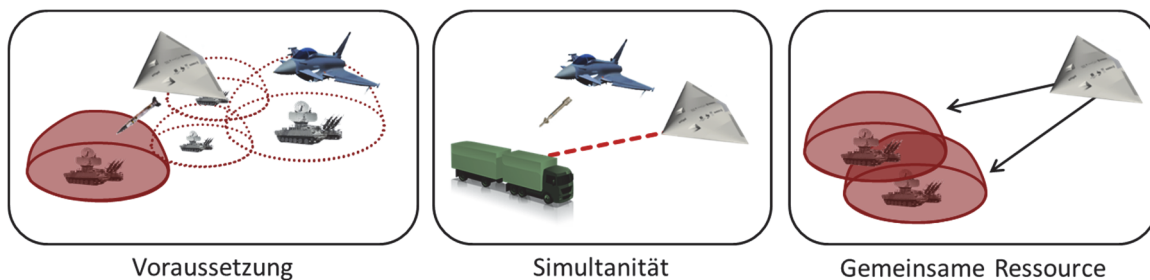


Abbildung 39: Beispiele zu den verschiedenen Abhängigkeitstypen zwischen Aktivitäten

Die Objektaufklärung kann ebenfalls erst nach einer erfolgreichen Unterdrückung aller Flugabwehrstellungen rund um das Objekt erfolgen. Nach Auffindung und Aufklärung des Objektes findet eine Verifizierung anhand von Bildmaterialien statt. Auch hier liegen vorwiegend voraussetzende Abhängigkeiten vor.

Nach einer erfolgreichen Zielverifizierung kann die eigentliche Bekämpfung durch das bemannte Teammitglied im bereits unterdrückten Luftraum durchgeführt werden. Dazu muss das Zielobjekt durch ein unbemanntes Teammitglied mit einem Laserdesignator während der Bekämpfungsphase markiert werden (siehe Abbildung 39 – mittleres Bild). Die einzelnen Aktivitäten der beiden beteiligten Kräfte müssen ständig abgestimmt und synchronisiert werden, damit dieses Vorhaben zum gewünschten Ergebnis führt. Hier liegt eine typische Simultanität zwischen den Aktivitäten vor.

Sobald ein unbemanntes Teammitglied alle zugewiesenen Aktivitäten ausgeführt hat, übernimmt es den Begleitschutz für das bemannte Kampfflugzeug. Dabei geleitet das unbemannte Teammitglied den Piloten zurück zum Stützpunkt und schützt diesen vor

unerwarteten Bedrohungen. Hier liegen im Allgemeinen voraussetzende Abhängigkeiten vor.

Im Anschluss an eine Bekämpfung wird im Rahmen einer Wirkungsaufnahme Bildmaterial generiert sowie ausgewertet. Damit dies vorgenommen werden kann, muss natürlich das Ziel bereits bekämpft worden sein – voraussetzende Abhängigkeit. Zunächst fertigt ein unbemanntes Teammitglied Bildmaterial zur Schadensbeurteilung an, bevor der Pilot des bemannten Kampfflugzeuges die Auswertung vornehmen kann.

Zusammenfassend kann festgehalten werden, dass zwischen den einzelnen Missionsaktivitäten häufig sehr ausgeprägte *voraussetzende Abhängigkeiten* vorliegen. Ebenso tritt im Zuge der Bekämpfung eine *simultane Abhängigkeit* zwischen dem Piloten und dem involvierten Teamagenten auf. Bei den oben angestellten Betrachtungen wurde nicht explizit berücksichtigt, dass grundsätzlich jedes Teammitglied bzw. deren Fähigkeiten und Nutzlasten bezogen auf das Team eine *gemeinsame Ressource* darstellen. So kann beispielsweise ein Teammitglied für die Unterdrückung von mehreren Flugabwehrstellungen (siehe Abbildung 39 – rechtes Bild) beauftragt sein. Hierzu müssen die Teammitglieder ihre Aktivitäten im Team entsprechend sinnvoll untereinander verteilen (koordinieren), um Ressourcenkonflikte weitgehend zu vermeiden.

3.3.4 Effektive Koordination

Im vorigen Abschnitt 3.3.3 wurden die verschiedenen Komponenten und Prozesse einer kooperativen Teamkoordination für den vorliegenden Anwendungsfall betrachtet. Neben diesen primären Koordinationsprozessen müssen weitere nebenläufige zwischen den einzelnen Teammitgliedern stattfinden, um allgemeine Informationen auszutauschen. Beispielsweise muss eine einheitliche Vorstellung der Umwelt erzeugt werden, um basierend darauf gemeinschaftlich die notwendigen Aktivitäten zur Erfüllung des Arbeitsziels ableiten zu können. Dieser Abschnitt befasst sich nun mit dem benötigten Informationsbedarf, um eine effektive kooperative Teamkoordination zwischen allen Teammitgliedern zu ermöglichen. Der Informationsbedarf kann nach [Picot, Reichwald & Wigand, 2001] folgendermaßen definiert werden:

„[...] die Art, Menge und Qualität der Informationen, die eine Person zur Erfüllung ihrer Aufgaben in einer bestimmten Zeit benötigt.“

In verschiedenen Studien zum Thema Koordination (siehe z.B. [Malone & Crowston, 1994][Zalesny, Salas & Prince, 1995][Klein, 2001]) wurden bereits einige Voraussetzungen zur Erlangung einer gut ausgestalteten Koordination zwischen beteiligten Instanzen identifiziert. Eine Arbeit aus diesem Umfeld ist die von [Klein, Feltovich, Jeffrey & Woods, 2005]. Aufbauend auf der Arbeit von [Clark, 1996], die vorwiegend die koordinativen Aspekte einer zwischenmenschlichen Konversation behandelt, wurden *domänenunspezifische Voraussetzungen* einer effektiven Koordination im Hinblick auf gemeinsame Aktivitäten abgeleitet. Diese Voraussetzungen werden im Nachfolgenden als Ausgangspunkt für die Bestimmung des Informationsbedarfes für den in dieser Arbeit betrachteten Anwendungsfall herangezogen und setzen sich wie folgt zusammen:

- Vorhersehbarkeit (*interpredictability*)
- Gemeinsamer Wissensraum (*common ground*)
- Lenken von Handlungen (*directability*)

Vorhersehbarkeit

Auf unterschiedliche Teammitglieder verteilten Aktivitäten mit gegenseitigen Abhängigkeiten kann ein Teammitglied seine eigenen Aktivitäten erst dann detaillierter planen bzw. ausrichten, wenn dieses bis zu einem bestimmten Grad an Genauigkeit vorhersehen kann, wie die Abarbeitungsabläufe der abhängigen Aktivitäten erfolgen. Damit diese Forderung der Vorhersehbarkeit überhaupt erfüllt werden kann, muss jedes Teammitglied als logische Konsequenz seine verbleibenden Teammitglieder mit angemessenen Koordinationsinformationen in einem kontinuierlichen Prozess versorgen. In Tabelle 4 ist der grundsätzliche Informationsbedarf zur Erfüllung der Koordinationsvoraussetzung „Vorhersehbarkeit“ für eine Aktivität aufgeführt.

Vorhersehbarkeit
<ul style="list-style-type: none">• Prognostizierter Startzeitpunkt• Planmäßige Durchführungsdauer (somit auch Endzeitpunkt)• Grad des Bearbeitungszustandes in Bezug auf die Gesamtaktivität• Abhängigkeiten zu anderen Aktivitäten

Tabelle 4: Grundsätzlicher Informationsbedarf zur Erfüllung der Vorhersehbarkeit einer Aktivität

Gemeinsamer Wissensraum

Eine weitere Voraussetzung der effektiven Koordination bildet der gemeinsame Wissensraum, der als Basis für die Vorhersehbarkeit angesehen werden kann [Clark & Brennan, 1991]. Dieser abstrakte Begriff kann am besten anhand eines Beispiels erläutert werden. Während einer militärischen Einsatzmission teilt ein Kampfflugzeugpilot seinen Teammitgliedern über Sprechfunk „Negativ, Winchester“ mit. Ein Außenstehender kann mit dieser Information nicht viel anfangen. Seine Teammitglieder hingegen sind durch diesen Funkspruch informiert, dass er über keine Munition (Codewort: Winchester) mehr verfügt und dass eine ggf. bereits zugewiesene Teilaufgabe nicht mehr von ihm durchgeführt werden kann. Verantwortlich für dieses Teamverständnis ist der gemeinsame Wissensraum. Nach [Clark, 1996] kann der gemeinsame Wissensraum in drei Unterkategorien gegliedert werden, in einen

- initialen gemeinsamen Wissensraum (*initial common ground*),
- ein Wissen über die gemeinsame Vergangenheit (*shared history*) und
- über den aktuellen Zustand (*current state*).

Dabei enthält der initiale, gemeinsame Wissensraum das sachdienliche Wissen, welches beispielsweise im Zuge einer Ausbildung erlernt wurde. Im Falle eines kognitiven Agenten wird dieses Wissen von den Entwicklern durch Programmierung vorgegeben. Diese Kategorie des Wissensraums kann während der Missionsausführung nicht unmittelbar durch Automationsfunktionalitäten beeinflusst werden. Die zweite Kategorie beinhaltet Wissen über die gemeinsame Vergangenheit, die seit dem Beginn der Aufnahme der Teamarbeit aufgetreten ist. Bezogen auf den Anwendungsfall zählen Angelegenheiten, wie eine erfolgreiche Unterdrückung einer feindlichen Flugabwehrstellung oder die Detektion einer neuen Bedrohung im Operationsgebiet dazu. Bekannt gegebene missionspezifische Randbedingungen, wie verlautbarte Einsatzregeln (*Rules of Engagement, RoEs*), Luftbeschränkungsgebiete oder Angriffsrichtung des Zielobjektes fallen ebenfalls in diese Kategorie. Die verbleibende Kategorie umfasst alle Informationen, welche den aktuell vorliegenden Zustand repräsentieren. Dazu zählen beispielsweise Lage- und Positionsinformationen sowie aktuell bearbeitete Aufgaben der weiteren Teammitglieder. In Tabelle

5 sind wesentliche Informationen zur Erfüllung der Koordinationsvoraussetzung „Gemeinsamer Wissensraum“ aufgelistet.

Gemeinsamer Wissensraum	
Gemeinsame Vergangenheit	<ul style="list-style-type: none"> • Missionspezifische Randbedingungen • Änderungen der taktischen Lage • Aufklärungsergebnisse • Geführte Dialoge • Verbrauchte/ingesetzte Ressourcen • Verlorene Fähigkeiten
Aktueller Zustand	<ul style="list-style-type: none"> • Taktische Lage • Aktuell bearbeitete Aufgaben (Aktivitäten) • Zukünftige Absichten

Tabelle 5: Informationen zur Unterstützung des gemeinsamen Wissensraums

Lenken von Handlungen

Das gegenseitige Lenken von Handlungen ist die letzte Voraussetzung einer effektiven Koordination (siehe z.B. [Christoffersen & Woods, 2002][Klien, Woods, Bradshaw, Hoffman & Feltovich, 2004]). Dabei soll jedes Teammitglied die Möglichkeit besitzen, Handlungen anderer Teammitglieder *indirekt* oder *direkt* beeinflussen zu können. Im Falle einer indirekten Beeinflussung lenkt ein Teammitglied die Handlungen des anderen nicht „aktiv“, sondern das andere Teammitglied erfährt durch Beobachtungen die Notwendigkeit seine eigenen Handlungen anzupassen. Im direkten Fall weist ein Teammitglied ein anderes Teammitglied dezidiert auf die Notwendigkeit einer Anpassung seiner Handlungen hin. Ursachen für Änderungen an Handlungsabläufen sind primär dem dynamischen Umfeld geschuldet. Für den Piloten stellt der indirekte Fall eine eher ressourcenintensive Belastung dar, weshalb die direkte Beeinflussung vor allem in hohen Beanspruchungssituationen zu bevorzugen ist. Damit diese Koordinationsvoraussetzung in das vorliegende Konzept mit einfließen kann, müssen sowohl der Pilot als auch die kognitiven Agenten über eine Möglichkeit verfügen, die Handlungen des anderen direkt, z.B. über eine verbal formulierte Nachricht, zu lenken. Ebenso soll der indirekte Fall auf Seiten des Piloten und des unbemannten Subteams in dem Konzept abgebildet werden. Anhand der Informationen über den gemeinsamen Wissensraum sowie der Vorhersehbarkeit, liegen jedem Teammitglied bereits ausreichende Informationen vor, um das Verhalten jedes einzelnen im notwendigen Ausmaß beobachten zu können. Um diesen Beobachtungsaufwand im indirekten Fall zu reduzieren, soll der Pilot durch eine zusätzliche Anzeige der Soll-Position, die auf einfache Weise einen Vergleich mit der Ist-Position erlaubt, unterstützt werden. Die Differenz der beiden Positionen ermöglicht unmittelbar eine Aussage über notwendige Handlungen. Beispielsweise erfolgte in [Benzler et al., 2011] die Abbildung der Soll-Position über ein Schattenfliegersymbol auf einem Kartendisplay.

3.3.5 Kommunikation im Team

Der letzte, bis jetzt noch nicht behandelte, aber durchaus integrale Aspekt der Kooperation (vgl. Abschnitt 3.3.2) ist die Kommunikation. Nach [König & Zoche, 1991] zitiert nach [Borghoff & Schlichter, 2000] kann Kommunikation

„[...] als Bindeglied verstanden werden, das die Regelung und Steuerung kooperativer Prozesse ermöglicht und effektiviert.“

Demgemäß impliziert die Kommunikation den Austausch an Informationen und somit die Ausübung von kooperativen Prozessen zwischen einzelnen Teammitgliedern – unabhängig ob Mensch oder Agent. Daher kann die Kommunikation als notwendiges Mittel für die Kooperation und somit auch für die Koordination im Team aufgefasst werden (siehe z.B. [Ferber, 1999][Borghoff & Schlichter, 2000][Biggers & Ioerger, 2001][Hoc, 2001]).

Abhängig vom betrachteten Fachbereich wird der Begriff Kommunikation verschiedenartig interpretiert. Im Bereich der Nachrichtentechnik wird die Kommunikation vorwiegend durch das von [Shannon, 1948] veröffentlichte Modell (siehe Abbildung 40) erklärt.

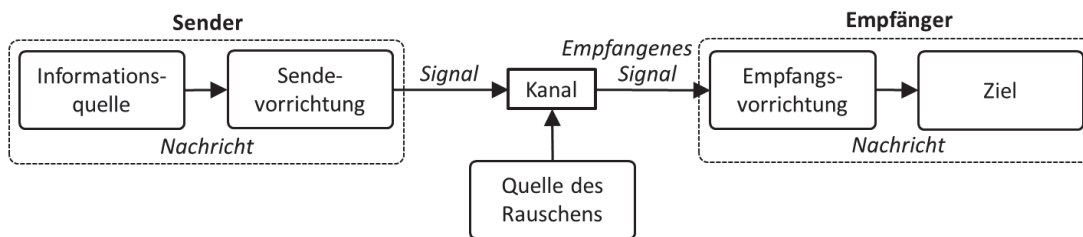


Abbildung 40: Kommunikationsmodell nach [Shannon, 1948]

In dieser Modellvorstellung wird der Sender als eine Zusammensetzung aus Informationsquelle und Sendevorrichtung angesehen. Dabei begründet die Quelle die zu übertragende Nachricht, während die Sendevorrichtung für die Kodierung der Information zu einem Signal verantwortlich ist. Der Kommunikationskanal stellt das materielle Medium dar und verbindet während des gesamten Kommunikationsprozesses den Sender mit dem Empfänger. Das Signal kann während des Übertragungsvorganges entlang des Kanales durch bestimmte äußerliche Einwirkungen gestört werden. Dies wird in dem Modell durch den Block „Quelle des Rauschens“ abgebildet. Das empfangene Signal wird schlussendlich bei dem Empfänger in der Empfangsvorrichtung dekodiert. Insofern es zu keiner zu starken Verfälschung des Signales im Übertragungsvorgang kam, liegt dem Ziel die Nachricht und somit die Information vor.

Diese nachrichtentechnische Interpretation der Kommunikation fokussiert sehr stark auf die im Kommunikationsprozess beteiligten (technischen) Komponenten, um eine Information „physisch“ von einem Sender zu einem Empfänger zu übertragen. Im Zuge dieser Arbeit wird davon ausgegangen, dass diese technische Apparatur für die Umsetzung der Datenkommunikation zwischen den Teammitgliedern in dem benötigten Technologiereifegrad vorliegt und somit fehlerfreie Übertragungen von Informationen zu jedem Zeitpunkt in der benötigten Bandbreite möglich sind. Weitere Informationen zu dem Gebiet der Kommunikationstechnik im luftfahrttechnischen oder spezieller im militärischen Bereich kann in [Flühr, 2012] oder [Teege, Eggendorfer & Eiseler, 2008] gefunden werden.

Im Vordergrund dieser Arbeit steht die Art und Weise, wie zwischen den einzelnen Teammitgliedern kommuniziert werden kann. Einen möglichen Ansatz dazu liefern die Sprachwissenschaften, die Kommunikation auf zwischenmenschlicher Ebene in eine verbale und nonverbale Ausprägung gliedern. Des Weiteren kann die Kommunikation in einer *expliziten* oder *impliziten Form* erfolgen (siehe z.B. [Entin & Serfaty, 1999][Barnes & Jentsch, 2010][Onken & Schulte, 2010]). Im expliziten Fall wird eine Informationsmitteilung intentional, also wissentlich und willentlich, vorgenommen. Dem Empfänger

wird eindeutig und ausdrücklich mitgeteilt, was sein Gegenüber von ihm erwartet beziehungsweise möchte. Dazu zählt das Versenden verbal formulierter Nachrichten oder Mitteilungen über Handzeichen (nonverbal) an ein Teammitglied. Eine implizite Kommunikation erfolgt ohne eine ausdrückliche Informationsmitteilung. Jedoch ist die eigentliche Information indirekt in einer Nachricht enthalten.

Im dem bereits hergeleiteten Arbeitssystem (vgl. Abbildung 35) muss eine sehr intensive Kooperation zwischen den Instanzen der OF vorliegen, um beispielsweise unverzüglich auf Umweltänderungen reagieren oder zeitkritische abhängige Aufgaben gemeinschaftlich bewältigen zu können. Nach [Bair, 1989] nimmt die Interaktion und somit die Kommunikation zwischen Mitgliedern in Abhängigkeit von der Form der Zusammenarbeit zu. In Abbildung 41 ist dieser Zusammenhang schematisch visualisiert. Daher kann, bezogen auf die in dieser Arbeit betrachtete Mensch-ACU-Kooperation, von einem relativ hohen Kommunikationsaufwand ausgegangen werden.

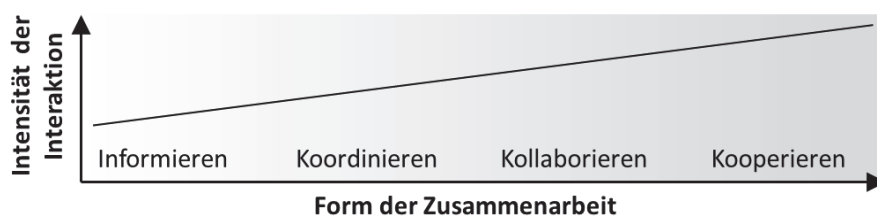


Abbildung 41: Schematische Darstellung der Intensitätszunahme der Interaktion in Bezug auf die verschiedenen Zusammenarbeitsformen in Anlehnung an [Bair, 1989]

Der Informationsaustausch zwischen den technischen Systemen, also den ACUs, soll ausschließlich explizit erfolgen. Dazu soll ein einheitliches Nachrichtenformat (z.B. [FIPA, 2002]) Anwendung finden, welches die Syntax und Semantik im Detail definiert, um Kommunikationsprobleme, wie falsche Interpretation des semantischen Inhaltes, auszuschließen. Mehr zu dieser Thematik kann z.B. [Meitinger, 2008][Onken & Schulte, 2010] entnommen werden.

Zwischen dem Piloten und OCU-Subteam müssen ebenfalls Kommunikationsvorgänge, ob nun expliziter oder impliziter Form, stattfinden. Grundsätzlich erfolgt die Kooperation und somit auch Kommunikationen zwischen Menschen im Gegensatz zu technischen Systemen nicht primär durch den kontinuierlichen Austausch von expliziten Nachrichten, sondern vorwiegend durch gegenseitiges Beobachten der Verhaltensweisen oder Ergebnisse, also implizit (siehe z.B. [Castelfranchi, 1998]). In verschiedenen wissenschaftlichen Untersuchungen konnte festgestellt werden, dass in Hochleistungsteams vor allem in zeitkritischen und ändernden Aufgabensituationen von einer expliziten in eine implizite Form der Koordination und Kommunikation übergegangen wird, um die Teamleistung zu halten oder zu verbessern. (siehe z.B. [Cannon-Bowers, Salas, Blickensderfer & Bowers, 1998][Entin & Serfaty, 1999][Shah & Breazeal, 2010]). Dieser erfolgreiche und funktionierende Übergang wird oftmals mit einer einheitlichen mentalen Modellvorstellung (*shared mental Model*) bei allen beteiligten Teammitgliedern begründet (siehe z.B. [Cannon-Bowers, Salas & Converse, 1993][Stout, Cannon-Bowers, Salas & Milanovich, 1999][Mathieu, Heffner, Goodwin, Salas & Cannon-Bowers, 2000]). Dabei stellt das *mentale Modell* eine reduzierte Abbildung der vorliegenden Umwelt dar, die ein Mensch nutzt, um Ereignisse zu verstehen, beschreiben, erklären oder auch vorherzusagen. Liegen diese Modellabbildungen in einer fast identischen Ausprägung bei den einzelnen Mitgliedern vor, besonders in Bereichen in denen gegenseitige Abhängigkeiten existieren, dann kann von einer Reduzierung der expliziten und einer Zunahme der impliziten Kommunikationsform ausgegangen werden.

In dieser Arbeit soll die einheitliche Modellvorstellung bzw. das Situationsbewusstsein innerhalb des Teams durch die in den beiden vorangegangenen Abschnitten (3.3.3 und 3.3.4) hergeleiteten Informationen zur kooperativen Teamkoordination erzielt werden. Aufbauend auf diesen Erkenntnissen und der Anforderung den Piloten so geringfügig wie möglich mit der Multi-UCAV Führung zu belasten, soll die Kommunikation zwischen dem Piloten und der kognitiven Automation vorwiegend in einer impliziten Form erfolgen. In Fällen in denen der Pilot mit ausdrücklichen Informationen, wie der Verlust einer Teamfähigkeit (z.B. Zielbeleuchtung) in Kenntnis gesetzt werden muss, soll die explizite Form Anwendung finden.

3.4 Teamkoordinationsmodul

In dem Abschnitt 3.2 wurde ein mögliches Arbeitssystem zur Führung mehrerer UCAVs aus einem einsitzigen Kampfflugzeug abgeleitet. Ebenso wurde die Kooperation zwischen dem Piloten und dem OCU-Subteam als ein Problemfeld identifiziert und im Abschnitt 3.3 eingehender in Bezug auf den Anwendungsfall der Multi-UCAV Führung betrachtet. Inhalt dieses Abschnittes ist es nun, die hergeleiteten Erkenntnisse zu nutzen und in das Gesamtkonzept einzuarbeiten.

Zunächst wird im Abschnitt 3.4.1 ein Lösungsansatz zur Unterstützung der Mensch-ACU-Kooperation vorgestellt. Hierbei handelt es sich um ein lokales Assistenzsystem, das zusätzlich in das bereits erarbeitete Arbeitssystem eingebracht wird. Im Abschnitt 3.4.2 erfolgt die Bestimmung sowie Festlegung der Informationen, die der Pilot dem hinzugefügten Assistenzsystem bereitstellen muss, damit dieses auch im Sinne des Piloten handeln kann. Abschließend wird im Abschnitt 3.4.3 unter Berücksichtigung der Grundforderungen und Rollen [Onken & Schulte, 2010] das Verhalten des lokalen Assistenzsystems mit dem Piloten definiert.

3.4.1 Lösungsansatz zur Unterstützung der Kooperation

Die kooperative Teamkoordination mit den verbundenen Koordinationsprozessen wurde als Schlüsselement bei den weiterführenden Untersuchungen der Mensch-ACU-Kooperation zur teambasierten Multi-UCAV Führung identifiziert (vgl. Abschnitt 3.3). Darüber hinaus wurde der notwendige Informationsbedarf einer effektiven Koordination ermittelt. Daraus ergibt sich eine Fülle von verschiedenen Arbeitsprozessen, die zur Erlangung einer gut ausgeprägten kooperativen Teamkoordination zwischen dem Piloten und dem unbemannten Subteam notwendig sind. Um nun die Arbeitsbelastung des Piloten hinsichtlich der Kooperation möglichst gering zu gestalten, wird diesem ein lokales Assistenzsystem zur Seite gestellt. In Abbildung 42 ist das daraus resultierende Arbeitssystem dargestellt.

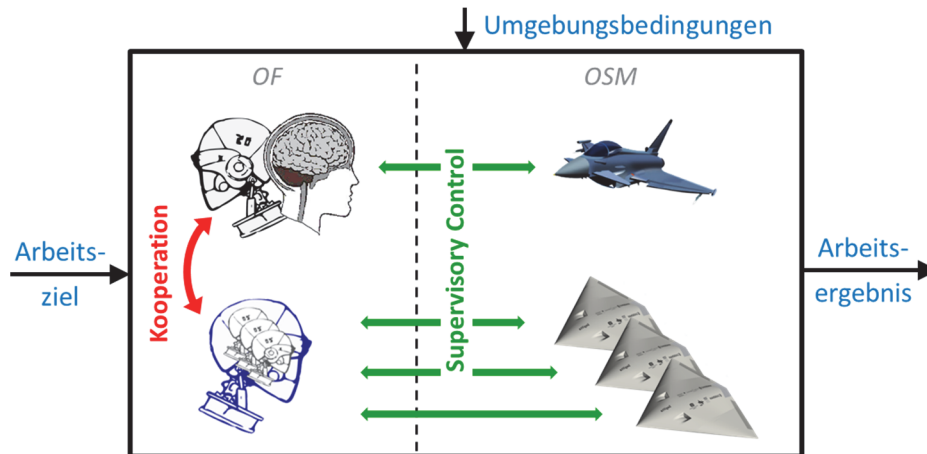


Abbildung 42: Arbeitssystem zur teambasierten Führung mehrerer UCAVs mit einem lokal angeordneten Assistenzsystem zur Unterstützung der bemannt-unbemannten Kooperation

Bei diesem Assistenzsystem handelt es sich um eine Assisting OCU (vgl. Abschnitt 2.4.3), die lokal in Bezug auf den Piloten im Arbeitssystem angeordnet ist. Damit das Assistenzsystem prinzipiell in der Lage ist, den Piloten zu unterstützen, benötigt es neben einem Wissen über das übergeordnete Arbeitsziel auch ein Domänenwissen (vgl. Abschnitt 2.4.3) über die kooperative Teamkoordination. Letzteres impliziert ein Verständnis über die vorliegende Situation inklusive der Absichten und Pläne des Piloten. Da der Hauptzweck dieses Assistenzsystems in der Unterstützung des Piloten bei der kooperativen Teamkoordination liegt, wird dieses im Weiteren als *Teamkoordinationsmodul (TKM)* bezeichnet.

Damit das TKM mit dem Piloten, und umgekehrt, in Interaktion treten kann, sind kooperative Fähigkeiten notwendig. Gründe zur Interaktion mit dem Piloten können z.B. detektierte Missstände oder Unklarheiten sein. Somit existiert neben der Mensch-ACU-Kooperation zwischen dem OCU-Subteam und dem Piloten eine weitere Kooperation. Zusätzlich dazu besteht zwischen dem OCU-Subteam und dem lokalen Assistenzsystem eine rein maschinelle ACU-ACU-Kooperation, wie in Abbildung 43 dargestellt. Diese Maschine-Maschine-Kooperation wird im Rahmen dieser Arbeit nicht explizit behandelt. Mehr zu diesem Thema kann beispielsweise [Meitinger, 2008] entnommen werden.

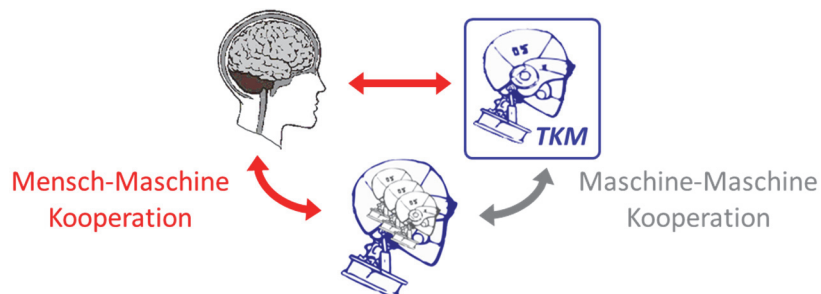


Abbildung 43: Symbolhafte Darstellung der kooperativen Beziehungen innerhalb der OF

In dieser Teamkonstellation liegen aus Sicht des Piloten zwei Kooperationspartner vor. Um diese auf einen zu beschränken, soll das TKM auch als eine Art „Mittelsmann“ fungieren. Der Pilot reicht Informationen zur kooperativen Teamkoordination an das TKM weiter und wird von diesem über die benötigten Koordinationsinformationen zu dem OCU-Subteam

in Kenntnis gesetzt. Das TKM ist somit für die tatsächliche Ausführung der Koordinationsprozesse über eine Maschine-Maschine-Kooperation mit dem OCU-Subteam zuständig. In Abbildung 44 ist diese modifizierte Teamkonstellation dargestellt.

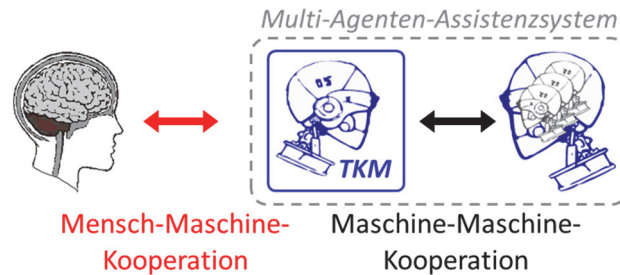


Abbildung 44: Resultierende kooperative Beziehung innerhalb der OF

Sowohl bei dem TKM als auch den ACUs der unbemannten Teammitglieder handelt es sich gemäß der Theorie der kognitiven Automation [Onken & Schulte, 2010] um Assistenzsysteme, die den Piloten bei der Erfüllung des Arbeitsziels zur Seite stehen. Jedes dieser Assistenzsysteme wird dabei durch einen eigenständigen Agenten, eine OCU, repräsentiert. In diesem Zusammenhang kann auch von einem *Multi-Agenten-Assistenzsystem* gesprochen werden.

3.4.2 Informationsbedarf des TKMs

Im Abschnitt 3.3.3 wurden die verschiedenen Koordinationsprozesse bezogen auf die vier Komponenten (Ziele, Aktivitäten, Akteure und Abhängigkeiten) der kooperativen Teamkoordination für den in dieser Arbeit betrachteten Anwendungsfall diskutiert. In diesem Abschnitt werden diese Erkenntnisse herangezogen, um festzustellen, welchen Anteil an Information der Pilot dem TKM bereitstellen kann bzw. soll, damit das TKM stellvertretend und im Sinne des Piloten die kooperative Teamkoordination mit dem unbemannten OCU-Subteam ausüben kann.

Die Information zur Koordinationskomponente „Ziel“ muss, wie bereits in Abschnitt 3.3.3 begründet, vom Piloten für das bemannt-unbemannte Team festgelegt (z.B. Annahme Missionsauftrag) bzw. abgeändert (z.B. Missionsabbruch) werden. Die Information dazu muss somit der Pilot dem TKM bereitstellen.

Im Rahmen der Komponente „Aktivität“ erfolgt die Bestimmung aller notwendigen Aktivitäten, die zur Zielerfüllung erforderlich sind. In modernen Kampfflugzeugen kann davon ausgegangen werden, dass die taktische Lage sowie die missionspezifischen Randbedingungen (z.B. Luftbeschränkungsgebiete, Angriffsrichtung des Zielobjektes) in elektronischer Form vorliegen. Anhand dieser Daten kann das TKM über Planungsfunktionen die notwendigen Aktivitäten ermitteln. Informationen seitens des Piloten sind daher hierzu nicht erforderlich.

Die nächste Komponente „Akteure“ sieht die Zuweisung der abgeleiteten Aktivitäten auf die Teammitglieder vor. Durch die bereits getroffene statische Rollenverteilung im Team benötigt auch hier das TKM keine weiteren Informationen seitens des Piloten.

Die verbleibende Komponente ist für die Auflösung von Abhängigkeiten zwischen unterschiedlichen Aktivitäten zuständig. Auch hier kann das TKM den Großteil der benötigten Informationen (z.B. geografische Position oder geplante Flugroute) über das System

Kampfflugzeug direkt oder indirekt durch Zuhilfenahme von OSMs beziehen. Beispielsweise kann das TKM über das Heranziehen von Planungsfunktionalitäten prognostizierte Startzeitpunkte von Aktivitäten berechnen. Die Notwendigkeit zur Mitteilung von Informationen seitens des Piloten besteht vorwiegend in den Ergebnissen von Auswertungsprozessen über vorangegangenen Aufklärungsaktivitäten bzw. Wirkungsaufnahmen.

Im Rahmen dieser Arbeit werden auch verschiedene verfahrenstechnische Anforderungen seitens der Luftwaffe (siehe dazu [Gangl et al., 2014]) berücksichtigt. Auch hierzu muss das TKM mit Informationen versorgt werden, damit es dementsprechend handeln kann. Diese Anforderungen beinhalten für den hier betrachteten Anwendungsfall

- die Bekanntgabe der beabsichtigten Aktivitäten,
- die aktive Initiierung der Flugroutenplanung,
- die Kommandierung des tatsächlichen Missionsstartes und
- die Kommandierung des Einschaltvorganges der Zielmarkierung

durch den Piloten. Darüber hinaus werden in dieser Arbeit auch explizit die sogenannten *RoEs (Rules of Engagement)*, zu Deutsch Einsatzregeln, berücksichtigt. Die RoEs spezifizieren dabei die Voraussetzungen, unter welchen Bedingungen ein Waffeneinsatz autorisiert ist.

Komponente	Information
Ziele	<ul style="list-style-type: none"> • Zielobjekt (Target) • (Missionsabbruch)
Aktivitäten	<ul style="list-style-type: none"> • ---
Akteure	<ul style="list-style-type: none"> • Beabsichtigte Aktivitäten
Abhängigkeiten	<ul style="list-style-type: none"> • Einsatzregeln • Initiierung der Flugroutenplanung • Missionsstatus • Ergebnisse zu einer Objektaufklärung/ Wirkungsaufnahme • Zielmarkierung

Tabelle 6: Informationen zu den Komponenten der kooperativen Teamkoordination, die der Pilot dem TKM bereitstellen soll bzw. muss

In Tabelle 6 sind die ermittelten Anteile an Koordinationsinformationen, die der Pilot dem TKM im betrachteten Anwendungsfall im Rahmen von Koordinationsprozesse bereitstellen kann bzw. sollte, zusammengefasst dargestellt. Für die Beschaffung der restlichen Informationen wird per Design das TKM vorgesehen, um den Arbeitsaufwand des Piloten hinsichtlich der kooperativen Teamkoordination gering zu halten. Im Falle der Komponente „Aktivität“ ist kein Zutun des Piloten erforderlich. Die von den Komponenten „Ziele“ und „Teammitglieder“ benötigten Informationen können vom Piloten im Regelfall vor dem eigentlichen Missionsstart dem TKM bekannt gegeben werden. Die verbleibende Komponente zur Auflösung von Abhängigkeiten fordert daher grundsätzlich als einzige Komponente während der Missionsausführung vereinzelt Informationen seitens des Piloten.

3.4.3 Allgemeine Verhaltensweise

Ziel dieses Abschnittes ist es, das prinzipielle Verhalten des TKMs mit dem Piloten detaillierter zu definieren. Als Ausgangspunkt dienen die verlautbarten Verhaltensgrundsätze, die sogenannten Grundforderungen (GF) [Onken & Schulte, 2010] für die Mensch-ACU-Kooperation (vgl. Abschnitt 2.4.3), welche bereits eine relativ systemnahe Beschreibung des erforderlichen Verhaltens liefern. Dabei spezifizieren diese die Voraussetzungen unter welchen Bedingungen ein Assistenzsystem gewisse Interaktionen initiieren soll. Diese GF werden im Abschnitt 3.4.3.1 angewandt. Im Anschluss daran werden im Abschnitt 3.4.3.2 die Interaktionsarten des TKMs anhand der verschiedenen Rollen [Onken & Schulte, 2010] eines Assistenzsystems festgelegt. Abschließend erfolgt im Abschnitt 3.4.3.3 die Konkretisierung von Assistenzsystemmeldungen.

3.4.3.1 Anwendung der Grundforderungen

Gemäß den von [Onken & Schulte, 2010] definierten Grundforderungen soll der Pilot seine Aufgaben durch Nutzung der zur Verfügung stehenden technischen Hilfsmittel nachgehen. Parallel dazu muss sich das TKM eigenständig ein Bild über die vorliegende Arbeitssituation generieren. Stellt dieses im Rahmen der Analyse der Arbeitssituation fest, dass die Aufmerksamkeit des Piloten nicht auf die dringlichste Aufgabe konzentriert ist, soll gemäß GF 1 das TKM die Aufmerksamkeit des Piloten daraufhin lenken.

Sollte nun der Pilot mit der Durchführung der dringlichsten Aufgabe überfordert sein, so muss das TKM die Aufgabensituation gemäß der 2. Grundforderung in ein handhabbares Maß überführen, um die Beanspruchung wieder auf ein akzeptables Niveau zu bringen. Im Umkehrschluss bedeutet dies, dass das TKM zunächst die Fähigkeit besitzen muss, die Überforderung des Piloten festzustellen. Hierfür wird folgende Annahme getroffen. Ein Pilot gilt als überlastet, wenn er auf eine Aufmerksamkeitslenkung auf die dringlichste Aufgabe nicht zeitnah reagiert.

Die dritte und letzte Grundforderung besagt, dass alle Aufgaben, die ein menschlicher Bediener nicht ausführen kann oder die bei Unterlassung hohe Risiken bergen, einem Assistenzsystem oder einem technischen Hilfsmittel zugewiesen werden sollen. In dieser Arbeit wird davon ausgegangen, dass die Arbeitsbelastung im Cockpit ohne UCAV-Führung bereits relativ hoch ist, weshalb grundsätzlich alle Aufgaben – bis auf vereinzelte Informationsmitteilungen (siehe Abschnitt 3.4.2), die im Zusammenhang mit der kooperativen Teamkoordination stehen, per Design das TKM übernehmen soll.

3.4.3.2 Festlegung der Interaktionsart

Im vorangegangenen Abschnitt wurden für das TKM die Bedingungen, in welchen Situationen welche Interaktion zu veranlassen sind, definiert. In diesem Abschnitt wird nun festgelegt, in welcher Art das TKM mit dem Piloten in Interaktion treten soll. Dazu werden die von [Onken & Schulte, 2010] definierten Rollen herangezogen (siehe Abschnitt 2.4.3).

Eine wesentliche Aufgabe des TKMs besteht in der Darlegung von situationsabhängigen Koordinationsinformationen (vgl. Abschnitt 3.3), um eine gut gestaltete Mensch-ACU-Kooperation zu ermöglichen. Die Präsentation dieser Informationen soll in der Rolle *associative assistance* erfolgen. Hierbei finden keine dezidierten Aufmerksamkeitslenkungen des Piloten statt. Es obliegt somit alleine dem Piloten zu entscheiden, wann und welche Informationen er zur Bewältigung seiner Aufgaben heranzieht.

Neben der allgemeinen Informationsdarlegung ist das TKM auch dafür zuständig, die Aufmerksamkeit des Piloten gezielt auf die dringlichste Aufgabe zu lenken (vgl. Abschnitt 3.4.3.1). Dies soll das TKM in der Rolle *alerting assistance* übernehmen, indem es dem Piloten nähere Informationen zum detektierten Missstand über eine Assistenzsystemmeldung (siehe Abschnitt 3.4.3.3) alarmierend anzeigt. Im Rahmen dieser Aufmerksamkeitslenkung werden dem Piloten keine weiteren Unterstützungsfunktionen seitens des TKMs angeboten, da von keiner Überforderungssituation ausgegangen wird. Der Pilot verfügt also noch über ausreichend freie mentale Ressourcen zur Bewältigung der Aufgabe.

Im Falle einer festgestellten Überforderung des Piloten ist es die Aufgabe des TKM die Beanspruchung des Piloten durch eine Aufgabenvereinfachung auf ein handhabbares Maß zurückzuführen. Hierbei soll das TKM mit dem Piloten ebenfalls in der Rolle *alerting assistance* über eine Assistenzsystemmeldung in Interaktion treten. Zusätzlich zur Meldung des detektierten Missstandes soll dem Piloten genau eine einzige Möglichkeit zur Aufgabenvereinfachung angeboten werden. Grundsätzlich könnten auch mehrere Lösungsvorschläge aufgezeigt werden, allerdings wird hier bereits von einer Überforderung des Piloten ausgegangen, weshalb dieser nicht noch zusätzlich mit der Auswahl eines Lösungswegs beansprucht werden soll.

3.4.3.3 Assistenzsystemmeldungen

Sollte es während einer Missionsausführung notwendig sein, die Aufmerksamkeit des Piloten zu lenken oder einer Überforderungssituation entgegen zu wirken, so wird dem Piloten eine Assistenzsystemmeldung in der Rolle *alerting assistance* vom TKM unterbreitet. Ziel dieses Abschnittes ist es, mögliche Meldungen zu identifizieren und daraus konkrete Formen abzuleiten.

Als Ausgangspunkt zur weiteren Konkretisierung dieser Meldungen werden die im Abschnitt 3.4.2 aufgezeigten Informationen, die der Pilot im Rahmen der kooperativen Teamkoordination dem TKM zur Verfügung stellen muss, herangezogen. Jede dieser Informationen impliziert eine vom Piloten auszuübende Tätigkeit, die durch eine Assistenzsystemmeldung unterstützt werden soll, da eine Nichtbearbeitung zu einem Scheitern der Mission führen kann. Zusätzlich dazu soll der Pilot auf koordinative Abweichungen aufmerksam gemacht werden, die bezogen auf das Gesamtgeschehen ein bestimmtes Maß überschreiten. So können unerwartete Verzögerungen aufgrund einer neuen Bedrohung den zeitlichen Missionsverlauf ändern und erfordern somit eine Anpassung der Aktivitäten des Piloten (siehe dazu Abschnitt 3.3.4 – Lenken von Handlungen). Diese koordinativen Aufgaben sind in Tabelle 7 zusammengefasst dargestellt.

• Bekanntgabe des Zielobjektes	• Verifizierung des Zielobjektes
• Festlegung der beabsichtigten Aktivitäten	• Aufschaltung der Zielmarkierung
• Bekanntgabe der Einsatzregeln	• Auswertung der Wirkungsaufnahme
• Initiierung der Planung der Flugroute	• Anpassen von Aktivitäten
• Änderung des Missionsstatus	

Tabelle 7: Übersicht der vom Piloten durchzuführenden koordinativen Aufgaben

In Abbildung 45 sind die einzelnen Aufgaben in Bezug auf die dazugehörigen Entscheidungskriterien zur Aufmerksamkeitslenkung dargestellt. Ein Entscheidungskriterium kennzeichnet dabei ein bestimmtes Missionsereignis, bis zu dem eine Aufgabe erfüllt sein muss. Eine Ausnahme ist die Aufgabe „Anpassung von Aktivitäten“. Diese lässt sich nicht durch

ein singuläres Entscheidungskriterium bestimmen, sondern kann nur durch den Vergleich der Ist- mit der Sollposition des bemannten Kampfflugzeuges in Bezug auf den aktuell vorliegenden Missionskontext ermittelt werden. Im Folgenden werden die verschiedenen Kriterien hinsichtlich der Mission detaillierter erläutert.

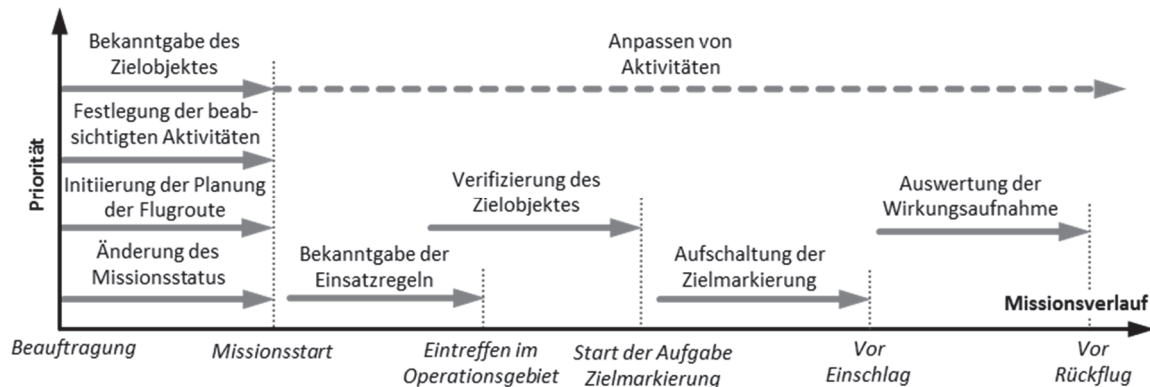


Abbildung 45: Auszuführende koordinative Aufgaben in Abhängigkeit zum Missionsverlauf mit Berücksichtigung der Prioritäten

Nach einem eingehenden Missionsauftrag muss der Pilot das TKM mit missionspezifischem Initialwissen versorgen. Dazu zählt die Bekanntgabe

- des Zielobjektes,
- einer Änderung des Missionsstatus,
- der gültigen Einsatzregeln,
- der beabsichtigten Aktivitäten sowie
- der Initiierung der Flugroutenplanung.

Mit Ausnahme der ROEs müssen diese Informationen bereits vor dem eigentlichen Missionsstart dem Team bekannt sein. Die ROEs hingegen können auch während des Missionsverlaufs eingegeben werden. Diese müssen jedoch spätestens vor Einflug des ersten UCAVs in das Operationsgebiet vom Piloten kommuniziert worden sein. Für die Bearbeitung bestimmter Missionsaufgaben benötigt das TKM vom Piloten während der Missionsdurchführung bestimmte Informationen. Dazu gehört beispielsweise das Ergebnis einer vom Piloten durchgeführten Zielverifizierung. Erst nach einer positiven Verifizierung kann ein UCAV die Aktivität „Zielmarkierung“ ausführen. Aufgrund einer verfahrenstechnischen Forderung seitens der Luftwaffe (siehe z.B. [Gangl et al., 2014]) steht der Pilot in der Verantwortung, den Einschaltvorgang des Zielmarkierungssystems des unbemannten Beleuchters zu steuern. Das heißt, der Pilot muss explizit den Einschaltvorgang der Zielmarkierung an das TKM und somit den zuständigen Beleuchter (UCAV) vor Einschlag der lasergelenkten Bombe kommandieren. Im Anschluss zu einer Wirkungsaufnahme durch ein UCAV, die das Anfertigen von Bildmaterial des bekämpften Objektes beinhaltet, ist der Pilot für die Auswertung zuständig. Das Ergebnis über eine erfolgreiche oder fehlgeschlagene Bekämpfung muss dem TKM vor dem eigentlichen Rückflug mitgeteilt werden, damit gegebenenfalls ein erneuter Angriff durchgeführt werden kann. Die letzte identifizierte Aufgabe stellt die Anpassung von Aktivitäten an den Missionsverlauf durch den Piloten dar. Diese kann während der gesamten Missionsausführung notwendig werden. Probleme bei der Bekämpfung von feindlichen Flugabwehrstellungen durch das unbemannte Team können beispielsweise starke zeitliche Verzögerungen aller nachfolgenden Aktivitäten bedeuten. In einem solchen Fall ist das TKM, stellvertretend für das unbemannte Team, verantwortlich den Piloten zu unterrichten. Im Allgemeinen erfolgt eine

zeitliche Anpassung durch den Piloten durch die Erhöhung bzw. Absenkung der Fluggeschwindigkeit. Bei größeren zeitlichen Verzögerungen kann es hingegen notwendig sein die Flugroute, beispielsweise um eine Warteschleife, zu adaptieren.

Damit die Ausführung jeder koordinativen Aufgabe weitestgehend sichergestellt werden kann, soll das TKM vor Erreichen des Entscheidungskriteriums die Aufmerksamkeit des Piloten auf diese lenken. Wenn dies nicht zu dem gewünschten Effekt führt, soll in der nächsten Eskalationsstufe, bei der von einer Überforderung des Piloten ausgegangen wird, eine weitere Assistenzsystemmeldung samt einer Aufgabenvereinfachung vorgelegt werden. In diesem Konzeptansatz soll die Aufgabenvereinfachung entweder die vollständige Übertragung der Durchführung einer Aufgabe an das TKM oder die Umkonfiguration der Mensch-Maschine-Schnittstelle (vgl. Abschnitt 3.5), sodass der Pilot unter minimalen Arbeitsaufwand der Aufgabe nachgehen kann, beinhalten.

Damit es bei einem gleichzeitigen Auftreten von mehreren unerledigten, aber dringlichen Aufgaben nicht zu Konflikten kommt, erfolgt eine Priorisierung der einzelnen Aufgaben (siehe Abbildung 45). Diese Prioritäten sind unterschiedlich gestaffelt und legen somit die tatsächlich dringlichste Aufgabe innerhalb eines Zeitbereiches untereinander fest.

3.5 Mensch-Maschine-Schnittstelle zur teambasierten Führung

In diesem Kapitel soll nun die Mensch-Maschine-Schnittstelle (MMS) zwischen dem Piloten und dem TKM betrachtet werden. Diese benötigt der Mensch, um mit dem technischen System in Interaktion treten zu können. Damit der Pilot aus dem Kampfflugzeugcockpit mit dem TKM kooperieren kann, muss eine entsprechende Schnittstelle in das Konzept mit aufgenommen werden. Zur begrifflichen Abgrenzung der Schnittstelle zur Führung der unbemannten Teammitglieder über das TKM gegenüber der gesamteinheitlichen MMS wird diese wie in [Wohler & Schulte, 2014] als Mensch-Agenten-Schnittstelle (MAS) bezeichnet. In Abbildung 46 ist die MMS inklusive der MAS zur Führung eines bemannten Kampfflugzeuges sowie zur Kooperation mit dem TKM schematisch dargestellt.

Im Nachfolgenden wird das MAS-Konzept zur teambasierten Führung mehrererUCAVs aus einem einsitzigen Kampfflugzeug aufgezeigt. Dazu werden im Abschnitt 3.5.1 verschiedene, für die Interaktion zwischen dem Piloten und der MAS in Frage kommenden Modalitäten eines Menschen betrachtet. Im Anschluss daran findet im Abschnitt 3.5.2 eine Analyse des Arbeitsplatzes des Piloten anhand eines modernen Kampfflugzeugtyps statt, um geeignete Mensch-Maschine-Schnittstellenelemente im Cockpit für die MAS zu identifizieren. Die konkrete Ableitung der Mensch-Agenten-Schnittstelle im Abschnitt 3.5.3 erfolgt auf Basis der zuvor gewonnenen Erkenntnisse. Darüber hinaus werden etablierte Grundsätze zur Schnittstellengestaltung aus dem Umfeld der Hard- und Softwareergonomie (siehe z.B. [International Organization for Standardization, 2006][Herczeg, 2009][Zühlke, 2012]) herangezogen.

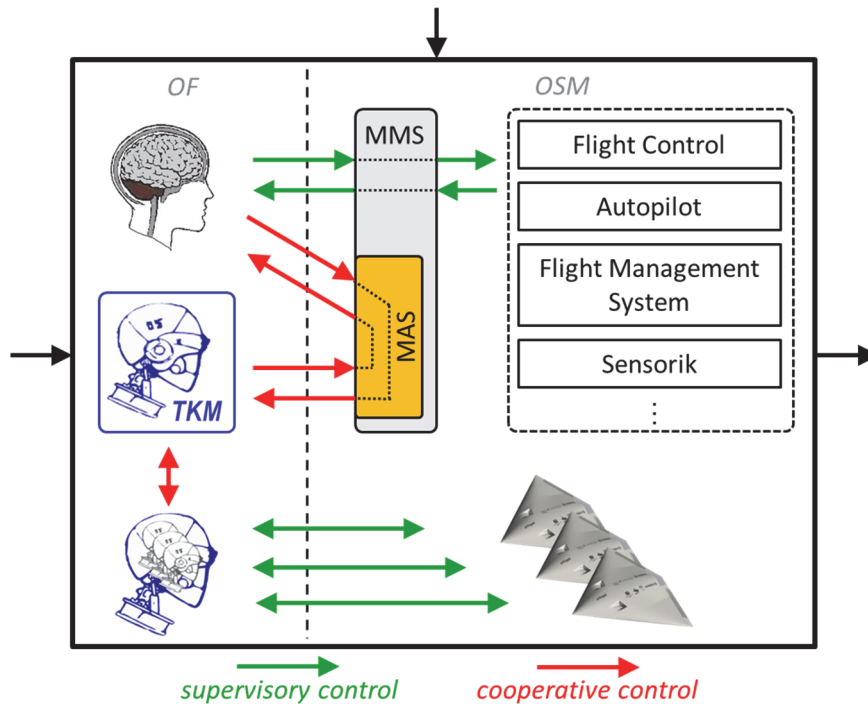


Abbildung 46: Schematische Darstellung der Mensch-Maschine-Schnittstelle zur Führung des bemannten Kampfflugzeuges sowie zur Kooperation mit dem TKM

3.5.1 Interaktionsmodalitäten und Ressourcen

Ein Mensch kann prinzipiell über verschiedene Modalitäten Informationen aufnehmen. Eine *Modalität* entspricht einem Sinneskanal des Menschen. Beispielsweise zählen der visuelle, auditive, haptische, vestibular, proprio(re)zeptive und olfaktorische Kanal zu den Modalitäten (siehe z.B. [Ansorge & Leder, 2011]). Nach [Küpfmüller, 1959] (zitiert nach [Schenk & Rigoll, 2010]) werden die meisten Informationen über den visuellen und auditiven Kanal wahrgenommen, durchschnittlich 87% auf dem visuellen und 10% auf dem auditiven Kanal. Aufgrund der Dominanz der Bandbreite dieser beiden Modalitäten werden die verbleibenden bei der Konzeptionierung der MAS nicht betrachtet. Der primäre Fokus wird auf die visuelle Modalität gelegt.

Nach [Wickens, 2002] können die einzelnen Modalitäten noch weiter hinsichtlich Verarbeitungs-codes eingeteilt werden. Die dazugehörige Modellvorstellung ist in Abbildung 47 dargestellt. Hierbei wird postuliert, dass der Mensch über mehrere unterschiedliche aber limitierte Ressourcen zur Aufgabenbewältigung verfügt. Die Aufgaben können umso „paralleler“ ausgeführt werden, desto weniger Überlappungen es zwischen den einzelnen Modalitäten und Verarbeitungs-codes gibt. Die erste Dimension dieses Modells bildet das Verarbeitungsstadium. Dieses beschreibt den Prozess von der Wahrnehmung der Information über die Verarbeitung bis hin zur Antwort. Die zweite Dimension unterscheidet zwischen einer auditiven und visuellen Modalität. Weitere Modalitäten des Menschen werden in dieser Modellvorstellung nicht berücksichtigt. Die dritte Dimension bildet der Verarbeitungscode, wobei zwischen einer verbal/linguistischen und einer räumlich/analogon Wahrnehmung unterschieden wird.

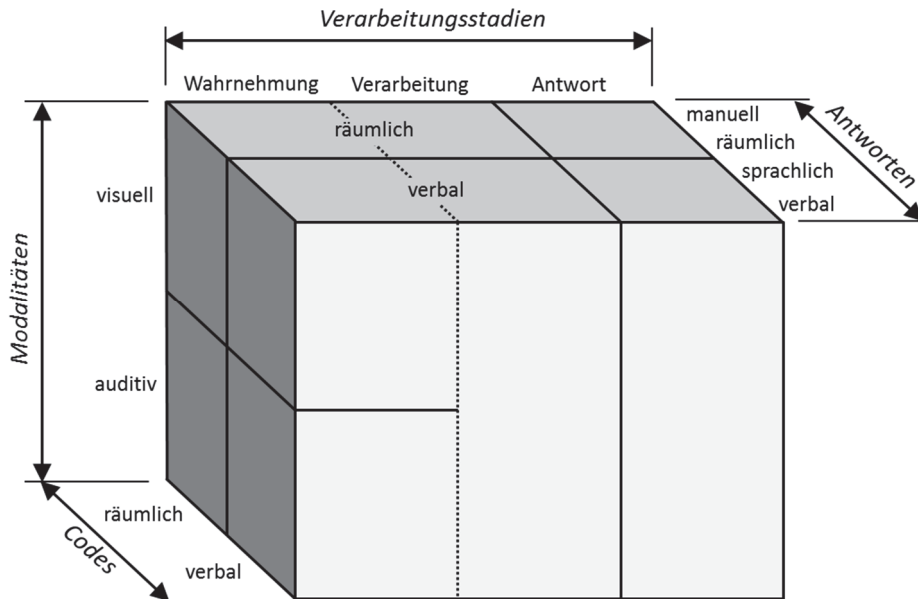


Abbildung 47: Multiple Ressourcenmodell nach [Wickens, 2002]

In dem multiple Ressourcenmodell nach [Wickens, 2002] stehen also vier verschiedene orthogonale Ressourcen zur Verfügung über die ein Mensch Informationen aufnehmen kann. Im Folgenden werden diese am Beispiel einer Warnmeldung für den Piloten im Falle einer kritischen Bodenannäherung des Luftfahrzeugs erläutert. In Abbildung 48 sind dazu exemplarische Möglichkeiten aufgezeigt. Die visuelle-räumlich/analoge Warnmeldung wird über symbolische Elemente in der Form zweier Pfeilspitzen dargestellt. Der Abstand der beiden Spitzen ist als Maß für den Abstand zum Boden zu interpretieren. Die Warnmeldung kann auch über eine visuelle Modalität in der Codierungsform verbal/linguistisch erfolgen. Hierbei wird die Information über eine Textmeldung dem Piloten vorgelegt. Eine auditiv-räumlich/analoge Warnmeldung kann beispielsweise durch eine Änderung der Frequenz eines Warntons in Abhängigkeit zum verbleibenden Bodenabstand umgesetzt werden. Die letzte Variante, auditiv-verbal/linguistisch, bildet die Sprachausgabe.

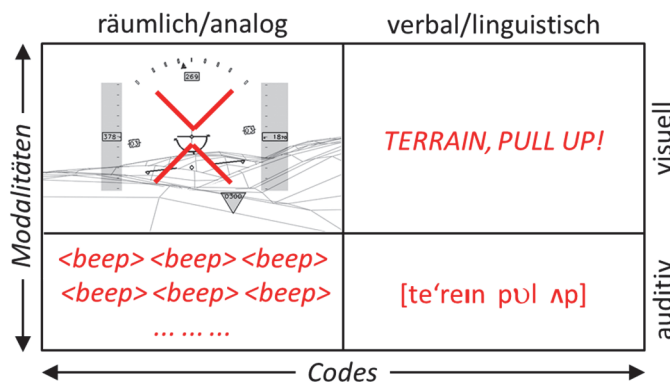


Abbildung 48: Nutzung der verschiedenen Modalitäten und Codes am Beispiel einer kritischen Bodenannäherung eines Luftfahrzeugs aus [Schulte, 2011]

3.5.2 Arbeitsplatzanalyse

Im Rahmen der Konzeptionierung der MAS müssen die durch ein Kampfflugzeugcockpit vorgegebenen Randbedingungen berücksichtigt werden. Um diese Randbedingungen in diesem Forschungsvorhaben genauer erfassen zu können, wird die MMS eines einsitzigen, mit konventioneller Automation ausgestatteten Kampfflugzeuges im Hinblick auf die für die MAS in Frage kommenden Schnittstellenelemente untersucht. Als Ausgangspunkt der Betrachtung dient das einsitzige Kampfflugzeugmuster „Eurofighter“. In Abbildung 49 ist das Eurofightercockpit dargestellt. Im Nachfolgenden werden die relevanten MMS-Elemente eingehender erläutert, die für die MAS in Frage kommen.



Abbildung 49: Interaktionselemente im Cockpit am Beispiel „Eurofighter“
(© Eurofighter Jagdflugzeug GmbH)

Das primäre Displaysystem im Cockpit setzt sich aus drei verschiedenen Farbmonitoren (1), den *MHDDs* (*Multifunction Head Down Displays*), zusammen. Über diese können verschiedenste Informationen, wie taktische Lage oder verfügbare Wirkmittel, angezeigt werden. Die Informationen werden kategorisch verschiedenen Formaten zugeordnet. Ein Format bildet eine eigenständige Anzeigeseite, auch „Page“ genannt. So werden auf der Page „Store“ Informationen zur Bewaffnung und Täuschkörpern, auf der Page „Engine“ Informationen zu den Triebwerken angezeigt. Jede Page kann auf jedem Display aufgerufen und angezeigt werden. In den Umrandungen der Monitore sind Funktionstasten integriert, die je nach selektierter Page unterschiedliche Funktionen anbieten. So kann im Falle der Store-Page der Pilot weiterführende Informationen zur Bewaffnung durch Betätigung einer Funktionstaste erhalten.

Das *HUD* (*Head-Up Display*) (2) stellt eine weitere wesentliche Informationsquelle für den Piloten dar. Dieses System nutzt eine geeignete Optik, um Daten in das Gesichtsfeld des Außensichtbereiches des Piloten zu projizieren. Der Anzeigebereich ist jedoch limitiert. Neben primären Flugdaten werden Sensordaten und taktische Daten dem Piloten über dieses System kompakt zugänglich gemacht. Das HUD besitzt darüber hinaus unterschiedliche Betriebsarten, um in dem limitierten Anzeigefeld nur die aktuell für den Piloten interessanten Informationen abzubilden. Für die Durchführung einer Luft-Boden-

Bekämpfung werden grundsätzlich andere Informationen als bei Landevorgängen benötigt. Über das zentral angeordnete HUP (*Head-Up Panel*) (3) können Einstellungen zu dem HUD vorgenommen werden. Darüber hinaus werden am HUP verschiedene essentielle Systemparameter, wie Triebwerksanzeigen oder Füllstand der Treibstofftanks, kontinuierlich visuell dargestellt. Auch ist die Anzeige- und Bedieneinheit des *MIDS* (*Multifunctional Information Distribution System*) im HUP integriert. MIDS ist ein standardisiertes Informationssystem, das den sicheren und störungsfreien Austausch von Daten zwischen Nutzern ermöglicht. Zusätzlich dazu stehen noch Einstellfunktionen für die Funkkommunikation am HUP zur Verfügung.

Die *HOTAS* (*Hands On Throttle and Stick*)-Komponenten, bestehend aus einem Schubhebel und Steuerknüppel (4), bilden ein sehr zentrales Element des umgesetzten Bedienkonzeptes der MMS im Eurofighter. Dieser Ansatz erlaubt es dem Piloten eine Vielzahl von Systemen, wie Flugsteuerung, Kommunikationssysteme, Sensoren oder Waffen, durch Eingaben über die am HOTAS angebrachten Schalter und Knöpfe zu steuern, ohne dass dieser die Hände davon nehmen muss. Ebenfalls steht eine Cursorsteuerung am Schubhebel zur Verfügung. Die Funktionsweise dieser Cursorsteuerung gleicht in etwa einer herkömmlichen Computermaus. Darüber können verschiedenste Einstellungen an den MHDDs vorgenommen oder dort angeführte Funktion ausgewählt werden.

Das *DVI* (*Direct-Voice-Input Systems*) (5) ist ein weiteres System der MMS, die der Pilot nutzen kann, um über definierte Spracheingaben verschiedene Subsysteme oder Funktionen zu bedienen. Dieses System kann als eine Alternative zu der manuellen Eingabe über Schalter oder Knöpfe angesehen werden, jedoch mit einem sehr eingeschränkten Funktionsumfang. Jede Eingabe wird über das HUD sowohl optisch als auch auditiv quittiert. Dies ermöglicht es dem Piloten die vom Spracherkennungssystem erkannte Eingabe auf Korrektheit zu prüfen.

Für die Integration der MAS in die bereits existierende MMS des soeben betrachteten Kampfflugzeugtyps können die angeführten technischen Hilfsmittel herangezogen werden. Die MHDDs stellen neben dem HUD die wichtigste Informationsquelle für den Piloten dar. Diese Cockpitdisplays werden deshalb primär für die Abbildung der Informationen zur kooperativen Teamkoordination genutzt. Das HUD kann aufgrund des limitierten und auch freien Anzeigeraumes nur beschränkt als MAS genutzt werden. Dieses Anzeigesystem soll verwendet werden, um den Piloten über essentielle Informationen in Kenntnis zu setzen (d.h. Warnmeldungen, Hinweise). Ähnlich verhält es sich bezüglich des HUPs. Auch dieses ist bereits mit zahlreichen Informationen über Systemzustände des Kampfflugzeuges gefüllt. Für die Eingabe von Informationen stehen ebenfalls verschiedene MMS-Elemente zur Verfügung. Neben den Funktionstasten der MHDDs können auch Schalter und Knöpfe der HOTAS sowie das Spracheingabesystem für die Konzeptionierung der MAS genutzt werden.

3.5.3 Abgeleitetes MAS-Konzept

Dieser Abschnitt befasst sich nun mit der konkreten Ableitung des MAS-Konzeptes für den in dieser Arbeit betrachteten Anwendungsfall. Im Nachfolgenden werden die Gesichtspunkte Anzeige und Bedienung der MAS im Einzelnen betrachtet.

Anzeigekonzept – TKM informiert Pilot

Die Koordinationsinformationen werden im Allgemeinen in der Rolle *associative assistance* von dem TKM dem Piloten zur Verfügung gestellt. Dazu soll nun das MHDD genutzt werden, um diese Information in der visuellen Modalität (vgl. Abschnitt 3.5.1) dem Piloten zugänglich zu machen. Bei genauerer Betrachtung dieser Koordinationsinformationen weisen manche eine hohe Affinität zu einem *räumlichen* (z.B. Geographische Position) oder *temporären Bezugswert* (z.B. Startzeitpunkt einer Aktivität) auf. Darüber hinaus können Koordinationsinformationen ohne unmittelbaren Bezug zu Zeit oder Raum (z.B. Anzahl verfügbarer Wirkmittel) aufgefunden werden.

Die eher bezugsfreien Informationen sollen thematisch in einer eigenständigen MHDD-Page, der Team-Page, zusammengefasst werden. Die Darstellung der Informationen soll dabei primär in der Codierungsform verbal/linguistisch erfolgen. In Abbildung 50 sind diese Informationen mit Zuteilung auf die verschiedenen Komponenten abgebildet.

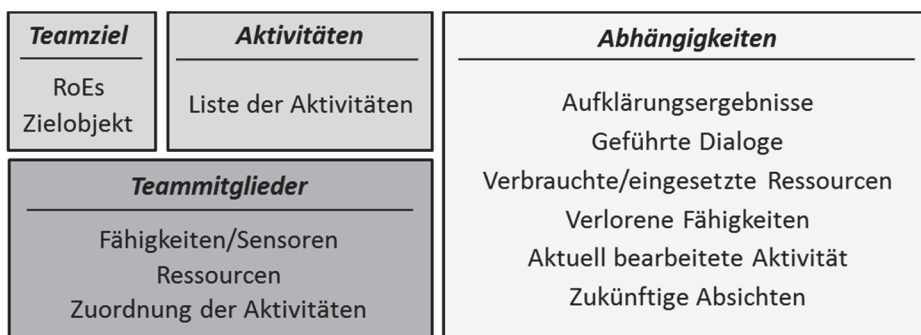


Abbildung 50: Auf der Team-Page anzuzeigende Koordinationsinformationen

Die verbleibenden, auf der MAS anzuzeigenden Koordinationsinformationen sollen ebenfalls in die Anzeigeeinheit des MHDDs integriert werden. Für die Darstellung der Informationen mit räumlichem Bezug bietet sich ein Kartendisplay, über das grundsätzlich jedes moderne Kampfflugzeug verfügt, an. Neben Navigationsinformationen können meist auch Informationen zur taktischen Lage angezeigt werden.

In Abbildung 51 ist ein Anzeigekonzept zur Erweiterung eines herkömmlichen Kartendisplays um Zusatzinformationen für die kooperativer Teamkoordination dargestellt. Das linke Bild beinhaltet (vgl. Abschnitt 3.3.4 – Lenken von Handlungen) einen sogenannten Schattenflieger, der die Soll-Position des bemannten Kampfflugzeuges darstellt. Durch Abgleich mit der Ist-Position kann der Pilot seine Handlungen an die Aktivitäten des unbemannten Teams anpassen. In der angeführten Darstellung müsste der Pilot seine Geschwindigkeit erhöhen, um sich wieder optimal in den Missionsverlauf einzugliedern.

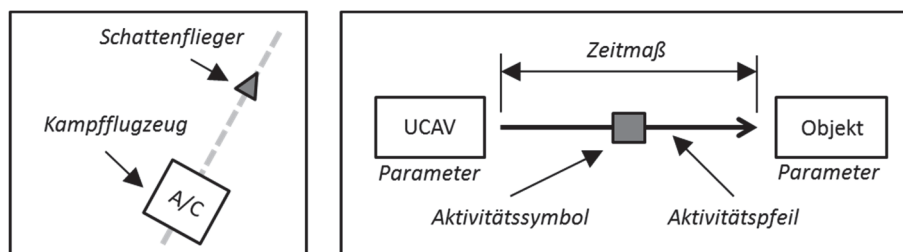


Abbildung 51: Anzeigekonzept für die Darstellung von Koordinationsinformationen mit räumlichem Bezug am Kartendisplay

Die rechte Darstellung in Abbildung 51 bildet ein Anzeigekonzept, das neben Positions- und allgemeinen Parametern (z.B. Flughöhe) zu UCAVs und Missionsobjekten den Piloten mit weiteren Koordinationsinformationen versorgt. Dabei beschreibt ein Aktivitätssymbol bildhaft die Aktivität, mit der ein UCAV gerade beschäftigt ist. Da jede Aktivität in Verbindung zu einem Objekt der taktischen Lage steht, wird ein Aktivitätspfeil genutzt, um den Bezug zwischen Akteur und Objekt visuell abzubilden. Generell kann die Länge des Pfeiles als Zeitmaß bis zur Erfüllung der Aktivität interpretiert werden, da der Akteur, also das UCAV, eine der Pfeillänge etwa proportionale Distanz bis zur Ausführung der Aufgabe zurücklegen muss. Eine Ausnahme in dem hier betrachteten Anwendungsfall stellt die Aktivität „Zielmarkierung“ dar. Hierbei kennzeichnet das Erscheinen des Pfeils den Zeitpunkt der Verfügbarkeit. Die Darstellung dieser Koordinationsinformationen auf dem Kartendisplay erfolgt hauptsächlich über eine räumliche/analoge Codierungsform.

Für die Visualisierung der Koordinationsinformationen mit temporärem Bezug steht grundsätzlich kein geeignetes Standardformat im bemannten Kampfflugzeug zur Verfügung. Daher wird im Anzeigekonzept dafür eine zusätzliche MHDD-Page vorgesehen. Die Abbildung der Informationen findet in Form eines Zeitstrahles (*Timeline*) statt. Ein ähnlicher Ansatz im Kontext der Führung mehrerer unbemannter Flugzeuge wurde zum Beispiel in [Cummings & Mitchell, 2005][Mitchell & Cummings, 2005] verfolgt. Hierbei wurden vor allem die Auswirkungen von unterschiedlichen LOAs (vgl. Abschnitt 2.3.2) auf den Operateur, wie Leistungsparameter oder SA, untersucht. Die Abbildung von koordinativen Informationen stand bei diesen Arbeiten nicht im Fokus.

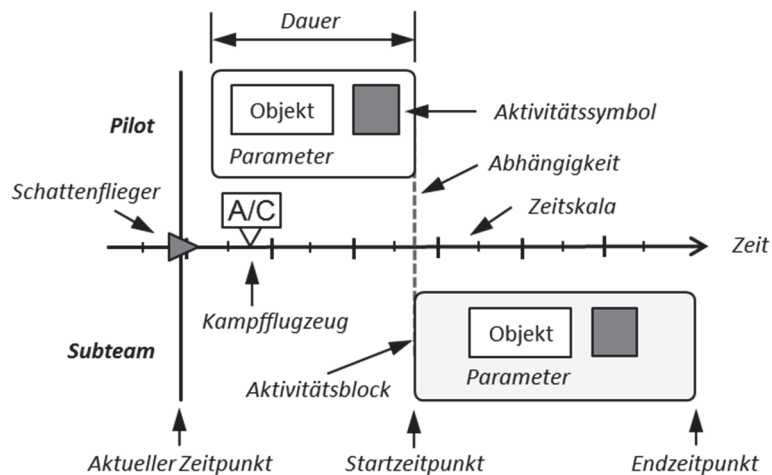


Abbildung 52: Anzeigekonzept zur Visualisierung von Koordinationsinformationen mit temporärem Bezug

In Abbildung 52 ist ein mögliches Anzeigekonzept zur Visualisierung der temporären Informationen gezeigt. Der Zeitstrahl ist in zwei Bereiche geteilt. Der obere Bereich stellt dabei die Aufgaben des bemannten Kampfflugzeuges und der untere Bereich die Aufgaben des unbemannten Subteams dar. Jede Aktivität wird durch einen eigenständigen Aktivitätsblock repräsentiert. Durch Abgleich der ersten Kante mit der Zeitskala kann der prognostizierte Start- und mit der zweiten Kante der Endzeitpunkt festgestellt werden. Die Differenz der Zeiten beinhaltet die voraussichtliche Durchführungsdauer. Zusätzlich kann jeder Block über weitere Informationen, wie Objekt, Aktivität oder objektrelevante Parameter, detaillierter spezifiziert werden. Die Abhängigkeiten zwischen Aktivitäten können wahlweise durch eine Linie zwischen den dazugehörigen Aktivitätsblöcken

visualisiert werden. In diesem Anzeigekonzept ist auch die Darstellung des bemannten Kampfflugzeuges sowie des dazugehörigen Schattenfliegers angedacht. Dies ermöglicht, wie auf dem erweiterten Kartendisplay, einen direkten Abgleich des Ist-Wertes mit dem Soll-Wert. Hierbei stellt der Schattenflieger immer den aktuellen Zeitpunkt am Zeitstrahl dar. Diese zeitlich bezogenen Koordinationsinformationen werden hier sowohl in einer räumlich/analogen als auch verbal/linguistischen Codierungsform auf der MAS visualisiert.

Neben diesen Koordinationsinformationen muss die MAS auch in der Lage sein, Assistenzsystemmeldungen in der Rolle *alerting assistance* dem Piloten näher zu bringen. Dazu soll zunächst die Aufmerksamkeit des Piloten über eine auditive Modalität auf eine hervortretende Assistenzsystemmeldung in der Form eines eindeutig zuordenbaren Warn-tones gelenkt werden. Parallel dazu soll ein visueller, blinkender Hinweis im Head-Up Display verwendet werden, um die auditive Aufmerksamkeitslenkung zu unterstützen (siehe z.B. [Zühlke, 2012]).

In dem Anzeigekonzept (siehe Abbildung 53) erfolgt die Darstellung der Meldung in der visuellen Modalität in der Codierungsform verbal/linguistisch auf dem MHDD. Je nach Situation beinhaltet diese Meldung nur eine Erläuterung über den festgestellten Missstand oder zusätzlich eine Beschreibung über eine vorgeschlagene Aufgabenvereinfachung (vgl. Abschnitt 3.4.3). Im ersten Fall der Aufmerksamkeitslenkung hat der Pilot die Möglichkeit die Erfassung des Missstandes zu bestätigen, um die Assistenzsystemmeldung als erledigt zu deklarieren. Im zweiten Fall der Überforderung bekommt der Pilot zusätzlich die Möglichkeit eine Aufgabenvereinfachung unmittelbar anzunehmen oder abzulehnen. Alternativ dazu soll durch Behebung des Missstandes die Meldung automatisch erlöschen.



Abbildung 53: Konzept zur Anzeige einer Assistenzsystemmeldung

Bedienkonzept – Pilot informiert TKM

Wie im Abschnitt 3.5.2 ermittelt, stehen innerhalb eines Kampfflugzeugcockpits nur eine limitierte Anzahl an Eingabeelemente zur Verfügung. Alle Eingaben zur kooperativen Teamkoordination sollen sowohl über die Funktionstasten der MHDDs, dem HOTAS-System, genauer über die Cursorsteuerung, als auch über das DVI-System zugänglich gemacht werden. Letzteres setzt natürlich voraus, dass dem Piloten der notwendige Wortschatz bekannt ist. Die unmittelbare Eingabe über berührungsempfindliche Cockpit-displays wäre auch denkbar, da dies zu einer Verbesserung der Leistungsfähigkeit des Mensch-Maschine-Systems sowie zur Reduzierung der Belastung des Bedieners führen kann (siehe z.B. [Kellerer, 2010]).

Im Allgemeinen kann die Eingabemaske eines Bedienkonzepts objekt- oder funktionsorientiert strukturiert werden [Zühlke, 2012]. Der Unterschied liegt im Wesentlichen in der Zuordnung von Funktionen und Objekten zueinander. Bei dem objektorientierten Design werden Funktionen einem Objekt und im funktionsorientierten Design werden die Objekte den Funktionen zugeordnet. In dieser Arbeit wird das funktionsorientierte Design vorgezogen, um ein möglichst realistisches Abbild der Arbeitsplatzumgebung, ähnlich zu dem im Kampfflugzeugmuster Eurofighter, wiederzugeben. Das bedeutet, es wird zuerst

eine Funktion ausgewählt und im zweiten Schritt ein Objekt, auf welches die vorgewählte Funktion angewendet werden soll.

Um die funktionsorientierte Eingabe von Koordinationsinformationen an das TKM über die Cursorsteuerung der HOTAS-Komponente und MHDDs zu realisieren, wird das MHDD um eine zusätzliche Page erweitert. Hierbei sollen zunächst alle im aktuellen Missionskontext möglichen Funktionen zur Teamkoordination angezeigt werden. Der notwendige Funktionsumfang ist bereits in Abschnitt 3.4.2 grundlegend erhoben worden. Eine detaillierte Übersicht liefert die Tabelle 6. Erst nachdem eine Funktion ausgewählt wurde, soll eine Liste mit Objekten, auf welche eine Anwendung der Funktion prinzipiell möglich ist, in Erscheinung treten. Für die visuelle Darstellung soll vorwiegend die verbal/linguistische Codierungsform zum Einsatz kommen.

4 Implementierung

In dem vorangegangenen Kapitel wurde ein Arbeitssystemkonzept zur teambasierten Führung mehrerer UCAVs aus einem einsitzigen Kampfflugzeug unter Verwendung von kognitiver Automation hergeleitet. Das finale Arbeitssystem kann der Abbildung 54 entnommen werden. Zur experimentellen Evaluierung dieses Systemansatzes werden nun die einzelnen technischen Systeme der OF sowie der OSM realisiert und in eine komplexe Simulationsumgebung implementiert.

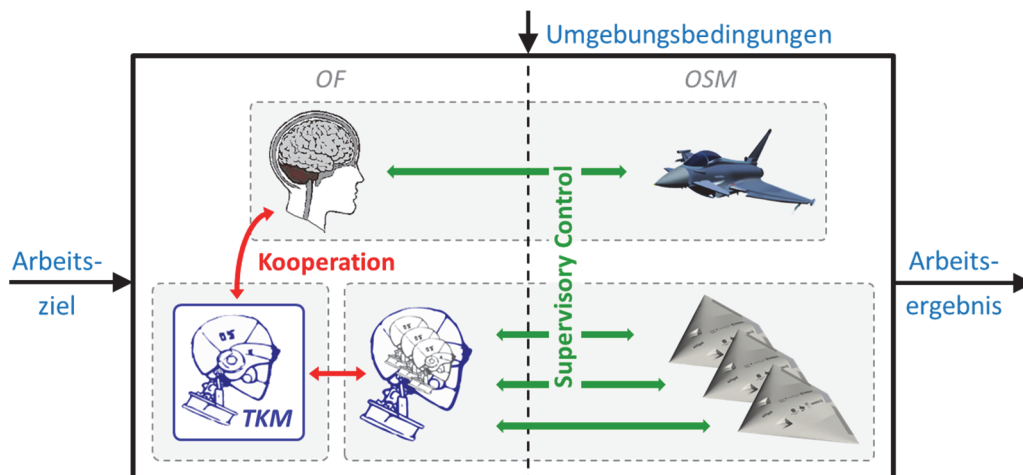


Abbildung 54: Finales Arbeitssystemkonzept zur teambasierten Führung mehrerer UCAVs aus einem einsitzigen Kampfflugzeug ohne explizite Darstellung der MAS

Das finale Arbeitssystem gemäß Abbildung 54 soll für die Entwicklung eines Laborprototypen in drei wesentliche Komponenten untergliedert werden, das bemannte Kampfflugzeug, das Team aus unbemannten Kampfflugzeugen sowie die Komponenten zur Unterstützung der Kooperation zwischen dem Piloten und der Automation der unbemannten Kampfflugzeuge. Die bemannte Komponente setzt sich aus einem Piloten und einem einsitzigen Kampfflugzeug, ausgestattet mit konventionellen Automationsystemen zur Führung, zusammen. Für die Abbildung des Kampfflugzeuges in der Simulationsumgebung wurde am Institut für Flugsysteme ein einsitziger Flugzeugsimulator mit Subsystemen (konventionelle Automation) für eine Luft-Boden-Angriffsmission realisiert. Dieser wird in Abschnitt 4.1 näher beschrieben. Im Anschluss daran wird im Abschnitt 4.2 auf die Implementierung der unbemannten Teammitglieder eingegangen. Neben der Simulation der unbemannten Plattform wird auch die an Bord integrierte OCU diskutiert. Die Kooperation zwischen dem Piloten und dem OCU-Subteam erfolgt über das TKM, wobei eine Mensch-Agenten-Schnittstelle für die tatsächliche Interaktion benötigt wird. Die technische Umsetzung dazu wird in Abschnitt 4.3 behandelt. Zielsetzung ist die Evaluierung des Systemansatzes in Simulatorversuchen. Hierzu ist die Szenariensimulation einer Luft-Boden-Angriffsmission erforderlich. Diese wird am Ende des Kapitels im Abschnitt 4.4 beschrieben.

4.1 Einsitziger Kampfflugzeugsimulator

Zur Integration der Funktionalitäten zur Multi-UCAV Führung im Cockpit wurde ein einsitziger Kampfflugzeugsimulator entwickelt. Dieser diente als Basis für die Integration der Systeme zur Mensch-ACU-Kooperation. Neben konventionellen Automationsystemen zur Führung des Kampfflugzeuges (z.B. Autopilot) im Kontext einer Luft-Boden-Angriffsmission verfügt der Simulator auch über eine entsprechende Missionsavionik (z.B. Waffen- und Selbstschutzsystem), um ein möglichst realistisches Arbeitsumfeld zu erzeugen. Darüber hinaus ist die Anordnung der Mensch-Maschine-Interaktionselemente im entwickelten Cockpit an das Kampfflugzeugmuster Eurofighter angelehnt, um eine gewohnte Arbeitsplatzumgebung für Piloten zu schaffen. In Abbildung 55 ist das Cockpit veranschaulicht.



Abbildung 55: Kampfflugzeugcockpit des realisierten Forschungssimulators

Das virtuelle Sichtsystem des Kampfflugzeugsimulators für den Piloten setzt sich aus drei einzelnen computergenerierten Außensichten (1 bis 3) zusammen. Neben der Generierung der virtuellen Umgebung wird die mittlere Außensicht (2) verwendet, um das HUD in den Sichtbereich des Piloten zu projizieren. Das Cockpit umfasst neben den drei MHDDs (4 bis 6) auch das HUP (7). Diese Cockpitdisplays versorgen den Piloten mit relevanten Informationen. Als Eingabeelemente zur Bedienung der verschiedenen Subsysteme verfügt der Flugsimulator über eingebaute Berührungsbildschirme (4 bis 7). Diese bilden neben den jeweiligen Displayinhalten auch die zugehörigen Funktionstasten ab. Ferner ist der Simulator mit einem HOTAS-System ausgestattet. Sowohl der Steuerknüppel (8) als auch der Schubhebel (9) sind dazu mit mehreren mechanischen Funktionstasten bestückt. Letztere weisen einen besonders hohen Realitätsgrad im Hinblick auf das Vorbild Eurofighter auf.

Im Abschnitt 4.1.1 wird der technische Aufbau des Kampfflugzeugsimulators aufgezeigt. Im Anschluss daran erfolgt im Abschnitt 4.1.2 eine Erläuterung der realisierten Mensch-Maschine-Schnittstellen im Cockpit.

4.1.1 Grundsätzlicher Aufbau und Funktionen

In Abbildung 56 ist die prinzipielle Simulationsarchitektur des entwickelten einsitzigen Kampfflugzeugsimulators schematisch dargestellt. Den linken sowie rechten Randbereich bilden die Interaktionselemente der Mensch-Maschine-Schnittstelle samt virtuellem Sichtsystem ab. Der mittlere Teil gibt den Hardware- und Software-Aufbau des Kampfflugzeugsimulators wieder, wobei ein grau hinterlegtes Element, wie *fighter* oder *voice*, ein eigenständiges Rechnersystem mit darauf befindlichen Softwaremodulen darstellt. Die Interprozesskommunikation (*Inter-Process Communication, IPC*), der Austausch von Daten, zwischen verschiedenen Rechnersystemen bzw. den darauf laufenden Softwaremodulen erfolgt über den Netzwerkstandard TCP/IP basierend auf der frei zugänglichen Softwarebibliothek *Spread Toolkit* [Stanton, 2002].

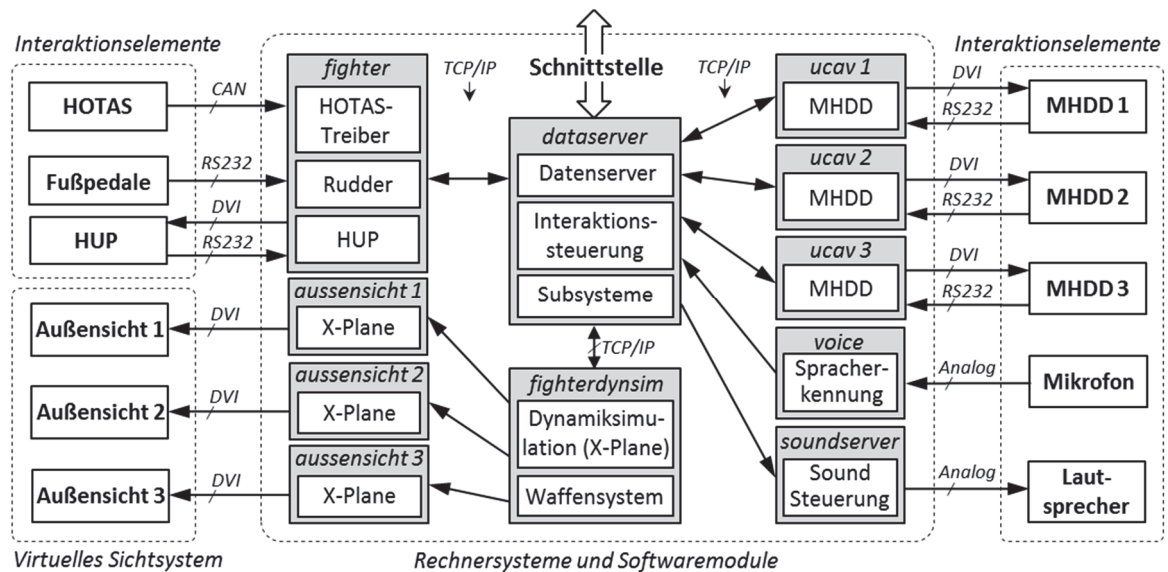


Abbildung 56: Prinzipieller Aufbau des Kampfflugzeugsimulators

Die Kampfflugzeugsimulation kann als ein abgekapseltes und eigenständiges Element in der Gesamtsimulation betrachtet werden, das ausschließlich über die *Schnittstelle* (vgl. Abbildung 56) mit der Umgebung kommunizieren kann. Diese Softwareschnittstelle stellt die Verbindung zur Szenariensimulation (vgl. Abschnitt 4.4) dar, in der initiale Parameter wie beispielsweise Startposition, Nutzlast, Bewaffnung und Treibstoffmenge übergeben werden. Ebenso wird die Szenariensimulation über den aktuellen Status, wie Position, Flugparameter oder Systemzustände kontinuierlich zur weiteren Verarbeitung informiert.

Datenserver und Interaktionssteuerung

Das Softwaremodul „*Datenserver*“ begründet den Kern der Kampfflugzeugsimulation. Dieses ist für die Verwaltung und Aktualisierung aller Daten, wie taktische Lage oder Systemkonfigurationen, die innerhalb der verschiedenen Softwaremodule benötigt werden, verantwortlich. Es registriert Datenänderungen eigenständig und informiert notwendige Benutzer gemäß einem klassischen *Observer-Pattern* (siehe z.B. [Lahres & Rayman, 2009]). Der Datenserver ist auch für die Erfassung aller Piloteneingaben zuständig, die Auswirkung auf weitere Softwaremodule nehmen.

Eine detektierte Eingabe wird vom Datenserver an das Modul „*Interaktionssteuerung*“ weitergereicht. Dieses Modul analysiert zunächst die getätigte Eingabe und informiert all

jene Softwaremodule, auf die diese Eingabe eine unmittelbare Auswirkung hat. Ändert der Pilot beispielsweise einen Autopilotenparameter über das HOTAS-System, so wird dieser Wert sowohl an die Autopilotenfunktionen der Dynamiksimulation des Kampfflugzeuges als auch an die Softwaremodule, wie MHDD oder HUD, zur visuellen Darstellung des geänderten Wertes, übermittelt.

Dynamiksimulation des Kampfflugzeuges und virtuelles Sichtsystem

Für die Abbildung des dynamischen Flugverhaltens des Kampfflugzeuges wird auf die kommerzielle Software *X-Plane* [Laminar Research, 2013] zurückgegriffen. Zum Einsatz kommt ein Eurofighter ähnliches Kampfflugzeugmodell. Darüber hinaus werden die von dieser Software bereitgestellten Autopilotenfunktionen für Höhe, Geschwindigkeit und Kurs genutzt.

Damit die Dynamiksimulation des Kampfflugzeuges mit dem Datenserver relevante Daten austauschen kann, wird eine entsprechende Softwareschnittstelle benötigt. In *X-Plane* kann dies über *Plug-Ins* bewerkstelligt werden. Ein Plug-In ist ein spezielles Programm, das zur Laufzeit von der Dynamiksimulation in regelmäßigen Zyklen aufgerufen wird. Zum Datenaustausch mit dem Softwaremodul „Datenserver“ wird eine einfache Serverapplikation in das Plug-In eingebracht. Dieser Server ist in der Lage, verschiedenste Daten von der Dynamiksimulation des Kampfflugzeuges, wie Fluglage, Position, Triebwerksdrehzahl oder auch Autopilotenzustände, nach außen zur weiteren Nutzung zur Verfügung zu stellen. Er wird auch herangezogen, um Daten vom Softwaremodul „Datenserver“ in das Plug-In zu übertragen. Bei diesen Daten handelt es sich ausschließlich um Parameter, die Einfluss auf die Dynamiksimulation des Kampfflugzeuges nehmen. Hierzu zählen beispielsweise die Anpassung von Autopilotenparametern, die Änderung der Klappenstellung von Auftriebshilfen oder die Weitergabe von Steuereingaben über die primären Bedienelemente.

Die kommerzielle Software *X-Plane* kann auch für die Abbildung eines computergenerierten virtuellen *Sichtsystems* herangezogen werden. Im Allgemeinen ist diese Software in der Lage, mehrere Außensichten auf einem Rechnersystem zu rendern. Dies führt bei mehrkanaligen Sichtsystemen zu nicht akzeptablen Qualitätseinbußen. Der Grund hierfür liegt in den hohen Anforderungen an Rechen- und Grafikleistung eines Rechnersystems zur detailgetreuen Abbildung der Umwelt. Daher wird das 3-Kanal Sichtsystem auf drei leistungsstarke Rechnersysteme, mit jeweils einer eigenen installierten Version von *X-Plane*, verteilt. Die Synchronisierung der verschiedenen virtuellen Außensichtsysteme untereinander sowie mit der Dynamiksimulation des Kampfflugzeuges führt *X-Plane* eigenständig aus. Damit das Sichtsystem neben Standardobjekten auch Missionsobjekte, wie Flugabwehrstellungen oder Kampfflugzeuge, abbilden kann, werden die jeweiligen Außensichten mit einem Plug-In erweitert. Über eine Serverschnittstelle empfängt das Plug-In kontinuierlich die aktuell vorliegende taktische Lage, um aufbauend darauf sichtbare Missionsobjekte in den Außensichten positions- und lagebezogen darzustellen.

Interaktionselemente

Zur manuellen Führung des simulierten Kampfflugzeuges stehen in dem Flugsimulator verschiedene Bedienelemente zur Verfügung. Das *HOTAS-System* (siehe Abbildung 57) setzt sich aus einem *Stick* (1), zur Steuerung des Flugzeuges über die Querachse (Nickwinkel) sowie Längsachse (Rollwinkel), und einem *Schubhebel* (2) zur manuellen Regelung der Triebwerksleistung zusammen. Stick und Throttle sind mit verschiedenen Knöpfen und Tasten bestückt, die vom Piloten zur Bedienung von Subsystemen, wie Waffensystem, Luftbremse, DVI oder Autopilot, herangezogen werden können.

Die systemtechnische Anbindung an die Simulation findet über ein CAN (Controller Area Network)-Bus System auf Basis des standardisierten CAN-Aerospace Protokolls [Stock, 2006] über das Rechnersystem „fighter“ (vgl. Abbildung 56) statt. Dazu wird ein eigens entwickelter *HOTAS-Treiber* genutzt, der alle Eingaben in diese Bedienelemente registriert und an den Datenserver weiterleitet.

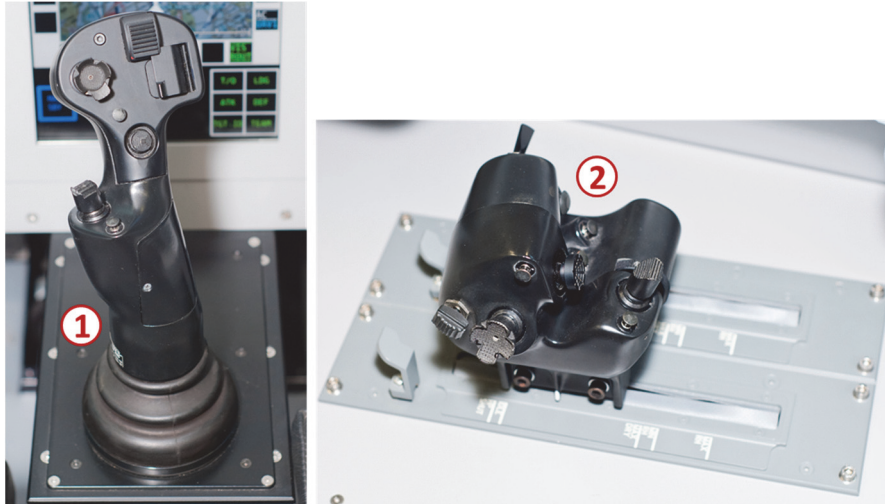


Abbildung 57: HOTAS-Bedienelemente im Kampfflugzeugsimulator

Neben diesen Bedienelementen sind *Fußpedale* zur Steuerung des Kampfflugzeuges über die Hochachse (Gierwinkel) im Flug und der Rollrichtung am Boden im Kampfflugzeugsimulator integriert. Die Betätigung der Radbremßen erfolgt auch über dieses Bedienelement. Da diese Komponente über keine Schnittstelle zur Anbindung an ein Rechnersystem verfügt, werden die verschiedenen Drehachsen der Pedale über Widerstandspotentiometer und zugehörige Spannungsteiler messtechnisch erfasst und dem Rechnersystem „fighter“ über einen RS232 auslesbaren Analog-Digital Wandler zugänglich gemacht. Das Softwaremodul „Rudder“ wandelt die digitalisierten Eingangswerte kontinuierlich in Positionsinformationen der Pedale um. Werden Piloteneingaben detektiert, erfolgt eine Weiterleitung dieser Eingaben an den Datenserver.

Die im Kampfflugzeugcockpit verbauten Displaysysteme (*MHDD 1 bis 3* und *HUP*) sind mit Touchscreen Komponenten ausgestattet. Damit diese als Eingabemedium genutzt werden können, werden sie über eine RS232-Schnittstelle mit den zugehörigen Rechnersystemen (*ucav 1 bis 3* und *fighter*) verbunden und vom Softwaremodul (*MHDD* und *HUP*) als externe Eingaben berücksichtigt. Die Softwaremodule „*MHDD*“ und „*HUP*“ dienen vorwiegend der grafischen Abbildung von Informationen, wie Flugparameter oder Systemzustände, im Kampfflugzeugcockpit. Ein weiteres Anzeigeelement im Cockpit bildet das HUD. Hierfür wird die mittlere Außensicht um ein Plug-In erweitert. Dieses Plug-In rendert eine simulierte HUD-Anzeige in den zentralen Sichtbereich des Piloten.

Damit dem Piloten neben visuellen Informationen auch auditive Informationen dargelegt werden können, ist der Simulator mit einem Headset ausgestattet. Über die Lautsprecher können Warnsignale oder verbal formulierte Mitteilungen ausgegeben werden. Darüber hinaus verfügt das Headset über ein Mikrophon, dass für die Erfassung von Spracheingaben dient.

Simulation von Subsystemen

Die *Fuel Simulation* bildet den Treibstoffverbrauch in Abhängigkeit der Triebwerksdrehzahl, Nachbrenneraktivität und Flughöhe, angelehnt an die Spezifikationen des EJ200 Turbofan Triebwerkes (Eurofighter), ab. Neben dem Verbrauch wird auch die Treibstoffentnahme aus den verschiedenen Treibstofftanks simuliert, wobei der Pilot neben einem automatischen Betrieb die Entnahme manuell über die Mensch-Maschine-Schnittstelle im Cockpit steuern kann.

Die *CAMU (Communications and Audio Management Unit)* ist für die Übermittlung von auditiven Informationen zwischen dem Piloten und den Cockpit-internen Systemen (z.B. auditive Warnmeldungen oder DVI-Eingaben) sowie zwischen dem Piloten und einem simulierten Sprechfunksystem (vgl. Abschnitt 5.1.7) verantwortlich. Eine zentrale Aufgabe der CAMU ist es, verschiedene Subsysteme softwaremäßig und funktional miteinander zu verbinden. Zu diesen Subsystemen gehören vor allem die Spracherkennung, die Soundsimulation sowie die zugehörigen Bedienelemente (z.B. das Sprechfunkpanel im HUP oder die *Push-to-Talk* Funktionsschalter am HOTAS). Registriert beispielsweise die CAMU eine Betätigung der DVI-Taste am HOTAS, wird die Spracherkennung aktiviert. Für die Ausgabe von auditiven Informationen, wie Sprachmitteilungen oder Warntöne über den Kopfhörer des Piloten, nutzt die CAMU einen kommerziellen *Soundserver* der Firma Wetzel Technology. Die Generierung der Sprachausgabe findet dabei über die Software *AT&T Natural Voices* [AT&T Corporation, 2002] statt.

Für eine automatisierte *Spracherkennung* im Zuge der Abbildung des DVI-Subsystems wird die Software *VoCon 3200* [NUANCE Communications, 2007] verwendet. Ein vorverstärktes Mikrofonsignal wird dazu über eine Soundkarte im Rechnersystem „voice“ dem Softwaremodul zugänglich gemacht. Diese Spracherkennungssoftware nutzt eine vorab definierte Grammatik, die alle zu detektierenden Wörter und Sätze beinhaltet. Ein Satz setzt sich dabei aus mehreren Wörtern zusammen, die einem genau definierten Satzaufbau (Aneinanderreihung der Wörter) folgen. Sprachelemente sowie Satzstrukturen, die nicht in dieser Grammatik aufgeführt sind, können somit nicht erfasst werden. Um die Erkennungsrate zu erhöhen, kann im Vorfeld eine Sprecheradaption durchgeführt werden, die vor allem die personenbezogene Aussprache bei der Erkennung mit berücksichtigt. Ein erkanntes Sprachkommando wird über ein programmiertes Interface an den Datenserver weitergereicht. Dieser wiederum leitet das darin enthaltene Kommando an die entsprechenden Softwaremodule zur weiteren Verarbeitung weiter. Parallel dazu liefert die CAMU unter Verwendung einer computergenerierten Sprachmitteilung ein Feedback über die erkannte Eingabe.

Das *Pilot Information System* wird für die Simulation von *Warnsystemen* genutzt. Dieses System weist den Piloten auf Bedienfehler der konventionellen Automationsysteme hin. Damit dieses Modul hierzu befähigt ist, benötigt es einen Zugriff auf unterschiedliche Daten, die im Datenserver zentral hinterlegt sind. Eine gesetzte Parkbremse im Rollvorgang zur Startposition, ein nicht eingefahrenes Fahrwerk bei zu hohen Geschwindigkeiten oder die Annäherung an unerlaubte Geschwindigkeitsbereiche bei vorliegender Flugzeugkonfiguration (z.B. Klappenstellung der Auftriebshilfen) rufen eindeutige für den Piloten zuordenbare Warnsignale hervor. Die Mitteilung dieser Informationen erfolgt auditiv über die CAMU sowie visuell über das HUD.

Ein weiteres simuliertes Subsystem ist das *Traffic Alert and Collision Avoidance System (TCAS)*. Hierbei handelt es sich um ein Kollisionswarnsystem, das den Piloten über Zusammenstöße mit anderen Luftfahrzeugen, wie den unbemannten Teammitgliedern, informiert. Die Informationen zu den Positionen und Flugparametern (z.B. Flugrichtung)

der weiteren in der Simulation vorhandenen Luftfahrzeuge werden direkt über die taktische Lage, hinterlegt am Datenserver, abgegriffen.

Der Kampfflugzeugsimulator ist mit einem *Ground Proximity Warning System (GPWS)* ausgerüstet. Dieses System alarmiert den Piloten über eine bevorstehende Kollision mit der physikalischen Umgebung, wenn es zu keiner unmittelbaren Veränderung des Flugweges kommt. Für die Berechnung der Kollisionsvermeidung mit der Umgebung wird auf eine hinterlegte Geländedatenbank zurückgegriffen.

Selbstschutzsystem und Waffensystem

Militärische Kampfflugzeuge verfügen oftmals über ein integriertes Selbstschutzsystem. Dieses System analysiert eigenständig die Umgebung auf Bedrohungen und setzt die Flugzeugbesatzung über potentielle Gefahren in Kenntnis. Je nach verfügbaren Betriebsarten kann ein solches System meist eigenständig bestimmte Abwehrmaßnahmen initiieren, um einen potentiellen Verlust der Plattform zu vermeiden. Zu den Abwehrmaßnahmen gehören typischerweise der Ausstoß von Täuschkörpern, wie Chaffs, Flares und/oder Decoys (siehe z.B. [De Martino, 2012]).

Um ein solches Selbstschutzsystem in der Simulationsumgebung zu implementieren, ist der Flugsimulator mit einem simulierten *Radarwarnempfänger (Radar Warning Receiver, RWR)* und *Raketen-Anflug-Warnsystem (Missile Approach Warning, MAW)* ausgestattet. Der RWR dient der sensorischen Erfassung der Richtung und Position von feindlichen Radarsignalen, die unmittelbar das Kampfflugzeug anstrahlen. Die Aufgabe des MAW besteht darin, die Flugrichtung und Entfernung einer sich nähernden feindlichen Rakete zu ermitteln. Damit diese Subsysteme in der Simulationsumgebung abgebildet werden können, versorgt die Szenariensimulation (vgl. Abschnitt 4.4) den RWR und den MAW mit Informationen (z.B. Position) zu relevanten Objekten, die in dessen sensorischen Erfassungsbereichen liegen. Über geometrische Beziehungen werden daraus die benötigten Daten errechnet. Diese Daten nutzt das simulierte Selbstschutzsystem, um gegebenenfalls weitere Handlungen abzuleiten. Liegt eine potentielle Bedrohung vor, wie eine aktive Flugabwehrstellung oder ein feindlicher Flugkörper, dann informiert das Selbstschutzsystem den Piloten über eindeutig zuordenbare Warnsignale (auditiv über die CAMU und visuell über das HUD).

Unterschreitet im Falle einer sich auf das Kampfflugzeug nähernden Rakete einen prognostizierten Einschlagzeitpunkt, ohne dass bereits eine Handlung des Piloten hinsichtlich einer Selbstschutzmaßnahme erfolgte, dann wählt das Selbstschutzsystem eigenständig ein geeignetes Selbstschutzprogramm aus und aktiviert dieses. Der prognostizierte Einschlagzeitpunkt wird dabei aus der Schrägentfernung zwischen der Rakete und dem Kampfflugzeug zur Relativgeschwindigkeit berechnet. Ein *Selbstschutzprogramm* definiert die Art, Menge und den zeitlichen Versatz zwischen Ausstößen von Täuschkörpern die je nach Bedrohungslage variieren können. So werden Chaffs benötigt, um Lenkwaffen mit Radarsuchköpfen und Flares, um Lenkwaffen mit Infrarotsuchköpfen abzuwehren.

Neben einem Selbstschutzsystem ist der Kampfflugzeugsimulator auch mit einer *Waffensystemsimulation* [Brand, 2012] ausgestattet, um die Bekämpfung eines bodengebundenen Zielobjektes mit einer lasergelenkten Bombe relativ realitätsgetreu durchführen zu können. Über das simulierte Waffensystem kann der Pilot einen entsprechenden Effektor aus der mitführenden Nutzlast für den Abwurf über die MMS auswählen. Dafür berechnet das Waffensystem unter Berücksichtigung verschiedener Parameter, wie Abwurfgeschwindigkeit, -höhe und -richtung des Kampfflugzeuges, den sogenannten *Weaponbasket*, der den Abwurfbereich der Bombe darstellt. In Abbildung 58 ist der Weaponbasket in Bezug

auf ein Zielobjekt schematisch dargestellt. Grundsätzlich kann zwischen einem *statischen* und *dynamischen Weaponbasket* unterschieden werden. Der statische Basket repräsentiert den bei der Planung im Vorfeld ermittelten Abwurfbereich. Hingegen bildet der dynamische Basket den Abwurfbereich unter den aktuell vorliegenden Bedingungen (z.B. Flughöhe oder –geschwindigkeit) ab. Aus Sicht des Piloten stellt der dynamische Basket jenen Bereich dar, in dem der Effektor abgeworfen werden muss, um eine erfolgreiche Bekämpfung sicherzustellen.

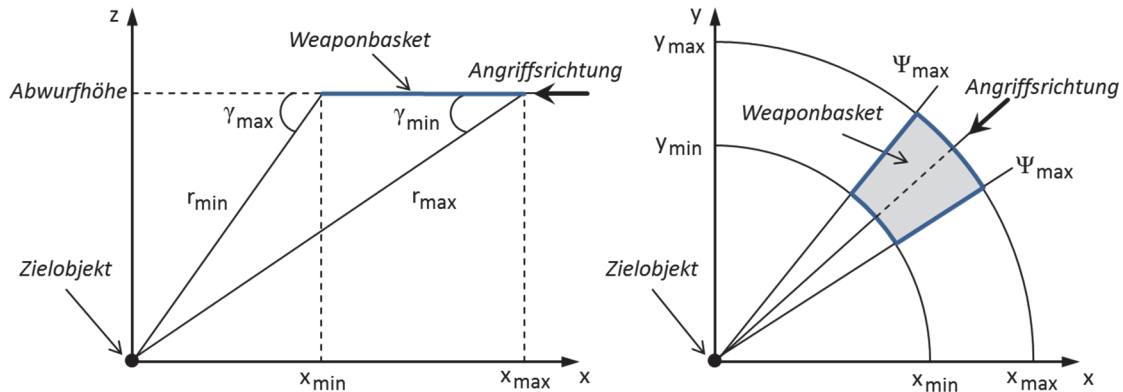


Abbildung 58: Vertikale (links) und horizontale (rechts) Darstellung des Weaponbaskets in Anlehnung an [Brand, 2012]

4.1.2 Displaysysteme

Im Kampfflugzeugsimulator bilden grundsätzlich die verschiedenen Displaysysteme die wichtigsten Flugführungsinformationen für den Piloten ab. Zur Anzeige werden vor allem Systemzustände, Flugparameter sowie Warnungen und Hinweise gebracht. Verantwortlich für die Generierung der grafischen Oberflächen sind die im vorigen Abschnitt 4.1.1 bereits erwähnten Softwaremodule „MHDD“, „HUP“ und „HUD“ (Plug-In).

Die jeweiligen Softwaremodule sind gemäß dem *Model-View-Controller* Muster (siehe z.B. [Lahres & Rayman, 2009]) strukturiert aufgebaut. Dieser Ansatz sieht vor, die Software in drei Elementen zu gliedern. In den realisierten Softwaremodulen bildet das *Model* den Datenspeicher ab, der sämtliche Informationen enthält. Die *View* greift lesend auf das Model zu und bringt die enthaltenen Daten im Cockpit zur Anzeige. Die View repräsentiert somit die eigentliche Benutzeroberfläche (*Graphical User Interface, GUI*). Das dritte Element, der *Controller*, ist schlussendlich für die Erfassung von Piloteneingaben zuständig. Je nachdem ob eine Eingabe lokale oder globale Auswirkung hat, werden entweder die lokal abgespeicherten Daten durch den Controller modifiziert oder die Eingabe an das zentrale Softwaremodul „Datenserver“ zur weiteren Verarbeitung geleitet (vgl. Abschnitt 4.1.1 – Datenserver). Der Controller ist auch verantwortlich, um neue Informationen, mitgeteilt durch den Datenserver, in das lokale Model einzupflegen. Ebenso veranlasst dieser das „Neuzeichnen“ der View.

Im Nachfolgenden werden die wichtigsten Teile und Funktionen der realisierten Benutzeroberflächen der jeweiligen Softwaremodule, die ausschließlich zur Führung des Kampfflugzeugsimulators gedacht sind, zusammengefasst dargestellt. Die Implementation der Mensch-Agenten-Schnittstelle zur teambasierten Führung wird im Abschnitt 4.3.2 behandelt.

Das *HUD* projiziert (siehe Abbildung 59) verschiedene Flugparameter, wie Steig- bzw. Sinkrate (1), Höhe (2), Fluglagen (3), Kurs (4) und Geschwindigkeit (5) in den Sichtbereich des Piloten. Im Falle eines aktiven Autopiloten werden die selektierten Parameter Geschwindigkeit, Kurs und Höhe (6) abgebildet. Am rechten unteren Rand befindet sich eine kombinierte RWR und MAW Anzeigeinheit (7). Die Richtung zu einer emittierenden feindlichen Radarstation bezogen auf das Kampfflugzeug wird durch gefüllte Kreis-segmente gekennzeichnet, während die Entfernung zweistufig über die inneren („nahe“) bzw. äußeren („sehr nahe“) Kreissegmente verdeutlicht wird. Darüber hinaus wird ein Pfeilsymbol genutzt, um die Richtung einer sich nähernden feindlichen Rakete zu markieren. Visuelle Systemmitteilungen (8), wie Warnungen oder Hinweise, werden auch über dieses Displaysystem dargestellt.

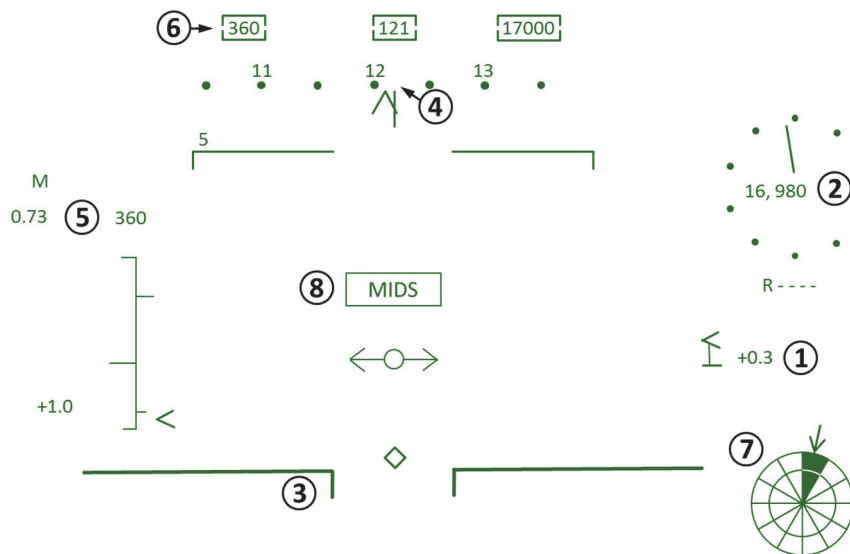


Abbildung 59: Head-Up Display mit kombinierter RWR und MAW Anzeigeinheit

Das *HUP* ist ein zentral angeordnetes Display im Cockpit und enthält verschiedene Bedien- sowie Anzeigeelemente (siehe Abbildung 60). Über Funktionstasten (1) kann das Fahrwerk ein- bzw. ausgefahren, die Feststellbremse oder auch eine künstliches Stabilisierungssystem des Kampfflugzeuges aktiviert bzw. deaktiviert werden. Das MIDS-Interface ermöglicht das Erstellen (2) sowie das Anzeigen (3) von erhaltenen Meldungen. In der Abbildung 60 ist ein über MIDS erteilter Missionsauftrag von einer übergeordneten Kommandostelle dargestellt. Über die Kommunikationseinheit (4) können verschiedene Einstellungen, wie Änderung einer Frequenz für den Sprechfunk oder Aktivierung des DVI-Systems, vorgenommen werden. Dieses Display wird auch genutzt, um essentielle Parameter (z.B. Triebwerksparameter) (5) dem Piloten kontinuierlich zu präsentieren.

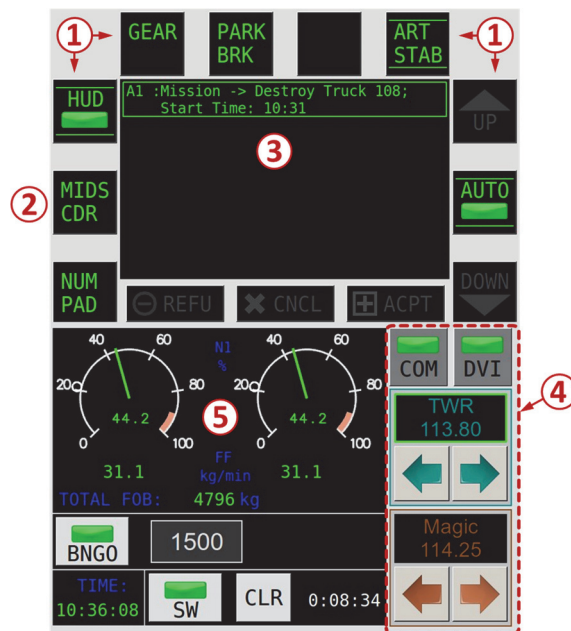


Abbildung 60: Head-Up Panel mit Bedienelementen für Sprechfunk und MIDS

Im Kampfflugzeugsimulator sind drei *MHDDs* integriert. Die Benutzeroberfläche des zugehörigen Softwaremodules „MHDD“ setzt sich aus verschiedenen Pages zusammen. Jede der realisierten Pages bildet eine in sich thematisch abgekapselte Einheit. Über die Funktionstasten, die am linken, rechten und unteren Randbereich der *MHDDs* angeordnet sind, kann eine gewünschte Page in den Vordergrund gelegt werden. Neben der Auswahl der Page können über diese Tasten auch seiten- bzw. systemspezifische Funktionen angewählt werden. Die Bedienung der Funktionen ist gemäß einem funktionsorientierten Design (vgl. Abschnitt 3.5.3) implementiert. Im Nachfolgenden werden die verschiedenen Pages zur Führung des Kampfflugzeuges erläutert.

Für die Navigation und zur Darstellung von taktischen Missionselementen steht ein *Kartendisplay* (siehe Abbildung 61) im *MHDD*, basierend auf der kommerziellen Softwarebibliothek *Carmenta*, zur Verfügung. *Carmenta* ermöglicht eine vereinfachte Integration von Kartenmaterial samt Kartenbedienfunktionen (z.B. Zoomfunktion) in eine Softwareapplikation. Als Kartenmaterial werden Luftfahrtkarten mit unterschiedlichen Maßstäben (1:50 000, 1:250 000, 1:500 000) verwendet, die in Abhängigkeit von der Zoom-Stufe zur Darstellung gebracht werden. Neben der Veränderung der Zoom-Stufe sind im Kartendisplay weitere Funktionen implementiert. Die Karte kann beispielsweise nach Norden oder entsprechend des aktuellen Flugkurses ausgerichtet werden. Die Nachführung der Karte kann entweder manuell oder automatisiert über eine *Moving-Map Funktion*, bezogen auf die Position und Flugrichtung des Kampfflugzeuges, erfolgen. Zur Unterstützung von Navigationstätigkeiten kann der Pilot auf eine integrierte Kursrose (1) samt Anzeige der aktuellen Flugrichtung (2) sowie angewählter Autopilotenparameter für den Kurs (3) zurückgreifen. Darüber hinaus werden alle relevanten und bekannten Missionselemente in der Karte symbolhaft abgebildet. Im militärischen Umfeld existieren dazu vereinheitlichte Standards. Ein Vertreter ist der MIL-STD-2525C [U.S. Department of Defense, 2008]. Die darin spezifizierten Symbole werden im Rahmen dieser Arbeit weitgehend verwendet. Im Kartenausschnitt in Abbildung 61 sind beispielsweise zwei feindliche Flugabwehrstellungen (4) inklusiver operativer Reichweiten, das Missionsziel (5) sowie der statische Weaponbasket (6) dargestellt.

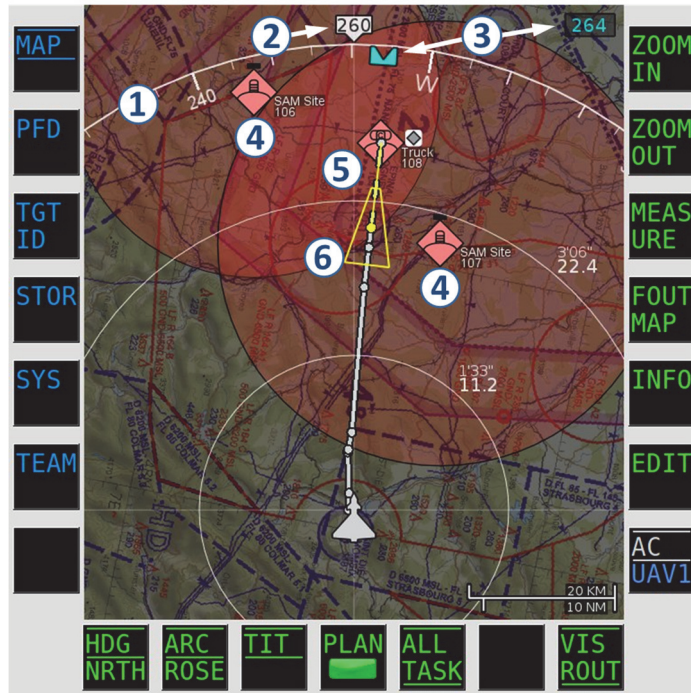


Abbildung 61: Kartendisplay zur Navigation und Darstellung der taktischen Lage

Für die Darstellung der essentiellen Flugparameter im MHDD ist ein *Primary Flight Display (PFD)* erstellt worden (siehe Abbildung 62). Im Prinzip handelt es sich um ein identisches Anzeigeelement zum bereits erläuterten HUD, jedoch um das kombinierte Anzeigeelement MAW und RWR sowie um die Anzeigefähigkeit von visuellen Warnmeldungen und Hinweisen reduziert.

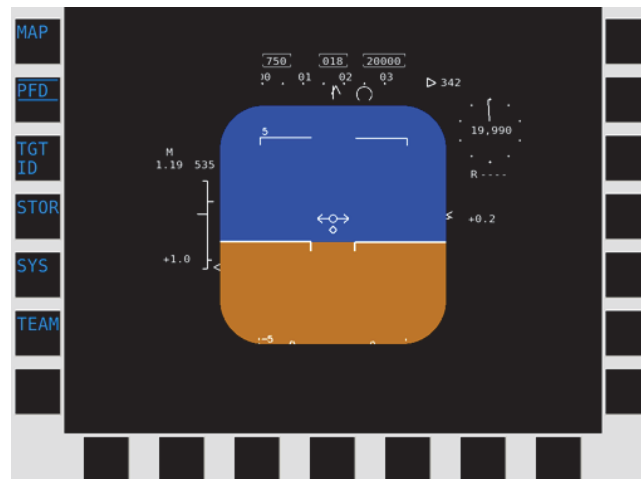


Abbildung 62: Primary Flight Display – Anzeige von relevanten Flugparametern

Zur Überwachung und Bedienung von simulierten Grundsystemen und sekundären Flugsteuerungssystemen sind unterschiedliche MHDD-Pages vorgesehen (siehe Abbildung 63). Die *Fuel-Page* (1) gibt den verfügbaren Treibstoffvorrat in Bezug auf die verschiedenen Kraftstofftanks sowie den aktuellen Treibstoffverbrauch wieder. Einstellungen zur Treibstoffentnahme können ebenfalls über diese Seite vorgenommen werden. Die *Engine-Page* (2) dient der Abbildung von Triebwerksparametern, die der Pilot zur Überwachung der Funktionstüchtigkeit der Triebwerke heranziehen kann. Die *Main-Page* (3) gibt die

Zustände der Luftbremse, der Flugzeugklappen (Slats und Flaps), des Fahrwerks und des Bremssystems (Feststell- und Radbremse) wieder und ermöglicht die Bedienung dieser Systeme (ausgenommen Radbremse).

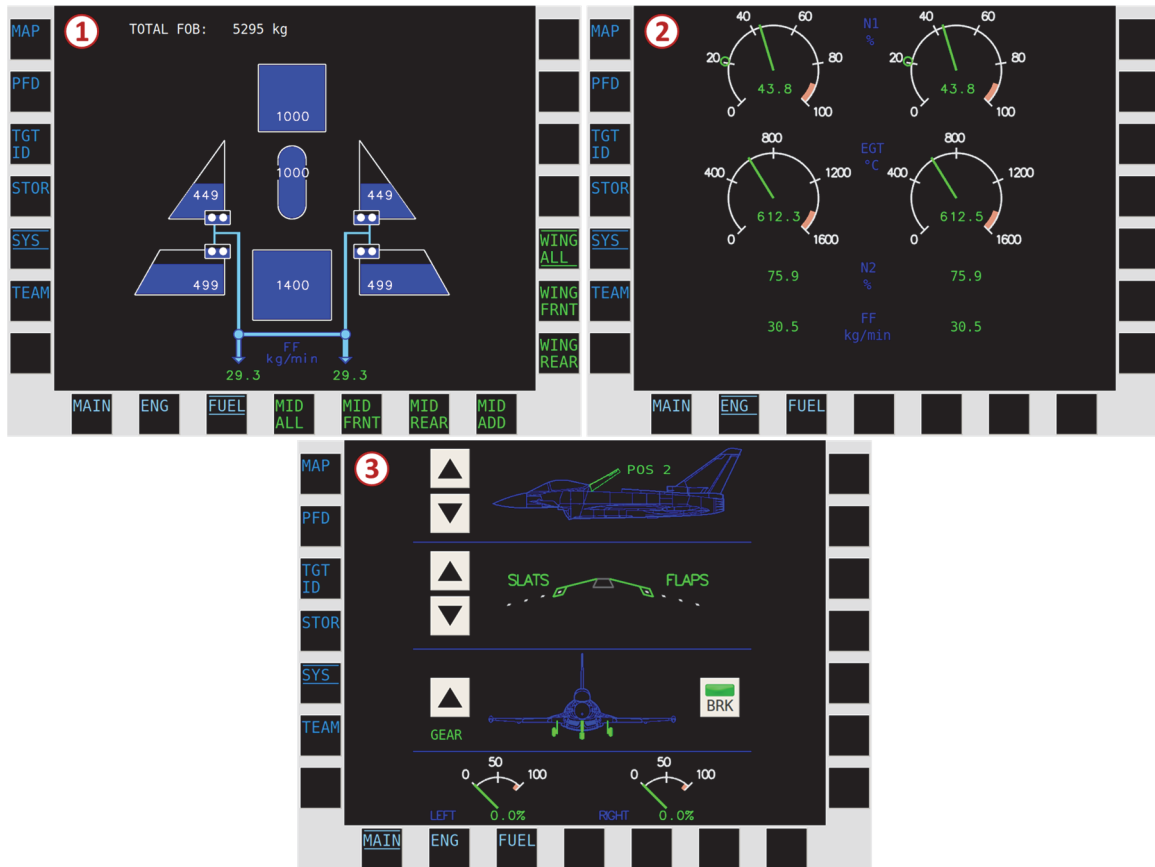


Abbildung 63: Mensch-Maschine-Schnittstelle zur Bedienung von simulierten Grundsystemen und sekundären Flugsteuerungssystemen

Die Bedienung der Missionsavionik erfolgt ebenfalls über zugehörige MHDD-Pages (siehe Abbildung 64). Über die implementierte *Weapon-Page* (1) kann ein spezifischer Effektor aus der an Bord befindlichen Nutzlast selektiert sowie für den Abwurf über den *MASS* (*Master Armament Safety Switch*) entschert werden. Über eine zugehörige Sub-Page (2) können weitere Informationen zum Zielobjekt, wie Angriffsrichtung, Höhe und Geschwindigkeit, spezifiziert werden. Diese Informationen werden von der Waffensystemsimulation herangezogen, um den Abwurfbereich zu errechnen und über das Kartendisplay in der Form eines statischen Weaponbaskets anzuzeigen. Die *DASS* (*Defensive Aids Sub System*)-Page (3) stellt die Bedienschnittstelle zu dem simulierten Selbstschutzsystem dar. Darüber können verschiedene Einstellungen, wie die Vorwahl eines spezifischen Selbstschutzprogrammes vorgenommen oder Funktionen, wie das Ausstoßen eines Schleppköders (*Decoy*), angewählt werden.

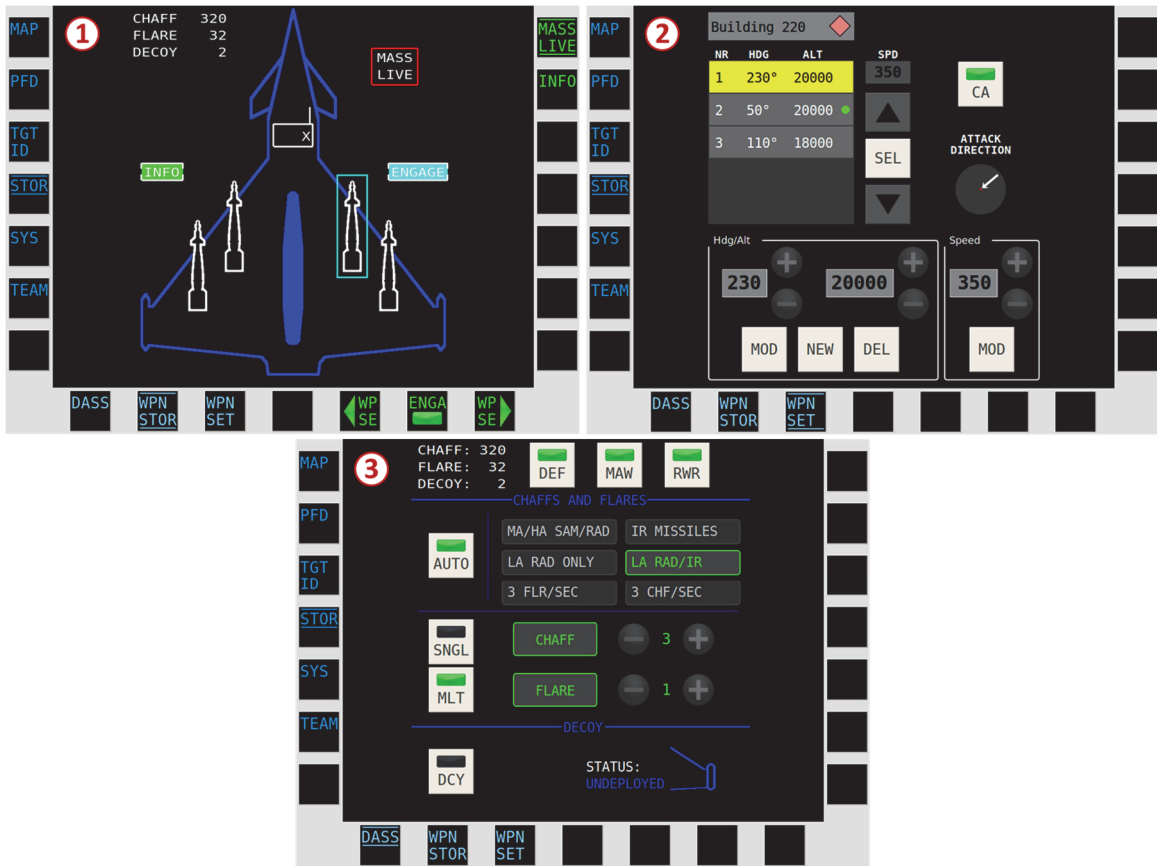


Abbildung 64: Benutzeroberfläche zur Bedienung der Missionsavionik

4.2 Unbemannte Teammitglieder

Die Simulation der unbemannten Kampfflugzeuge setzt sich aus verschiedenen Komponenten, wie in Abbildung 65 dargestellt, zusammen. Für die Abbildung eines einzelnen unbemannten Teammitgliedes sind jeweils eine Plattformsimulation, eine ACU [Meitinger, 2008][Lettl & Schulte, 2013][Gangl et al., 2014] sowie eine Sensorsimulation erforderlich, zu der auch die externe Kamerasimulation zu zählen ist. Da die Simulationen der jeweiligen Komponenten in der Regel hohe Rechenleistungen benötigen, werden diese auf unterschiedliche Rechnersysteme verteilt. Der Datenaustausch zwischen den Komponenten sowie mit der übergeordneten Missionssimulation findet über eine verteilte Server Architektur basierend auf dem CORBA Industriestandard (siehe z.B. [Puder & Römer, 2000]) über TCP/IP statt.

Im Nachfolgenden wird auf die Umsetzung der unbemannten Systeme in der Simulationsumgebung eingegangen. Der Abschnitt 4.2.1 beschreibt dazu die Plattformsimulation samt Führungssystemen. Damit die UCAVs die ihnen zugeteilten Aufgaben ausführen können, benötigen diese eine entsprechende Sensorausrüstung sowie Bewaffnung. Die Simulation dieser Systeme wird im Abschnitt 4.2.2 erläutert. Der Abschnitt 4.2.3 beinhaltet die Abbildung der zu den Plattformen zugehörigen kognitiven Agenten.

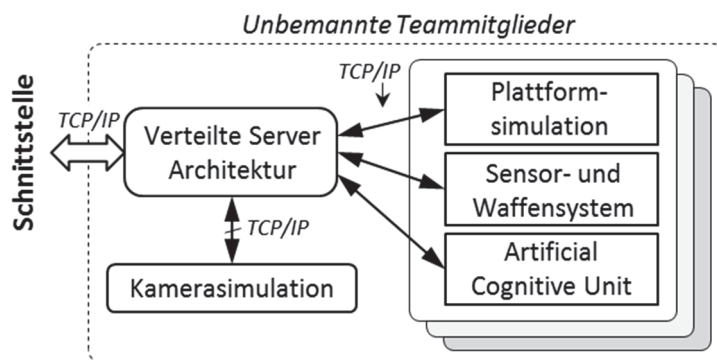


Abbildung 65: Schematischer Aufbau der Simulationsarchitektur der unbemannten Teammitglieder

4.2.1 Modellierung der Plattform

Für die technische Realisierung der unbemannten Plattformen wird auf das am Institut für Flugsysteme entwickelte Softwareprogramm *WingSim* [Vohla, 2010] zurückgegriffen. Dabei handelt es sich um ein Programm, das neben einer abgekapselten Plattform-simulation auch verschiedene Softwareschnittstellen, basierend auf den Standard CORBA, bereitstellt. Die Flugdynamiksimulation selbst wird über die frei zugängliche Bibliothek *JSBSim* [Berndt, 2011] realisiert. Als flugdynamisches Modell zur Abbildung der UCAV-Plattformen kommt ein generisches Kampfflugzeugmuster mit vergleichbaren Leistungsparametern der bemannten Plattform zum Einsatz.

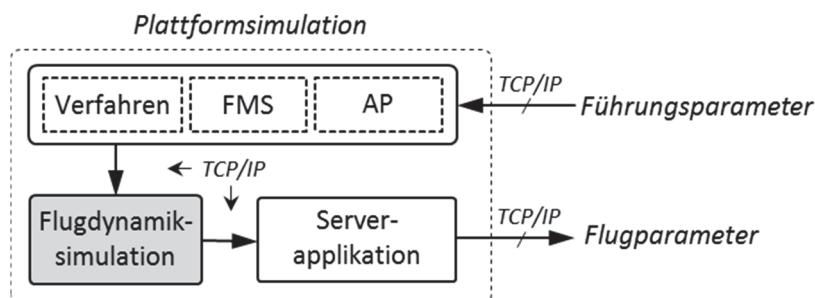


Abbildung 66: Plattformsimulation samt Softwareschnittstellen zur Führung

Wie aus der Abbildung 66 hervorgeht, steht den ACUs zur Führung der Plattform eine Softwareschnittstelle zur Bedienung der *Autopilotenfunktionen* zur Verfügung. Hierbei können Höhe, Kurs, Geschwindigkeit sowie Sink- bzw. Steigraten kommandiert werden. Ebenfalls ist eine Schnittstelle zur wegpunktbasierten Führung über ein *FMS* vorhanden. Darüber kann dem FMS eine Route durch eine sequentielle Liste von Wegpunkten vorgegeben werden, die anschließend automatisch abgeflogen wird. Eine weitere Softwareschnittstelle begründen die *Verfahren*. Diese Schnittstelle erlaubt, bestimmte Flugmanöver automatisiert ablaufen zu lassen. Implementiert sind Verfahrensabläufe zur Durchführung von Start- bzw. Landevorgängen, Warteschleifen, Aufklärungspattern und Zielmarkierungen. Neben Schnittstellen zur Systembedienung existieren auch Schnittstellen, um Daten aus der Plattformsimulation entnehmen zu können. Diese Daten beinhalten im Prinzip denselben Informationsumfang wie in einem vergleichbaren bemannten Kampfflugzeugcockpit dem Piloten über die MMS angeboten wird. Basierend auf diesen Flugparametern kann die ACU beispielsweise Kursabweichungen, verursacht durch

Windeinflüsse, feststellen und durch eine entsprechende Adaptierung des Flugkurses korrigieren. Diese Flugparameter werden über einen CORBA-Server den ACUs bereitgestellt.

4.2.2 Sensor- und Waffensysteme

Die UCAV-Plattformen sind mit einem simulierten Radarwarnempfänger und einem Raketen-Anflug-Warnsystem ausgestattet. Die Funktionsweise der Systeme sowie die technische Umsetzung ist identisch mit der des bemannten Kampfflugzeuges (vgl. Abschnitt 4.1.1).

Zusätzlich zu dieser Missionsausrüstung ist jede Plattform mit einem simulierten bildgebenden Sensor, einer Kamera, ausgestattet. Diese Kamera wird von den UCAVs herangezogen, um Bildmaterial von möglichen feindlichen Objekten anzufertigen. Der Pilot des bemannten Kampfflugzeuges kann auf diese Sensoren zugreifen, um bestimmte Zielobjekte detaillierter in der Form eines stabilisierten „Live-Streams“ oder einer frei bewegbaren Kamera zu begutachten. Die Anzahl der anzeigbaren „Live-Streams“ im Cockpit ist auf eins beschränkt. Das bedeutet, der Pilot kann zeitgleich nur auf einen Kamerasensor eines beliebigen UCAVs zugreifen, jedoch kann das Bild auf jeden der drei MHDDs, auch zeitgleich, zur Anzeige gebracht werden. Diese Einschränkung ermöglicht es, mit einer einzelnen Kamerasimulation in der Simulationsumgebung auszukommen. In Abbildung 67 ist der elementare Aufbau dieser Kamerasimulation veranschaulicht.

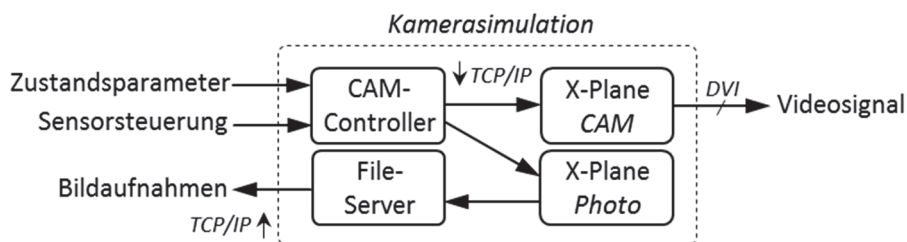


Abbildung 67: Architektur der Kamerasimulation

Das Softwareprogramm *CAM-Controller* ist für die Ausrichtung des simulierten Sensors in einer computergenerierten Umwelt zuständig. Grundsätzlich kann dieser bezogen auf ein sensorfestes Koordinatensystem um $\pm 180^\circ$ geschwenkt (pan) sowie um $\pm 90^\circ$ (tilt) geneigt werden. Darüber hinaus kann über die Variation des Zoomfaktors das Sensorbild vergrößert bzw. verkleinert werden. Die Kamera ist fiktiv auf der Unterseite der UCAV-Plattform befestigt und das Kameraobjektiv kann im Flug jede Position einer halbkugelförmigen Oberfläche einnehmen, um damit die Umgebung sensorisch zu erfassen. Für die Ermittlung der Lage der Kamera in der Umwelt wird die Kamerasimulation kontinuierlich mit verschiedenen Zustandsparametern der Trägerplattform, wie Position und Lage, versorgt. Die Steuerung des Sensors kann entweder über feste Pan, Tilt und Zoom-Werte sowie über eine geografische Position auf der Erdoberfläche erfolgen. Im zweiten Fall müssen die verschiedenen Sensorparameter (Pan, Tilt und Zoom) kontinuierlich in Abhängigkeit von Position und Fluglage der Trägerplattform nachgeführt werden. Dazu nutzt der CAM-Controller neben der gewünschten Position auf der Erdoberfläche die Lagewinkel (Roll-, Nick- und Gierwinkel) sowie die Position der UCAV-Plattform bezogen auf ein erdfestes Koordinatensystem und ermittelt daraus die Kameraausrichtung. Über die Schrägentfernung findet eine automatisierte Adaptierung des Zoomfaktors statt.

Für die Simulation der Umwelt wird hier erneut auf das Softwareprogramm X-Plane zurückgegriffen. Neben dem Plug-In zur Darstellung der Missionsobjekte (vgl. Abschnitt 4.1.1) in der virtuellen Umgebung wird ein zusätzliches Plug-In eingebracht. Dieses ist zuständig die simulierte Kamera in der computergenerierten Umwelt positions- und lagebezogen auszurichten. Die notwendigen Informationen dazu erhält das Plug-In in regelmäßigen Abständen vom CAM-Controller.

Für die Sensorsimulation werden zwei voneinander unabhängig, jedoch identische, X-Plane Systeme verwendet (vgl. Abbildung 67). Ein System ist verantwortlich das Videosignal für den Live-Stream zu generieren, während das andere für das Anfertigen von Bildmaterial (z.B. Aufklärungsfotos) genutzt wird. Diese getrennte Handhabung ermöglicht die Betrachtung eines Kamera Live-Streams sowie die zeitgleiche Aufnahme von Bildern. Das digitale Videosignal wird dabei über eine PC-Grafikkarte abgegriffen und über ein Videokabel den einzelnen Softwaremodulen „MHDD“ zugänglich gemacht. Die Bildaufnahmen werden hingegen zentral auf einen File-Server hinterlegt.

Neben den beschriebenen Sensorsystemen sind die unbemannten Teammitglieder mit Luft-Boden-Raketen ausgestattet. Die Bedienung dazu erfolgt über ein simuliertes *Waffensystem*. Durch die Angabe eines Zielobjektes und Auswahl einer typenspezifischen Rakete ermittelt die Waffensystemsimulation die Wirkreichweite unter Einbeziehung des dazugehörigen flugdynamischen Modells. Als Modellvorstellung kommt in dieser Arbeit ein einfaches kinematisches Modell zum Einsatz, das sich vom Abschussort linear mit einer typenspezifischen Fluggeschwindigkeit in Richtung Ziel bewegt. Die Wirkreichweite entspricht dem maximal zurücklegbaren Flugweg der Waffe. Sobald das Zielobjekt in der Wirkreichweite der Luft-Boden-Rakete liegt, kann diese per Startkommando abgefeuert werden.

4.2.3 Kognitive Systeme an Bord der UCAVs

Jedes unbemannte Teammitglied ist mit einer eigenen, aber identischen *Complementing OCU* ausgestattet, die prinzipiell über vergleichbare Fähigkeiten verfügt, wie ein bemanntes Kampfflugzeug mit einem adäquaten Piloten. Für die Realisierung wurde auf eine bereits entwickelte ACU aus der Forschungsstudie *COSY^{Team}* [Meitinger & Schulte, 2006a][Meitinger & Schulte, 2007a] (vgl. Abschnitt 2.4.5.5) zurückgegriffen. Diese ACU wird in einer modifizierten Version in dieser Arbeit wieder verwendet. Die Modifikationen umfassen vorwiegend den Ausbau der kooperativen sowie missionsbezogenen Fähigkeiten [Gangl et al., 2014]. Zusätzlich ist eine *Selbsterklärungsfähigkeit* [Lettl & Schulte, 2013] implementiert worden, die in der Lage ist, das beobachtbare Verhalten der UCAVs dem Piloten zu erklären. Die Erklärung kann entweder auf Anfrage durch den Piloten initiiert werden oder aufgrund eines vorliegenden Situationskontextes eigenständig erfolgen.

Wie [Meitinger, 2008] entnommen werden kann, wurden die kognitiven Agenten an Bord der unbemannten Kampfflugzeuge unter Verwendung der kognitiven Systemarchitektur *COSA* [Putzer & Onken, 2001] realisiert. Hierbei wird Wissen, welches nach dem *kognitiven Prozess* [Putzer & Onken, 2001] strukturiert ist, aus den Anwendungsdomänen Missionserfüllung und Kooperation verarbeitet. Dadurch wird sowohl ein automatisiertes deliberatives Missionsverhalten als auch flexibles, emergentes Verhalten der kooperierenden unbemannten Mitglieder im Team im Sinne eines Multi-Agenten-Systems generiert. Die ACUs verfügen somit über die Fähigkeit Verhaltensmuster zu generieren, um verschiedene Teilaufgaben, wie der Unterdrückung von Flugabwehrstellungen,

Zielbeleuchtung, Objektaufklärung oder Begleitschutz, ausführen zu können. Auf Missionsebene betrachtet, können alle diese Verhaltensweisen als Fähigkeiten zur Lösung der Gesamtmission eingebracht werden. Dazu erkennen die einzelnen Agenten für sich selbst die Notwendigkeit des Einsatzes einer vorhandenen Fähigkeit im Missionskontext und bringen diese auf Basis implementierter Kooperationsziele sowie Koordinationsstrategien in die Verhandlung mit den anderen Teammitgliedern ein.

Im Nachfolgenden wird exemplarisch für die Beschreibung des resultierenden und somit für den Piloten beobachtbaren Verhaltens der implementierten Agenten die Durchführung eines SEAD Szenarios herangezogen. Dabei ist jedes UCAV mit einer entsprechenden Bewaffnung ausgestattet, um prinzipiell alleine die gesamten SEAD-Aktivitäten ausführen zu können. Damit die Effizienz der Missionsausführung hoch gehalten wird, werden die einzelnen Teilaufgaben eigenständig innerhalb des unbemannten Teams auf die verschiedenen Mitglieder verteilt.

In Abbildung 68 ist das Szenario dargestellt. Zunächst müssen die unbemannten Teammitglieder in das feindliche Gebiet über einen ausgewiesenen Korridor (1) (blaues Polygon) übersetzen. Der Korridor darf zeitgleich nur von einem einzigen Teammitglied belegt werden, weshalb die Überflüge zwischen den Teammitgliedern koordiniert werden müssen. In der linken Abbildung ist ersichtlich, dass ein UCAV den Korridor belegt, während die anderen Teammitglieder in Warteschleifen (2) verweilen. Erst wenn die Ressource wieder frei wird, kann das nächste UCAV in den Korridor einfliegen. Die Reihenfolge der Benutzung ist primär durch die initiale Verteilung der Teilaufgaben und die damit verbundene sequentielle Ausführung vorgegeben. So dringt das UCAV, welches für die Ausführung der ersten Missionsaufgabe verantwortlich ist, als erstes in das feindliche Territorium ein.

Im feindlichen Gebiet beginnen die UCAVs mit der Bekämpfung der Flugabwehrstellungen, veranschaulicht in der mittleren Abbildung (3, 4). Auch wird eine zusätzliche Flugabwehrstellung sensorisch erfasst (5), die eine Boden-Luft-Rakete in Richtung eines unbemannten Teammitgliedes abfeuert. Da die Bekämpfung dieser unerwarteten Bedrohung kein UCAV auf seiner Task-Agenda hat, wird über implementierte kooperative Fähigkeiten der kognitiven Agenten die Aufgabe einem spezifischen UCAV gemeinschaftlich zugeteilt. Im betrachteten Beispiel wird es dem grünen UCAV zugewiesen, da dieses über die benötigten Ressourcen verfügt und darüber hinaus eine gute Ausgangsposition aufweist, um unmittelbar die neue Bedrohung bekämpfen zu können – siehe rechte Abbildung (6). Die ursprüngliche Aufgabe des grünen UCAVs bestand in der Bekämpfung der verbleibenden Flugabwehrstellung (7). Da sich durch die unerwartete Situationsänderung nun das blaue UCAV in einer besseren Ausgangslage zur Bekämpfung der Flugabwehrstellung 108 (7) befindet, wird über kooperative Absprachen zwischen den unbemannten Teammitgliedern, im Hinblick auf die Verbesserung der Missionseffizienz, die Aufgabe an das blaue UCAV übertragen.

Die Verteilung der einzelnen Teilaufgaben erfolgt in dieser Arbeit innerhalb des unbemannten Teams durch die kognitiven Agenten kooperativ ohne zentrale Planungseinheit. Das bedeutet, die verschiedenen Agenten „sprechen“ sich untereinander ab, wer welche Aufgabe gemäß deren Fähigkeiten und Kapazitäten übernimmt. Dabei wird die Aufgabenverteilung im Zuge der Mission kontinuierlich an den tatsächlichen Missionsverlauf bestmöglich angepasst, um vor allem auf unerwartete Missionselemente, wie beispielsweise eine plötzlich in Erscheinung tretende Flugabwehrstellung, reagieren zu können.

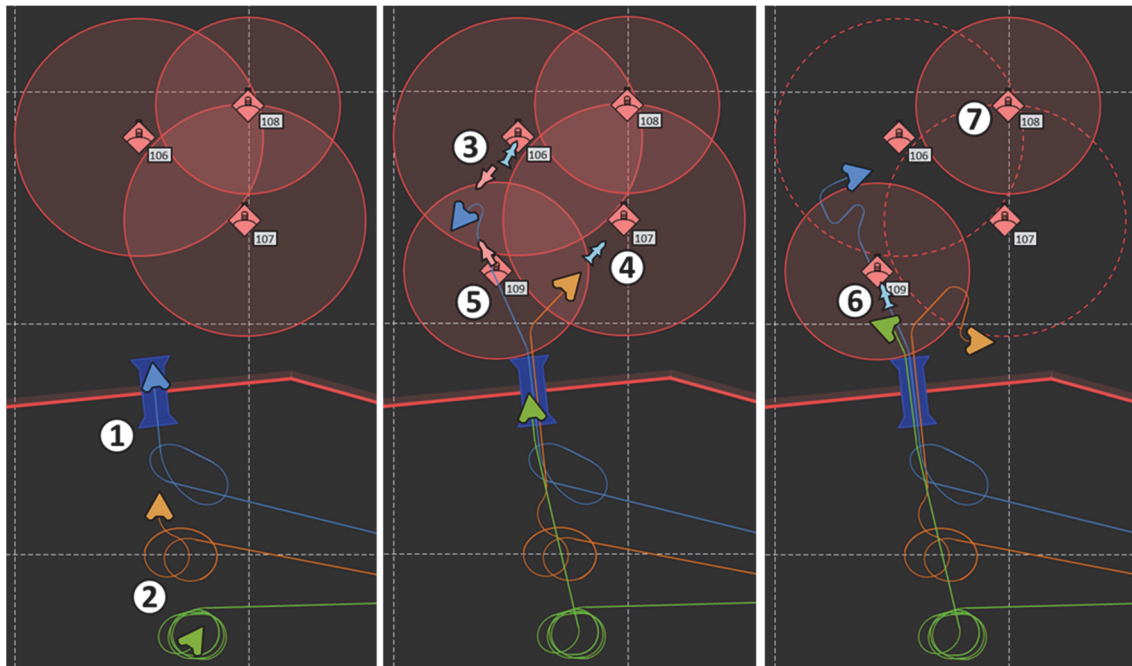


Abbildung 68: Auflösen von Abhängigkeiten zwischen Teilaufgaben in einem SEAD Szenario

4.3 Systeme zur Mensch-ACU-Kooperation

In dem bereits hergeleiteten Arbeitssystem sind für die Kooperation zwischen dem Piloten und dem unbemannten Team ein Teamkoordinationsmodul sowie eine dazugehörige Mensch-Agenten-Schnittstelle vorgesehen. Um diese beiden Systeme in die Simulationsumgebung zu integrieren, wird der Kampfflugzeugsimulator um entsprechende Softwaremodule erweitert. Im Nachfolgenden werden im Abschnitt 4.3.1 die Funktionsweisen der implementierten Softwaremodule zur Abbildung des TKMs und im Abschnitt 4.3.2 die realisierte MAS aufgezeigt.

4.3.1 Funktionsweisen der Softwaremodule des TKMs

Für die Realisierung des TKMs wurde ein *modularer* Architekturansatz verwendet. Im Gegensatz zu einem unitären Ansatz findet die Informationsverarbeitung auf mehreren verschiedenen Softwaremodulen statt. In Abbildung 69 sind die einzelnen Softwaremodule des TKMs bezogen auf die Simulationsarchitektur des Kampfflugzeugsimulators (vgl. Abschnitt 4.1) dargestellt. Die Softwaremodule wurden auf zwei Rechnersysteme (*dataserver* und *fighterdynsim*) verteilt. Die Kommunikation zwischen den einzelnen Rechnersystemen sowie den Modulen basiert auf der Softwarebibliothek *Spread Toolkit* [Stanton, 2002]. Ein weiteres involviertes, allerdings nicht primär dem TKM zuordenbares Softwaremodul bildet der *Datenserver* (vgl. Abschnitt 4.1.1). Dieses Programm wird herangezogen, um neue Datensätze (z.B. taktische Lage) automatisiert modulübergreifend zu aktualisieren. Zusätzlich dazu stellt der Datenserver die Schnittstelle zu außerhalb des TKMs liegenden Softwaremodulen (z.B. MHDD), dem Waffensystem sowie der unbemannten Teammitglieder, dar.

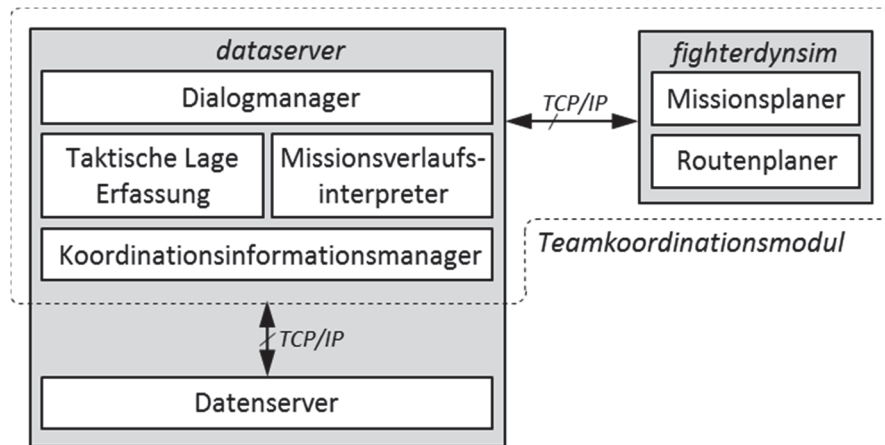


Abbildung 69: Übersicht der beteiligten Softwaremodule zur Abbildung des TKMs im Kampfflugzeugsimulator

Im Nachfolgenden werden die einzelnen Softwaremodule des TKMs näher betrachtet.

4.3.1.1 Taktische Lage Erfassung

Das Softwaremodul „*Taktische Lage Erfassung*“ ist für die Feststellung von Änderungen sowie der kontinuierlichen Aktualisierung der momentanen bekannten taktischen Lage zuständig. Die taktische Lage beinhaltet dabei jede verfügbare missionsrelevante Information über eigene sowie feindliche Missionsobjekte im Operationsgebiet. Zu den Missionsobjekten zählen insbesondere Flugzeuge (*Aircraft*), Waffen (*Weapons*), Täuschkörper (*Countermeasure Muniton*), Flugabwehrstellungen (*SAM-Sites*), Fahrzeuge (*Vehicle*), Gebäude (*Buildings*), Stützpunkte (*Airport*), Vordere Linie eigener Truppen (*Forward Line Of Own Troops, FLOT*), Korridore (*Corridor*) und Verfügungsräume (*Combat Air Patrol, CAP*). Für die Beschreibung der einzelnen Missionsobjekte werden grundsätzlich neben der geografischen Position und Feindklassifizierung (Freund/Feind/Unbekannt) noch weitere Informationen benötigt. Die wichtigsten sind in Tabelle 8 aufgelistet.

Damit das Softwaremodul „*Taktische Lage Erfassung*“ seiner Aufgabe nachkommen kann, verfügt dieses über einen Zugriff auf die Daten des Kampfflugzeugsimulators samt Subsystemen. Im Detail werden Informationen zur Position, Lage, Geschwindigkeit, Nutzlast (Wirkmittel und Täuschkörper), initialen taktischen Lage, die durch eine übergeordnete Kommandostelle dem Piloten in elektronischer Form bekannt gegeben wird, sowie geplanten Flugroute (vgl. Abschnitt 4.3.1.2) entnommen. Ebenso werden Informationen aus den simulierten Sensoren RWR und MAW herangezogen, um die bekannte Lage entsprechend anzupassen. Neben diesen Daten werden auch die der unbemannten Teammitglieder genutzt. Das OCU-Subteam versorgt dazu das TKM kontinuierlich mit Informationen über die unbemannten Teammitglieder. Diese Informationen beinhalten die Position, Lage, Geschwindigkeit, Nutzlast und sensorisch erfasste Situationsänderungen jedes einzelnen unbemannten Teammitgliedes.

Missionsobjekt	Informationsbedarf
Flugzeuge	<ul style="list-style-type: none"> • Bemannt/unbemannt • Lage und Geschwindigkeit • Geplante Flugroute • Vorhandene Nutzlast (Waffen, Sensoren)
Waffen	<ul style="list-style-type: none"> • Typ (HARM, LGB oder SAM) • Lage und Geschwindigkeit • Flugrichtung • Zielobjekt
Täuschkörper	<ul style="list-style-type: none"> • Typ (Chaff, Flares oder Decoy)
Flugabwehrstellung	<ul style="list-style-type: none"> • Operative Reichweite • Aktiv oder inaktiv
Fahrzeuge	<ul style="list-style-type: none"> • Typ (Personen- oder Lastkraftwagen) • Bewaffnung
Bauwerke	<ul style="list-style-type: none"> • Typ (Gebäude, Fabrik oder Brücke) • Mögliche Angriffsrichtungen
Stützpunkte	<ul style="list-style-type: none"> • Start- und Landebahnen • An- und Abflugrouten
FLOT	<ul style="list-style-type: none"> • Geographischer Verlauf
Korridor	<ul style="list-style-type: none"> • Untere/obere Höhe und Breite • Ein- und Ausflugpunkte
Verfügungsraum	<ul style="list-style-type: none"> • Untere/obere Höhe, Länge und Breite

Tabelle 8: Missionsobjekte der taktischen Lage mit objektbezogenem Informationsbedarf

All diese Eingangsinformationen werden verwendet, um zusammen mit hinterlegten *Umweltmodellen* eine modellhafte Abbildung der vorliegenden aktuellen taktischen Lage zu generieren. Dabei existiert zu jedem Objekt, wie Stützpunkt oder Flugzeug, ein dazugehöriges Umweltmodell (siehe Abbildung 70). Zur Abbildung eines einzelnen Objektes in der taktischen Lage wird das entsprechende Umweltmodell herangezogen und davon eine Instanz erzeugt. Über die dazugehörigen Attribute werden den einzelnen Instanzen die verfügbaren und missionsrelevanten Informationen, wie Position, Geschwindigkeit, Flugplan oder Nutzlast, zugewiesen.

Die daraus resultierende taktische Lage liefert unmittelbar einen Beitrag zur Abdeckung des Informationsbedarfes einer effektiven Koordination (vgl. Abschnitt 3.3.4). Darüber hinaus wird die taktische Lage als Ausgangsbasis für Interpretationen, z.B. durch das Softwaremodul „Routenplaner“, herangezogen sowie über den Datenserver außerhalb liegenden Softwaremodulen, wie dem MHDD, zur weiteren Nutzung zugänglich gemacht.

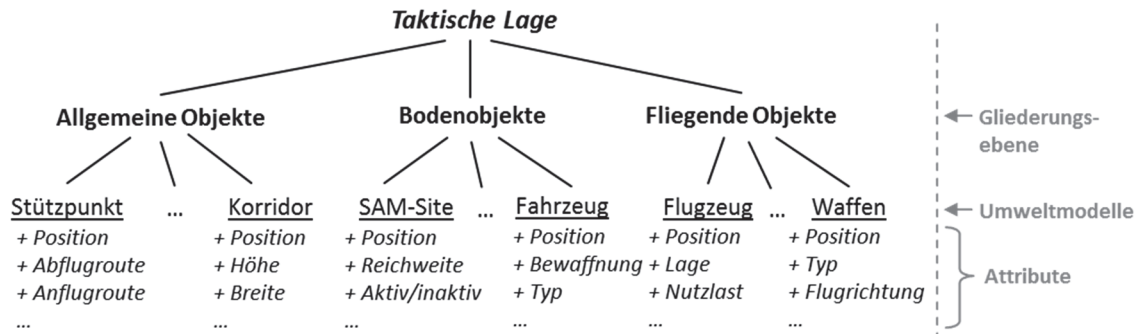


Abbildung 70: Auszug aus den Umweltmodellen samt zugehörigen Attributen zur Repräsentation der taktischen Lage

4.3.1.2 Routen- und Missionsplaner

Für die Interpretation der vorliegenden taktischen Lage in Hinsicht auf durchzuführende Aktivitäten sowie deren Abhängigkeiten zueinander, um einen vorliegenden Missionsauftrag zu erfüllen, kommen verschiedene Planungsfunktionalitäten zum Einsatz.

Routenplaner

Der *Routenplaner* kann basierend auf einer bekannten taktischen Lage eine optimale Flugroute zwischen einem vorgegebenen Start- und Zielpunkt ermitteln. Ebenfalls können dem Routenplaner verschiedene Randparameter vorgegeben werden. Zu diesen zählen der maximal erfliegbare Kurvenradius, die Flugrichtung für den Startpunkt und Endpunkt sowie Flugbeschränkungsgebiete.

Zu Beginn der Routenplanung werden aus der aktuellen taktischen Lage verschiedene relevante Elemente, wie Flugabwehrstellungen, Korridore, Stützpunkte, extrahiert und in eine vereinfachte Form überführt. Das Ergebnis liefert eine virtuelle Kartenabbildung über das relevante Missionsgebiet. Aufbauend auf dieser Repräsentation wird das Suchgebiet durch ein dynamisches Netz aus Knotenpunkten unter Anwendung des *Quadtree* Algorithmus (siehe z.B. [Aizawa & Tanaka, 2009]) in Sektoren (siehe Abbildung 71) geteilt. Relevante Bereiche, wie Gebiete rund um eine Flugabwehrstellung, werden feinsmaschiger aufgelöst (reduzierter Abstand zwischen Knotenpunkten), um eine detaillierte Pfadplanung zu ermöglichen.

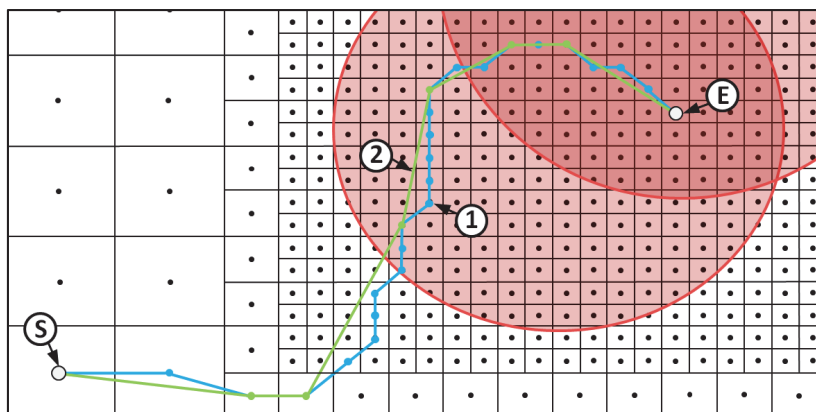


Abbildung 71: Pfadgenerierung mittels A-Stern Algorithmus (blau) und anschließender Glättung (grün)

Als Suchalgorithmus kommt ein angepasster *A-Stern* Algorithmus [P. Hart, Nilsson & Raphael, 1968] zum Einsatz. Dieser nutzt das dynamische Netz als Vorgabe, um daraus den kostengünstigsten Pfad zu finden. Die Gesamtkosten eines Pfades setzen sich aus der Summe von weg- und objektspezifischen Kosten zusammen. Die Wegkosten spiegeln den Aufwand wider, um von einem Knotenpunkt zu einem der umliegenden Knotenpunkte zu gelangen. Dieser Aufwand wird durch die geometrische Entfernung zwischen den Knotenpunkten sowie den Richtungsänderungen (Winkel) begründet. Je größer die Entfernung und je höher die Winkeländerung von einem Rasterpunkt zum benachbarten ist, desto höher sind die anfallenden Wegkosten. Liegt die Richtungsänderung außerhalb des tatsächlich erfliegbaren Kurvenradius, nehmen die Kosten Werte an, die zu einem unmittelbaren Ausschluss des Knotenpunktes in der Pfadgenerierung führt. Neben diesen Wegkosten können auch objektspezifische Kosten entstehen. Hierbei handelt es sich um Kosten, die aufgrund der Eigenschaften von Objekten anfallen können. Im Falle einer Flugabwehrstellung nimmt dieser Kostenanteil mit steigender geometrischer Entfernung vom Zentrum ab. So sind die Kosten im Zentrum einer aktiven Bedrohung am höchsten, während diese im Randbereich der operativen Reichweite nur geringe Werte annehmen. Neben realen Missionsobjekten kommen auch Hilfsobjekte zum Einsatz, um das vorliegende Kostenfeld zu manipulieren. Im Speziellen werden durch Kostenreduzierungen an Knotenpunkten der Korridordurchflug, die Flugrichtung für den Start- und Endpunkt (entspricht im Hinflug typischerweise der Angriffsrichtung), die An- und Abflugrouten des Stützpunktes sowie durch Kostenerhöhung Flugbeschränkungsgebiete dem Suchalgorithmus vorgegeben.

Das Ergebnis des A-Stern Algorithmus besteht in einer sequentiellen Knotenpunktliste, welche die Pfadgeometrie (1) von einem vorgegebenen Start (S) – bis zum Endpunkt (E) wiedergibt (siehe Abbildung 71). Da all jene Knotenpunkte, die der Pfad durchquert, in dieser Liste enthalten sind, liegen auch Punkte vor, die keinen Beitrag zur Beschreibung der eigentlichen Pfadgeometrie leisten. So kann beispielsweise ein gerades Teilstück durch einen Start- und Endpunkt vollständig beschrieben werden. Dazwischen liegende Punkte liefern keinen Mehrwert. Häufig enthält das Ergebnis stufenförmige Pfadabschnitte, da sich der Pfad ausschließlich entlang von Knotenpunkten vom Start- zum Endpunkt hin ausbreiten kann.

In einem weiteren Prozess wird das Ergebnis des eingesetzten Suchalgorithmus angepasst, indem zunächst die stufenförmigen Pfadverläufe geglättet werden. Ausgehend von einem Knotenpunkt wird überprüft, ob es zulässig ist, den Pfadabschnitt mit einem darauffolgenden Knotenpunkt direkt zu verbinden, ohne dass die Flugrichtungsänderung bezogen auf den vorangegangenen Flugabschnitt unzulässige Werte annimmt und die Gesamtkosten im Vergleich zu den aufsummierten Kosten der ursprünglichen Pfadabschnitte übersteigt. Im Anschluss an die Glättung werden die noch enthaltenen, nicht für die Beschreibung der Pfadgeometrie benötigten Knotenpunkte, entfernt. Das daraus resultierende Ergebnis bildet schlussendlich die finale Flugroute ab (2).

Die Hauptaufgabe des Routenplaners besteht in der Generierung der Flugroute für das bemannte Teammitglied. Die Initiierung der Planung darf aufgrund verfahrenstechnischer Anforderungen [Gangl et al., 2014] ausschließlich durch den Piloten erfolgen.

Missionsplaner

Der *Missionsplaner* bildet eine weitere Planungsfunktionalität im TKM zur Interpretation der vorliegenden taktischen Lage ab. Dieser ist vorwiegend für die Ableitung aller

notwendigen Aktivitäten, die zur Erfüllung der Mission von Nöten sind, sowie für die Zeitplanung der Pilotenaktivitäten in Einklang mit dem unbemannten Team verantwortlich.

Für die Erhebung der notwendigen Aktivitäten wird ausgehend vom Missionsauftrag eine verkettete Liste abgeleitet. Dazu sind zu jeder Aktivität entsprechende Modelle hinterlegt, die notwendige Vorbedingungen spezifizieren. So ist im Falle des Auftrages der Durchführung einer Bekämpfung eines Zielobjektes mit einer LGB die Aktivität Waffenabwurf primärer Inhalt. Damit die Waffe abgeworfen werden kann, muss wiederum das Ziel im Vorfeld verifiziert worden sein, sowie eine Zielbeleuchtung zur Verfügung stehen. Auch bedingen der Waffenabwurf und die Beleuchtung die Anwesenheit von mindestens einem Teammitglied, was wiederum die Unterdrückung von feindlichen Flugabwehrstellungen entlang der geplanten Flugroute im Vorfeld mit sich bringt. In Tabelle 9 sind die grundlegenden Modelle samt Vorbedingungen für den Anwendungsfall einer Luft-Boden-Angriffsmission mittels einer lasergelenkten Bombe aufgezeigt.

Modell	Vorbedingungen
Zielbekämpfung	<ul style="list-style-type: none"> • Abwurf der LGB
Waffenabwurf	<ul style="list-style-type: none"> • Flug zur Abwurfposition • Verfügbare Zielbeleuchtung • Positiv abgeschlossene Zielverifizierung
Streckenflug	<ul style="list-style-type: none"> • Start vom Stützpunkt • Unterdrückung von Flugabwehrstellungen entlang der Flugroute
Zielbeleuchtung	<ul style="list-style-type: none"> • Flug zur Beleuchtungsposition • Positiv abgeschlossene Zielverifizierung
Zielverifizierung	<ul style="list-style-type: none"> • Flug zum Zielobjekt • Aufklärungsbilder erstellen
Unterdrückung	<ul style="list-style-type: none"> • Flug zur Angriffsposition • Einsatz einer Luft-Boden-Rakete (HARM)
Wirkungsaufnahme	<ul style="list-style-type: none"> • Durchgeführte Zielbekämpfung • Flug zum Zielobjekt • Bilder über die erzielte Wirkung anfertigen

Tabelle 9: Hinterlegte Modelle zur Ableitung der notwendigen Aktivitäten für den Anwendungsfall der Bekämpfung eines Zielobjektes mittels einer LGB

Aufbauend auf der resultierenden Aktivitätsliste, der geplanten Flugroute des bemannten Kampfflugzeuges und der mitgeteilten Koordinationsinformationen seitens des unbemannten Teams wird eine Zeitplanung durchgeführt. Die von den OCUs mitgeteilten Koordinationsinformationen, zu welchem Zeitpunkt welche Aktivität voraussichtlich begonnen und abgeschlossen sein wird, werden herangezogen, um die auszuführenden Aktivitäten des Piloten in eine sequentielle Reihenfolge zu transferieren. So kann beispielsweise eine Flugabwehrstellung erst nach einer abgeschlossenen Unterdrückung durch ein unbemanntes Teammitglied durchfliegen werden. Die Berechnungen der voraussichtlichen Startzeitpunkte der einzelnen Pilotenaktivitäten werden in Einklang mit der geplanten Flugroute sowie vorgegebener Fluggeschwindigkeit vorgenommen. Das Ergebnis der Zeitplanung liefert die zeitliche Abfolge der vom Piloten auszuführenden

Aktivitäten gemäß der aktuellen Repräsentation der Situation und wird im Laufe der Mission kontinuierlich den neuen Gegebenheiten angepasst. Bei den ermittelten Zeitwerten handelt es sich ausschließlich um Soll-Werte. Also um jene Zeitpunkte, die vom Piloten einzuhalten sind, um optimal koordiniert im Missionsverlauf zu handeln.

4.3.1.3 Missionsverlaufsinterpretierer

Der *Missionsverlaufsinterpretierer* wird genutzt, um anhand der vorliegenden Situation verschiedene Zeitpunkte einzelner Missionsereignisse, die für die Feststellung erforderlicher Assistenzsystemmeldungen dienen, zu prognostizieren (vgl. Abschnitt 3.4.3.3).

Das erste Missionsereignis ist durch die *Beauftragung* zur Missionsausführung durch die übergeordnete Kommandostelle mittels eines Missionsauftrages bestimmt. Inhalt des Missionsauftrages ist auch die Benennung des exakten Zeitpunktes für den *Missionsstart*, welcher ein weiteres singuläres Ereignis begründet. Über die koordinativen Mitteilungen seitens des OCU-Subteams können unmittelbar die Zeitpunkte zu den Ereignissen „*Eintreffen im Operationsgebiet*“ und „*Start der Aufgabe Zielmarkierung*“ entnommen werden. Der voraussichtliche Zeitpunkt des *Einschlages* der LGB wird über den vom Missionsplaner eruierten Zeitpunkt des Waffenabwurfes im Zusammenhang mit der durch das Waffensystem angegebene Flugdauer der LGB berechnet. Dieser Zeitpunkt wird noch um eine waffenspezifische Mindestbeleuchtungszeit korrigiert. Das verbleibende Ereignis, der *Rückflug*, lässt sich nicht eindeutig bestimmen, weshalb hier eine definierte Zeitdauer ab Verfügbarkeit der Bildaufnahmen zur Auswertung der Wirkungsaufnahme zur Festlegung verwendet wird.

4.3.1.4 Koordinationsinformationsmanager

Das *Koordinationsinformationsmanager (KIM)* Modul baut auf den Ergebnissen der zuvor beschriebenen Softwareprogramme des TKMs auf. Anhand dieser, sowie der mitgeteilten Informationen seitens der unbemannten Teammitglieder, findet die Interpretation der einzelnen Komponenten (Ziele, Aktivitäten, Teammitglieder und Abhängigkeiten) der kooperativen Teamkoordination (vgl. Abschnitt 3.3.3) statt. Dazu werden diese Informationen herangezogen, um die einzelnen Attribute der hinterlegten Modelle zu den verschiedenen Komponenten mit verfügbaren Informationen zu befüllen. In Tabelle 10 sind die zugehörigen Modelle mit den Attributen aufgeführt.

Aufbauend auf den resultierenden Instanzen der Komponenten erfolgt die Überprüfung der Vollständigkeit der koordinativen Informationen. Dazu werden zusammen mit den Ergebnissen des Missionsverlaufsinterpretierers, die grundlegend den aktuellen Informationsbedarf festlegen, die jeweiligen Instanzen auf fehlende Informationen untersucht. Werden fehlende Informationen erkannt, ist es die Aufgabe des KIM-Moduls, diese Informationen zu beschaffen. Dabei ist zu jeder fehlenden Information eine eigene Vorgehensroutine hinterlegt. Im Nachfolgenden werden die Tätigkeiten des KIM-Moduls bezogen auf die einzelnen Komponenten näher betrachtet.

Modell	Attribute
Ziele	<ul style="list-style-type: none"> • Arbeitsziel (Zielobjekt, Angriffsrichtung und –höhe)
Aktivitäten	<ul style="list-style-type: none"> • Liste der durchzuführenden Aktivitäten
Akteure	<ul style="list-style-type: none"> • Auf die einzelnen Teammitglieder zugeordnete Aktivitäten
Abhängigkeiten	<ul style="list-style-type: none"> • <i>Vorhersehbarkeit</i>: Geplanter Startzeitpunkt, Durchführungsdauer, Abhängigkeiten zu anderen Aktivitäten und aktueller Bearbeitungszustand jeder Aktivität • <i>Gemeinsamer Wissensraum</i>: Status (z.B. Missionsabbruch), gültige Einsatzregeln, Flugrouten, taktische Lage samt Änderungen, Aufklärungsergebnisse, Geführte Dialoge, eingesetzte Ressourcen, Verluste, aktuell bearbeitete Aufgaben und zukünftige Absichten der Teammitglieder • <i>Lenken von Handlungen</i>: Missionsverzögerung

Tabelle 10: Informationsbedarf der einzelnen Modelle zur kooperativen Teamkoordination

Modell – Ziele

Der Pilot ist als Teamführer zuständig, das TKM, stellvertretend für das OCU-Subteam, über das Arbeitsziel zu informieren. Liegen diesbezüglich keine entsprechenden Informationen in Abhängigkeit des Missionsverlaufes vor, beginnt das KIM-Modul die fehlenden Informationen beim Piloten mittels einer Assistenzsystemmeldung einzufordern. Sobald das Arbeitsziel dem KIM-Modul vorliegt, oder Änderungen daran vorgenommen worden sind, werden die einzelnen Teammitglieder darüber in Kenntnis gesetzt.

Modell – Aktivitäten

Im Fall der Komponente „Aktivität“ liegt die primäre Aufgabe des KIM-Moduls in der Bekanntmachung der Aktivitätsliste innerhalb des OCU-Subteams. Für die Herleitung der Liste ist der Missionsplaner zuständig. Da in dieser Arbeit die Missionsplanung dezentral stattfindet, muss die generierte Aktivitätsliste mit der des OCU-Subteams abgeglichen werden. Diese Aufgabe obliegt ebenfalls dem KIM-Modul. Sobald neben der eigenen generierten Aktivitätsliste auch die des OCU-Subteams zur Verfügung steht, wird ein Vergleich angestellt. Werden Unterschiede in den Inhalten festgestellt, so erfolgt ein Abgleich, indem ursprünglich fehlende Aktivitäten in die Liste mit aufgenommen werden. Enthält beispielsweise die Aktivitätsliste des OCU-Subteams eine zusätzliche Aktivität, wie die Unterdrückung einer Flugabwehrstellung, so fügt das KIM-Modul diese Aktivität der eigenen Liste hinzu.

Modell – Akteure

Die Aufteilung der einzelnen Aktivitäten zur Missionserfüllung zwischen dem Piloten und dem OCU-Subteam ist durch die getroffene statische Rollenzuordnung (vgl. Abschnitt 3.3.1) festgelegt. Innerhalb des OCU-Subteams erfolgt die Zuordnung der Aktivitäten eigenständig durch die Teammitglieder (siehe z.B. [Meitinger, 2008][Gangl et al., 2014]). Die Aufgabe des KIM-Moduls bezüglich der Komponente „Teammitglieder“ besteht ausschließlich in der Sicherstellung der zeitgerechten Bekanntgabe der beabsichtigten Missionsaktivitäten des Piloten, wie die Bekämpfung des Zielobjektes. Sollte diese Informationen nicht vor dem eigentlichen Missionsstart (Startzeitpunkt wird durch die Kommandostelle vorgegeben) vorliegen, erfolgt die Ausgabe einer entsprechenden Assistenzsystemmeldung.

Modell – Abhängigkeiten

Im Rahmen der Komponente „Abhängigkeiten“ ist das KIM-Modul zuständig, beim Piloten, bezogen auf die aktuell vorliegende Situation, über Assistenzsystemmeldungen fehlende, missionsrelevante koordinative Informationen einzufordern. Dazu zählen Informationen zu der beabsichtigten Flugroute, dem Missionsstatus, den gültigen Einsatzregeln, der Aufschaltung der Zielmarkierung und den Ergebnissen einer Objektaufklärung sowie Wirkungsaufnahme.

4.3.1.5 Dialogmanager

Für die tatsächliche Dialogführung in der Form von Assistenzsystemmeldungen zwischen dem Piloten und dem KIM-Modul ist der *Dialogmanager* verantwortlich. Dieser zieht zur Feststellung einer Überforderungssituation des Piloten die Daten des Missionsverlaufsinterpreters (vgl. Abschnitt 4.3.1.3) heran. Liegt eine Aufgabensituation mit hoher Arbeitsbelastung vor, wird zusätzlich zur Meldung dem Piloten eine Aufgabenvereinfachung dargelegt. Zu jeder möglichen Meldung ist eine zugehörige Aufgabenvereinfachung hinterlegt. Im Falle einer nicht bekannten Flugroute umfasst die Vereinfachung die Initiierung der Flugplanung und im Falle einer nicht getätigten Aufschaltung der Zielbeleuchtung die unmittelbare Aktivierung dieser. Die Aufgabenvereinfachung der verbleibenden Meldungen (Missionsziel bekannt geben, eigene Aktivitäten benennen, Ziel verifizieren, Bekämpfungserfolg benennen) beinhaltet die Umkonfiguration der Benutzeroberfläche der Mensch-Maschine-Schnittstelle im Cockpit dahingehend, dass der Pilot umgehend eine Maßnahme zur Behebung des Missstandes setzen kann. Neben den zuvor erwähnten Assistenzsystemmeldungen werden diese auch für die Anzeige von unvorhersehbaren Zeitverzögerungen im Missionsablauf seitens des OCU-Subteams genutzt. Für die Ausgabe dieser Statusmeldungen ist ebenfalls der Dialogmanager verantwortlich.

Der Dialogmanager ist auch zuständig, das OCU-Subteam kontinuierlich mit koordinativen Informationen seitens des Piloten im Sinne einer effektiven Koordination (vgl. Abschnitt 3.3.4) zu versorgen. Im Detail wird das OCU-Subteam über die errechneten Startzeitpunkte zu den einzelnen Aktivitäten (siehe Abschnitt 4.3.1.2) samt voraussichtlicher Durchführungsdauer sowie Abhängigkeiten zu weiteren Aktivitäten, der geplanten Flugroute, sensorisch erfasste Änderungen zur bekannten taktischen Lage und den freien Ressourcen unterrichtet.

4.3.2 Mensch-Agenten-Schnittstelle

Das Konzept zur Gestaltung der MAS wurde bereits im Abschnitt 3.5.3 aufgezeigt. Die Implementierung dieses Konzeptansatzes in die Simulationsumgebung baut auf dem in Abschnitt 4.1 dargelegten Kampfflugzeugsimulator auf. Für die technische Umsetzung des Bedienkonzeptes wird auf die bereits in die Simulationsumgebung integrierten Eingabelemente zurückgegriffen. Die Eingabe koordinativer Informationen an das TKM kann der Pilot wahlweise über das DVI-System, der Cursorsteuerung am HOTAS oder direkt über die Touchscreens (Funktionstasten sowie unmittelbar über die Benutzeroberflächen) vornehmen. Im Einzelnen können Informationen zu dem Zielobjekt, den gültigen Einsatzregeln, den beabsichtigten Aktivitäten in der Mission, den Ergebnissen von Objektaufklärungen sowie Wirkungsaufnahmen, dem Missionsstatus, der Zielmarkierung und der Flugroutenplanung eingegeben werden.

Für die Implementierung des MAS-Anzeigekonzeptes werden die bereits verfügbaren Softwaremodule (MHDD und HUD) erweitert. Im Nachfolgenden werden die Erweiterungen aufgezeigt.

Die *Team-Page* begründet, wie im MAS-Konzept vorgesehen, eine eigenständige Seite in dem Softwaremodul „MHDD“. In Abbildung 72 ist diese dargestellt. Der obere Bereich (1) kann wahlweise in einem Single- oder Teammodus konfiguriert genutzt werden. Im Singlemodus werden verschiedene Informationen, wie Ressourcen, Fähigkeiten oder Aktivitäten visualisiert, die in Bezug zum jeweiligen unbemannten Teammitglied stehen. Die Aktivitätslisten sind in einer sequentiellen Reihenfolge angeordnet, wobei die farblich hervorgehobenen Aktivitäten, die aktuell bearbeiteten darstellen. Im Teammodus findet keine Differenzierung zwischen den verschiedenen Teammitgliedern statt. In diesem Modus werden Informationen (2) zum eigentlichen Missionsauftrag, wie die bekannt gegebenen Einsatzregeln oder das Zielobjekt inklusive des Aufklärungszustandes (visualisiert durch das Rautensymbol), und zu den Absichten des Piloten angezeigt. Der untere Bereich (3) dieser Seite gibt die bereits geführten Dialoge mit dem TKM wieder.

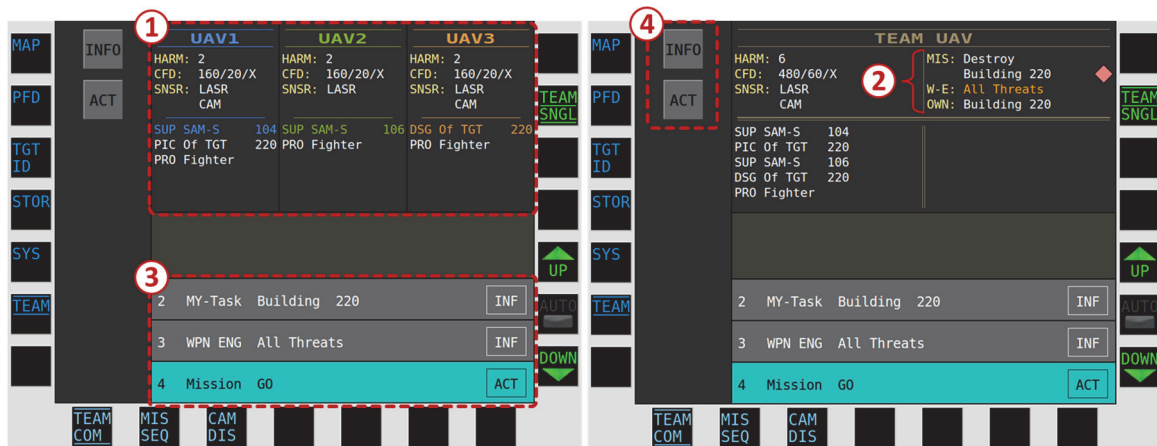


Abbildung 72: Team-Page zur Darstellung von allgemeinen Koordinationsinformationen

Auf der linken Seite der Team-Page sind Funktionstasten (4) integriert. Diese kann der Pilot nutzen, um verschiedene Koordinationsinformationen dem TKM bekannt zu geben. Bei Betätigung einer dieser beiden Tasten wird automatisch auf die dazugehörige Unterseite gewechselt. Diese sind in Abbildung 73 dargestellt. Unterschieden werden informative (INF) (1) Eingaben, wie die Bekanntgabe des Missionsziels oder der gültigen Einsatzregeln, und Eingaben mit Handlungsbezug (ACT, Action) (2). Im letzten Fall erfolgt auf die Eingabe eine unmittelbare Aktion seitens der unbemannten Teammitglieder, wie die Aufschaltung einer Zielmarkierung oder das Abbrechen der Missionsausführung.

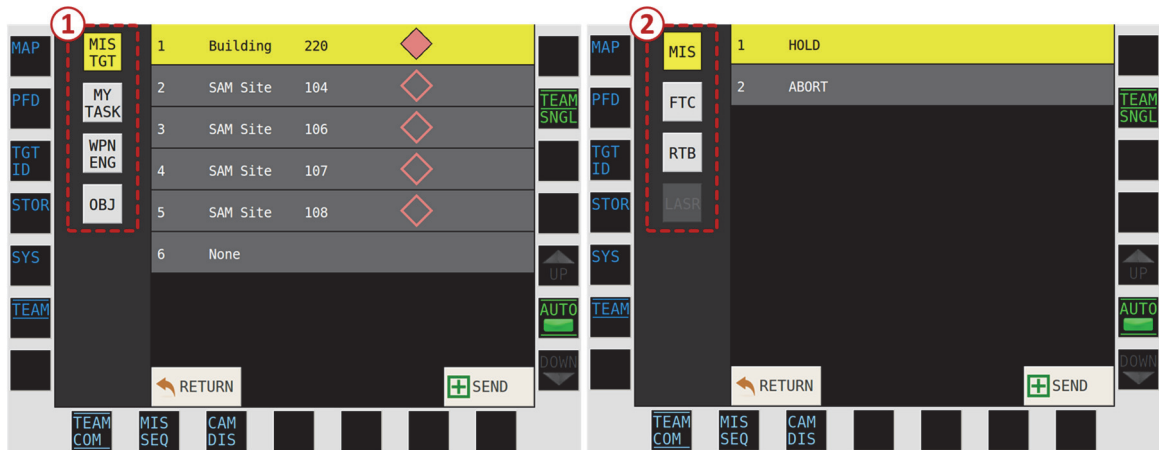


Abbildung 73: Benutzeroberfläche zur Eingabe von Koordinationsinformationen an das TKM über die Team-Page.

Für die Darstellung von Koordinationsinformationen mit räumlichem Bezug ist das *Kartendisplay* um die im Anzeigekonzept (vgl. Abschnitt 3.5.3) festgelegten Informationen hinsichtlich der kooperativen Teamkoordination erweitert worden. In Abbildung 74 ist das Resultat veranschaulicht. Neben den Positions- und Höheninformationen zu einem unbemannten Teammitglied (1) sind weitere koordinative Informationen über die Aktivitätspfeile (2) sowie dazugehörigen Aktivitätssymbole (3) visualisiert. Missionsrelevante Elemente, wie vom Team abgefeuerte Luft-Boden-Raketen (4) sowie von diesem sensorisch erfasste feindliche Raketen werden auch am Kartendisplay zur Anzeige gebracht. Die Abbildung der optimalen koordinativen Position des bemannten Kampfflugzeuges erfolgt durch ein Schattenfliegersymbol (5).

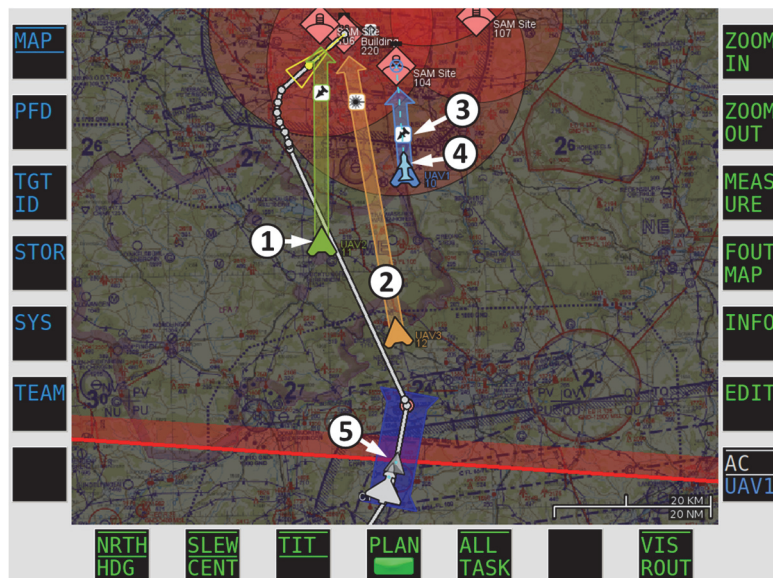


Abbildung 74: Kartendisplay erweitert um koordinative Informationen mit räumlichen Bezug

Für die Abbildung von Koordinationsinformationen mit temporärem Bezug ist die Benutzeroberfläche des Softwaremodules „MHDD“ um eine zusätzliche Seite, der *Timeline-Page*, erweitert worden (siehe Abbildung 75). Der obere Bereich (1) visualisiert, wie im Anzeigekonzept (vgl. Abschnitt 3.5.3) bereits vorgesehen, einen Zeitstrahl, der ausschließlich die Aktivitäten des Piloten zur Anzeige bringt. Hingegen dient der untere

Zeitstrahl (2), um die einzelnen Aktivitäten des unbemannten Subteams darzustellen. Auf beiden Zeitstrahlen sind die zugehörigen Aktivitäten über Aktivitätsblöcke abgebildet. So kennzeichnet beispielsweise der Block (3) den Beginn der Durchführung der Unterdrückung (weißes Symbol) der Flugabwehrstellung (rotes Symbol) mit der Identifikationsnummer 106 durch ein unbemanntes Teammitglied in voraussichtlich 2:28 Minuten. Diese Aktivität sollte planmäßig ungefähr 1:45 Minuten dauern, wie aus der Abbildung 75 hervorgeht. Neben den verschiedenen Missionsaktivitäten werden am Zeitstrahl des bemannten Kampfflugzeuges auch Informationen zu den voraussichtlichen Zeitpunkten des Einfluges bzw. Ausfluges in eine operative Reichweite einer feindlichen Flugabwehrstellung angezeigt. In Abbildung 75 (4) ist beispielsweise der Einflug in die Flugabwehrstellung 106 dargestellt.

Der aktuell vorliegende Zeitpunkt auf der Timeline-Page gibt die berechnete optimale Position des bemannten Kampfflugzeuges zur kooperativen Teamkoordination mit den UCAVs wieder. Dieser Sachverhalt wird, wie auf dem erweiterten Kartendisplay, durch ein Schattenfliegersymbol (5) verdeutlicht. Die tatsächliche zeitliche Position gemäß dem aktuell gültigen Missionsplan wird durch das Kampfflugzeugsymbol dargestellt (6). Somit kann der Pilot die Timeline-Page heranziehen, um die zeitliche Ist-Position mit der Soll-Position zu vergleichen, um weitere Handlungen daraus abzuleiten. Zusätzlich dazu wird eine errechnete Geschwindigkeit (7) angezeigt, die es dem Piloten ermöglicht, sich optimal koordiniert im Missionsverlauf entlang der geplanten Flugroute zu bewegen.

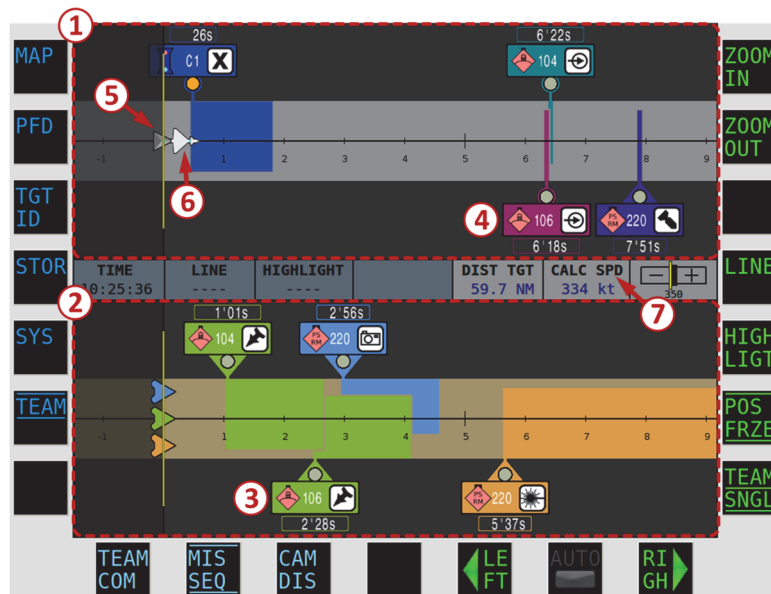


Abbildung 75: Timeline-Page zur Darstellung von zeitlichen Koordinationsinformationen

Die Anzeige einer *Assistenzsystemmeldung* erfolgt über die Benutzeroberfläche am linken Rand im Cockpit angeordneten MHDD (vgl. Abbildung 55) durch einen gelben Balken, der die aktuell im Vordergrund liegende MHDD-Page überlagert. In Abbildung 76 sind exemplarische Assistenzsystemmeldungen dargestellt. Die linke Abbildung veranschaulicht eine Meldung zur Aufmerksamkeitslenkung auf die dringlichste durchzuführende Aktivität. Die Meldung auf der rechten Abbildung wird genutzt, um in festgestellten Überforderungssituationen des Piloten eine Aufgabenvereinfachung anzubieten. Die Assistenzsystemmeldungen werden ausgeblendet, sobald der vorliegende koordinative Missstand behoben ist oder die Meldung mit der OK-Taste bzw. Support-Taste quittiert wird.

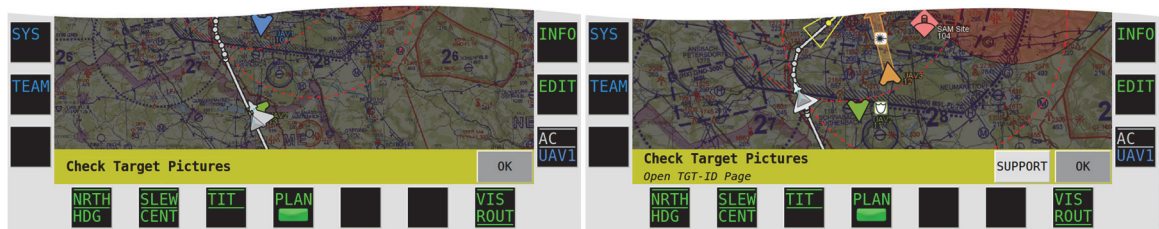


Abbildung 76: Exemplarische Assistenzsystemmeldungen am MHDD

Neben der visuellen Abbildung von Assistenzsystemmeldungen am MHDD wird jede neue zur Anzeige gebrachte Meldung mit einem spezifischen Warnton zur zusätzlichen Aufmerksamkeitslenkung begleitet. Der Pilot wird über einen visuellen Hinweis am HUD (vgl. Abschnitt 4.1.1) über eine aktive Assistenzsystemmeldung in Kenntnis gesetzt.

Eine weitere implementierte MHDD-Page ist die *Kamera-Page*, welche in Abbildung 77, dargestellt ist. Über diese Page kann der Pilot auf die simulierten Kamerasensoren der unbemannten Teammitglieder zugreifen, um beispielsweise ein mögliches Zielobjekt näher zu betrachten. Die Kameraausrichtung kann durch den Piloten entweder über Lage- (Pan, Tilt) (1) oder Positionsvorgaben (geografische Koordinate) (2) gesteuert werden (vgl. Abschnitt 4.2.2). Im Allgemeinen obliegt die Steuerung der Kamerasensoren der jeweiligen OCU. In der Abbildung 77 hat beispielsweise die OCU neben den Laserdesignator auch die Kamera auf das zu beleuchtende Zielobjekt (3) eigenständig ausgerichtet.



Abbildung 77: MHDD-Page zur Anzeige sowie Steuerung der von den unbemannten Teammitgliedern mitgeführten Kamerasensoren

Für die Objektverifizierung sowie Wirkungsaufnahme stehen dem Piloten neben der Kamera-Page noch eine weitere Page, die *TGT-ID-Page* (*Target-Identification-Page*), zur Verfügung. Über diese Page kann beispielsweise ein unbemanntes Teammitglied oder eine Kommandostelle den Piloten mit entsprechenden Bildmaterialien zu Missionsobjekten versorgen. In Abbildung 78 ist die TGT-ID-Page dargestellt. Über eine Hauptseite (1) wird dem Piloten eine Übersicht über alle bekannten Missionsobjekte dargestellt. Je nachdem, ob ein dazugehöriges Bildmaterial vorhanden („Available“) ist, kann dieses über eine dazugehörige Unterseite (2) betrachtet werden. Das Bildmaterial wird im Rahmen dieser

Arbeit grundsätzlich von einem unbemannten Teammitglied oder einer übergeordneten Kommandostelle, dem Piloten zur Verfügung gestellt.

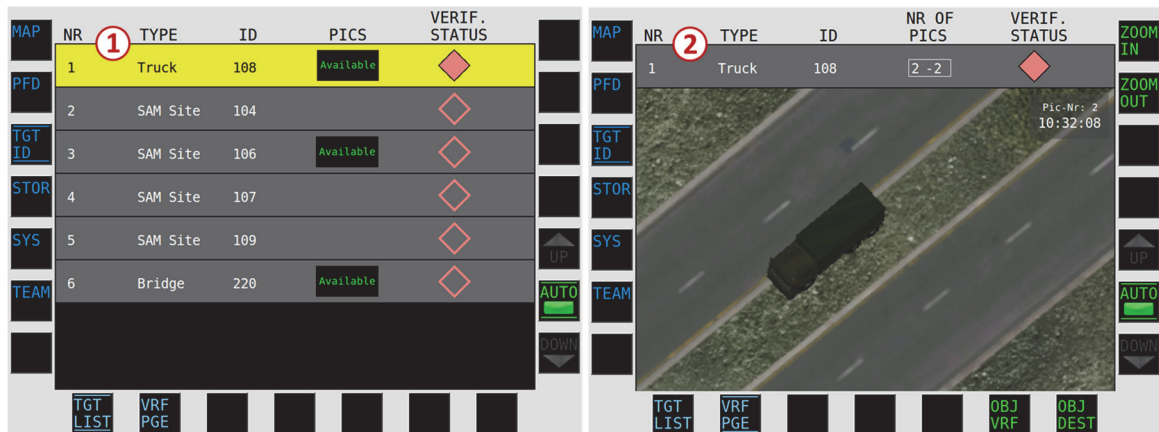


Abbildung 78: MHDD-Page zur Identifikation von Missionselementen

4.4 Missionssimulation

Für die experimentelle Evaluierung des hergeleiteten Konzeptansatzes ist neben den bereits erläuterten technischen Systemen eine Missionssimulation erforderlich. Dazu wird auf ein am Institut für Flugsysteme entwickeltes Framework zur *Szenariensimulation*, zurückgegriffen.

Über die *Bedienungsschnittstelle (Term I/O)* der Szenariensimulation erfolgt die detaillierte Spezifizierung der zu simulierenden Luft-Boden-Angriffsmission. Dazu zählen die Bekanntgabe aller Missionsobjekte, wie Flugabwehrstellungen oder Teammitglieder, und deren Eigenschaften (z.B. Position oder Nutzlast). Darüber hinaus können bestimmte Merkmale des Einsatzgebietes, wie Uhrzeit oder Wettergeschehen, als Randparameter zur Simulation angegeben werden.

Die *Szenariensimulation* ist für die eigentliche Ausführung der Missionssimulation anhand der Vorgaben über das Term I/O verantwortlich. Über eine angepasste Softwareschnittstelle erfolgt die Anbindung der Simulationen an die unbemannten Teammitglieder und an das bemannte Kampfflugzeug. Zur Abbildung der spezifizierten Mission über das Term I/O stellt die Szenariensimulation eigenständige Objekt- und Verhaltenssimulationen an. Im Allgemeinen handelt sich um die Simulation der Tageszeit, der Umwelt, computergenerierter Kräfte (*Computer Generated Forces, CGF*) samt Verhaltensweisen sowie verschiedener Wirkmittel. Die Tageszeitsimulation wird eingesetzt, um alle beteiligten Missionsobjekte mit der aktuell simulierten Tageszeit zu versorgen. Die Aufgabe der Umweltsimulation besteht in der Feststellung von Wechselwirkungen zwischen Objekten zueinander (z.B. Auswirkung eines LGB-Einschlages auf das Zielobjekt) und zwischen Objekten und dem Geländeverlauf (z.B. Kollision zwischen Gelände und Kampfflugzeug). Die Abbildung der feindlichen Kräfte wie Flugabwehrstellungen oder Fahrzeugen samt Verhaltensweisen findet in der Simulation anhand verfügbarer CGF-Modelle statt. Die Simulation von Wirkmitteln wie Boden-Luft-Raketen oder LGB wird auch von der Szenariensimulation übernommen. Damit das Flugverhalten einer simulierten LGB oder HARM der dazugehörigen Waffensystemsimulation (vgl. Abschnitt 4.1.1 und 4.2.2) entspricht, sind diese entsprechend angepasst worden.

5 Experimentelle Evaluierung

In diesem Kapitel soll nunmehr die Bewertung des entwickelten Funktionsprototypens zur Multi-UCAV Führung aus dem Cockpit eines einsitzigen Kampfflugzeuges im Rahmen von experimentellen Untersuchungen vorgenommen werden. Dazu wird beginnend im Abschnitt 5.1 die Versuchsplanung vorgestellt. Aufbauend darauf wird im Abschnitt 5.2 die Durchführung der Mensch-Maschine-Versuche beschrieben. Die daraus ermittelten Ergebnisse werden im Abschnitt 5.3 dargelegt und im Abschnitt 5.4 zusammenfassend diskutiert.

5.1 Versuchsplanung

Zur Versuchsplanung werden beginnend im Abschnitt 5.1.1 entsprechende Hypothesen formuliert. Für die experimentelle Überprüfung müssen repräsentative Merkmale, sogenannte Variablen, identifiziert werden. Der Abschnitt 5.1.2 setzt sich dazu mit den verschiedenen experimentellen Variablentypen auseinander. Basierend darauf findet im Abschnitt 5.1.3 die Festlegung der unabhängigen Variablen statt, welche die zu untersuchenden Versuchs- bzw. Systemkonfigurationen für die Mensch-Maschine-Versuche vorgeben. Bevor die Bestimmung der abhängigen Variablen, der zu beobachtenden Merkmale, im Abschnitt 5.1.5 erfolgt, werden im Abschnitt 5.1.4 die Aufgabenstellungen der Probanden in den jeweiligen Experimenten betrachtet. Die einzelnen Methoden zur Erfassung der abhängigen Variablen werden im Abschnitt 5.1.6 beschrieben. Abschließend werden im Abschnitt 5.1.7 verschiedene Rahmenbedingungen zu den Experimenten dargelegt.

5.1.1 Hypothesen

Bei Hypothesen handelt es sich im Allgemeinen um Vermutungen zu bestimmten Fragestellungen, die als wahrscheinlich angesehen werden, jedoch nicht als bewiesen gelten. Dies kann beispielsweise aus der Hypothesen Definition von [Hussy & Jain, 2002] entnommen werden:

„Vorläufige (vermutete) Antworten, die Forscher auf ihre Fragen geben, nennt man Hypothesen.“

Nicht jede Vermutung stellt automatisch eine mittels wissenschaftlicher Methoden überprüfbarer Hypothese dar. Nach [Eid, Gollwitzer & Schmitt, 2013] liegt eine wissenschaftliche Hypothese erst dann vor, wenn folgende Bedingungen erfüllt sind:

- empirisch testbar
- falsifizierbar
- allgemein gültig
- begründbar

Eine wissenschaftliche Hypothese muss sich somit auf reale Sachverhalte, die *empirisch erfassbar* sind, beziehen. Die testbaren Merkmale können von *manifest* sowie *latenter* Natur sein. Ein manifestes Merkmal liegt vor, wenn dieses *direkt* durch eine Erhebungsmethode erfasst werden kann. Währenddessen kann ein latentes Merkmal nur *indirekt* über eine direkt erfassbare Größe erhoben werden. Als Beispiel für ein latentes Merkmal sei hier die Erfassung der mentalen Beanspruchung eines Menschen erwähnt. Dieser Wert kann nicht direkt, sondern ausschließlich indirekt über messbare Größen, wie Leistungsmerkmale (z.B. Fehlerhäufigkeit oder Reaktionszeit), erfasst werden. Eine weitere Bedingung für eine wissenschaftliche Hypothese stellt die prinzipielle *Falsifizierbarkeit* dar. Hiernach muss mindestens ein theoretisch möglicher Fall existieren, der die Hypothese widerlegen (falsifizieren) kann. Eine Tautologie (eine Aussage, die immer wahr ist) stellt somit keine wissenschaftliche Hypothese dar, da diese niemals falsifizierbar ist. Ein weiteres von [Eid et al., 2013] gefordertes Kriterium ist die *allgemeine Gültigkeit*. Das bedeutet, eine wissenschaftliche Hypothese muss über einen singulären Fall oder ein einzelnes Ereignis hinaus Gültigkeit besitzen. Das letzte Kriterium bildet die *Begründbarkeit*. Dieses Kriterium soll anzeigen, dass nicht jede formulierte Vermutung automatisch zu einer wissenschaftlichen Hypothese wird. Grundsätzlich können Begründungen von Hypothesen aus einem bereits vorliegenden Wissen oder einer Theorie abgeleitet werden. Natürlich gibt es auch neue Forschungsthemen, in denen zu wenig Vorwissen oder Theorien zugrunde liegen, um eine dezidierte Hypothesenbegründung aufstellen zu können. In diesen Fällen wäre die Hypothese schon alleine wegen des nicht vorhandenen Vorwissens begründet.

Solange ein wissenschaftlicher Nachweis über eine Hypothese nicht erbracht ist, bleibt die Vermutung aufrecht. Kann diese Vermutung durch eine geeignete empirische Untersuchung bestätigt werden, geht die Hypothese lediglich in eine *geprüfte Aussage* über. Eine geprüfte Aussage liegt deshalb vor, weil eine Hypothese theoretisch nie abschließend als verifiziert, also als absolut bestätigt, angesehen werden kann, da niemals alle existierenden sowie zukünftig auftretende Fälle im Allgemeinen überprüft werden können. Jedoch kann durch den Nachweis eines zulässigen Widerspruches eine Hypothese vollständig falsifiziert werden (siehe z.B. [Bortz & Döring, 2006][Hussy, Schreier & Echterhoff, 2013][Schnell, Hill & Esser, 2011]).

Da wissenschaftliche Hypothesen oftmals eine Wahrscheinlichkeitsaussage beinhalten, sind Falsifikationen im gewissen Rahmen zulässig (siehe z.B. [Bortz & Döring, 2006][Hussy et al., 2013]). Diese Arten von Hypothesen können somit nicht durch eine einzige Falsifikation widerlegt werden. Auch können diese Hypothesen aufgrund des Allgemeingültigkeitsanspruches nicht verifiziert werden, da eine Überprüfung aller zutreffenden Fälle nicht möglich ist. Um diesen Konflikt zu lösen, existieren hierzu spezielle Prüfkriterien. Ein häufig anzutreffendes Kriterium ist die *statistische Signifikanz*, die mittels eines geeigneten Signifikanztest, wie einem einseitigen t-Test (z.B. [Bühner & Ziegler, 2009][Nachtigall & Wirtz, 2009]), erhoben wird.

Die Formulierung von Hypothesen findet meist vor der Durchführung von Experimenten statt. In diesem Fall handelt es sich um eine sogenannte *hypothesenprüfende Untersuchung*. Das Gegenstück dazu ist die *explorative Untersuchung*. Diese kommt vor allem in neuen Forschungsumfeldern zum Einsatz, in denen das vorliegende Wissen oder Kenntnisse nicht ausreichen, um eine prüfbare Hypothese im Vorhinein zu formulieren.

Im Rahmen dieser Arbeit wurden für die Evaluierung des in Kapitel 3 beschriebenen Konzeptansatzes die zu untersuchenden Forschungshypothesen im Vorfeld festgelegt:

- (a) *Das entwickelte Arbeitssystemkonzept ermöglicht einem Piloten eines einsitzigen Kampfflugzeuges mehrere unbemannte Kampfflugzeuge (Führungsspanne = 3) in einer gemeinsamen Luft-Boden-Angriffsmission luftgestützt zu führen.*
- (b) *Das Teamkoordinationsmodul unterstützt den Piloten bei den im Rahmen der kooperativen Teamkoordination anfallenden Tätigkeiten mit dem unbemannten Subteam.*
- (c) *Der Pilot kann über die konzipierte MAS mit dem unbemannten Team auf geeigneter Weise interagieren.*

Diese angeführten Hypothesen sind sehr allgemein formuliert und decken die verschiedenen Kernbereiche (Gesamtkonzept, TKM und MAS) dieser Arbeit ab. Detailliertere Formulierungen sind absichtlich nicht gewählt worden, da noch keine aussagekräftigen und verwertbaren Erkenntnisse in diesen Bereichen vorliegen. Neben der Beantwortung der zuvor formulierten Forschungshypothesen diente die experimentelle Evaluierung auch, um grundlegende Erkenntnisse für weiterführende Forschungsaktivitäten im Umfeld der kooperativen Multi-UCAV Führung zu generieren.

5.1.2 Experimentelle Variablen

Die Überprüfung von wissenschaftlichen Hypothesen (vgl. Abschnitt 5.1.1) wird im Allgemeinen anhand verschiedener repräsentativer *Merkmale* vorgenommen. Ein Merkmal stellt dabei eine empirisch erfassbare Größe eines Untersuchungsobjektes dar, wie beispielsweise die von einem Piloten (Untersuchungsobjekt) benötigte Zeitdauer (Ausprägung) für die Ausführung einer spezifischen Aufgabe (Merkmal). Die einzelnen Ausprägungen der Merkmale ermöglichen schlussendlich die Feststellung von Unterschieden oder Gleichheiten zwischen Untersuchungsobjekten. Damit diese Merkmalsunterschiede besser beschrieben werden können, wird in der empirischen Forschung der Begriff *Variable* verwendet. Nach [Bortz & Döring, 2006] ist eine Variable wie folgt definiert:

„Eine Variable ist ein Symbol für die Menge der Ausprägungen eines Merkmales.“

Eine Variable repräsentiert eine veränderliche Größe. In der Regel hat eine Variable mindestens zwei oder mehrere Ausprägungen. Variablen mit nur einer Ausprägung (Konstanten) weisen in empirischen Untersuchungen eine eher untergeordnete Bedeutung auf. Werden Variablen im Rahmen einer Untersuchung diskrete Werte zugewiesen, so repräsentiert die Summe aller Merkmalsmessungen die *quantitativen Daten*. Im Gegensatz dazu wird von *qualitativen Daten* gesprochen, wenn die Ausprägungen der Variable nicht numerische Werte, sondern verbale Beschreibungen beinhalten. Demgemäß werden die Merkmale in qualitative oder quantitative Variablen eingeteilt. Neben diesen Einteilungsgesichtspunkten gibt es noch eine Vielzahl anderer. Eine Übersicht dazu kann beispielsweise [Edwards, 1980] oder [Bortz & Döring, 2006] entnommen werden.

In der vorliegenden Arbeit findet die Einteilung der Variablen nach dem experimentellen Charakter statt. Hierbei wird zwischen *unabhängigen* und *abhängigen Variablen* unterschieden. Die unabhängigen Variablen (UV) stellen dabei die kausalen Einflussgrößen auf die abhängigen Variablen dar (AV). In einer experimentellen Untersuchung werden somit die UV von einem Versuchsleiter variiert, um den Einfluss auf die AV beobachten bzw. messtechnisch erfassen zu können. Neben diesen beiden Haupttypen ist eine weitere, die

sogenannte *Störvariable*, anzutreffen. Diese Variable repräsentiert unerwünschte Einflüsse auf die erhobenen abhängigen Variablen. [Hussy et al., 2013] unterscheidet drei Klassen von Störvariablen:

- Versuchspersonenmerkmale (z.B. Alter, Intelligenz, Erfahrung),
- Situationsmerkmale (z.B. Beleuchtung, Uhrzeit, Lärmpegel) und
- Versuchsleitermerkmale (z.B. Sympathie/Antisymphathie, unterschiedliche Informationsmitteilungen an die Probanden).

5.1.3 Unabhängige Variablen

Als *unabhängige Variable* wurden verschiedene Konfigurationen des TKMs gewählt. Da im Zuge des durchgeführten Mensch-Maschine-Experiments aufgrund der beschränkten Verfügbarkeit von qualifizierten Versuchspersonen auch die Evaluierung der Selbsterklärungskomponente (SEK), siehe z.B. [Lettl & Schulte, 2013], stattgefunden hat, bildete diese eine weitere Versuchskonfiguration. Damit ergaben sich die verschiedenen *Versuchskonfigurationen (VK)* gemäß Tabelle 11.

VK	TKM		SEK
	Räumlich	temporär	
1	X	X	X
2	X	X	
3	X		X
4		X	

Tabelle 11: Versuchskonfigurationen in Bezug auf die Ausprägungen der unabhängigen Variablen

In der VK 1 standen den Probanden das TKM sowie die SEK im vollen Umfang zur Verfügung. Hierbei wurden den Piloten sowohl räumliche als auch temporäre Koordinationsinformationen über die MAS dargelegt. Die SEK lieferte auditive Meldungen. Diese Konfiguration stellt die primäre Vergleichskonfiguration zu den verbleibenden dar. In der VK 2 fehlte die SEK. Die temporären Koordinationsinformationen waren in der VK 3 nicht vorhanden (kein Timeline-Display verfügbar). Die verbleibende VK bildete ein Komplementär zu der VK 3. Hier standen den Probanden ausschließlich temporäre Koordinationsinformationen für die Missionsdurchführung zur Verfügung. Neben der fehlenden SEK wurden auch keine räumlichen Informationen zu den unbemannten Teammitgliedern auf dem Kartendisplay angezeigt.

5.1.4 Mission

Bevor die abhängigen Variablen zur Evaluierung der zuvor formulierten Hypothesen dargelegt werden, erfolgt eine Betrachtung der verschiedenen Aufgabenstellungen in den jeweiligen Experimenten. Im Abschnitt 5.1.4.1 wird dazu zunächst die Referenzmission mit den dazugehörigen Missionselementen erläutert. Aufbauend auf der Referenzmission wurden fünf unabhängige und unterschiedliche Messmissionen für die Evaluierung des entwickelten Arbeitssystemkonzeptes abgeleitet. Diese werden im Abschnitt 5.1.4.2 vorgestellt.

5.1.4.1 Referenzmission

Zur Bewertung des vorgestellten Konzeptansatzes ist im Vorfeld zusammen mit der TTVG-UAV (Gruppe zur Weiterentwicklung von Taktik, Technik und Verfahren) der Luftwaffe eine fiktive Luft-Boden-Angriffsmission, ein realistisches Szenario für zukünftig denkbare bemannt-unbemannte Operationen, entworfen worden [Gangl et al., 2014]. Die einzelnen Elemente (siehe Abbildung 79) dieses Szenarios werden nachfolgend beschrieben.

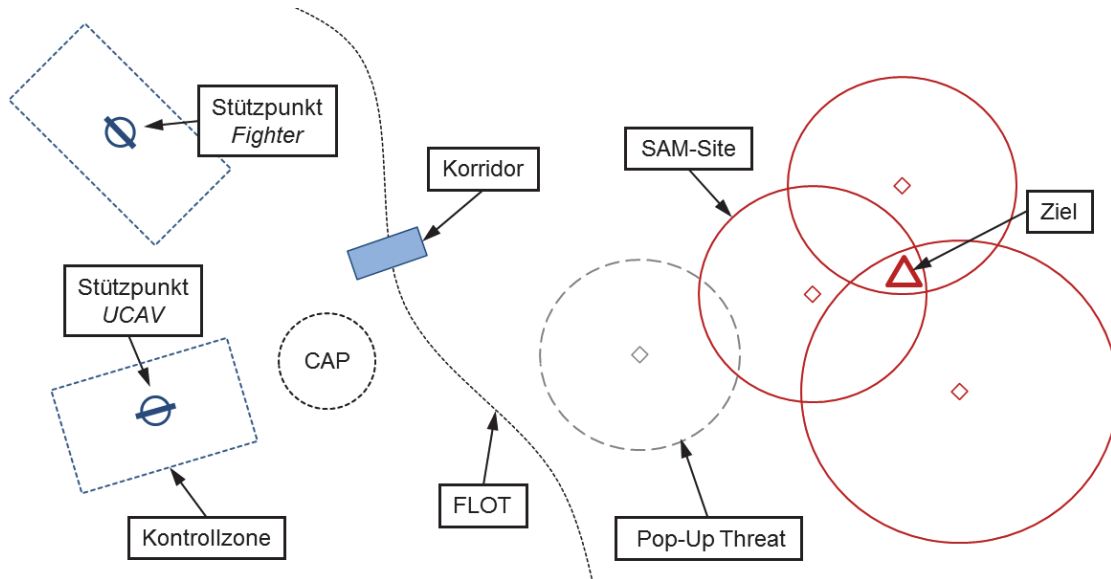


Abbildung 79: Schematische Darstellung des Referenzszenarios

Auf freundlichem Territorium befinden sich zwei militärische *Stützpunkte*. Auf einem dieser Stützpunkte ist das *bemannte Kampfflugzeug (Fighter)* und auf dem verbleibenden der *UCAV-Verband* stationiert. Diese dislozierte Anordnung ist gewählt worden, da militärische Truppenteile oftmals nach den Fähigkeiten räumlich konzentriert anzutreffen sind. Die Stützpunkte sind darüber hinaus von einer *Kontrollzone* umringt. Die Kontrollzone ist ein speziell ausgewiesener Luftraum, in dem Flugbewegungen nur mit einer Freigabe von der zugehörigen *Flugverkehrskontrolle (Air Traffic Control, ATC)* des Stützpunktes, auch als Tower bezeichnet, erlaubt sind. Die Erteilung von Freigaben für Start oder Landung am Stützpunkt gehört auch zu den Aufgaben des Towers. Außerhalb der Kontrollzonen findet auf dem freundlichen Gebiet ebenfalls eine Koordinierung der Luftfahrzeuge durch eine *Flugsicherungszentrale (Area Control Center, ACC)* statt. In unmittelbarer Nähe zum UCAV-Stützpunkt befindet sich ein Verfügungsraum, das sogenannte *CAP (Combat Air Patrol)*. Hierbei handelt es sich um einen ausgewiesenen Luftraum, in dem Kräfte für einen möglichen Einsatz zur Verfügung gehalten werden können. Die Grenze zwischen dem freundlichen und feindlichen Territorium bildet die sogenannte *FLOT (Forward Line of Own Troops)*. Der Übertritt vom freundlichen in das feindliche Gebiet ist nur über den *Korridor* gestattet. Im feindlichen Gebiet übernimmt die *Einsatzleitstelle*, welche in den Experimenten auch als Magic bezeichnet wird, die Koordinierung der verschiedenen Operationen und somit der Luftfahrzeuge. Parallel dazu ist diese Stelle für die Informationsaufnahme und Weitergabe zwischen der übergeordneten Kommandostelle und den Streitkräften zuständig. Im feindlichen Gebiet sind sowohl bekannte als auch unbekannte *Flugabwehrstellungen (SAM-Sites)* anzutreffen. Umringt von feindlichen SAM-Sites befindet sich das eigentliche Ziel, das *Target*.

Die Hauptaufgabe liegt in der erfolgreichen Bekämpfung eines vorgegebenen Ziels auf feindlichem Territorium mit einer lasergelenkten Bombe. Damit dieses Ziel bekämpft werden kann, müssen im Vorfeld zahlreiche feindliche Flugabwehrstellungen durch die unbemannten Teammitglieder unter Einsatz von HARMs unterdrückt werden. Erst danach kann das bemannte Kampfflugzeug als Wirkmittelträger in das eigentliche Zielgebiet vordringen. Nach einer erfolgreichen Zielaufklärung durch ein unbemanntes Teammitglied muss der Kampfflugzeugpilot die Verifizierung des Ziels vornehmen. Bei einem positiven Ergebnis wird die Zielbekämpfung mit einer lasergelenkten Bombe in dem sogenannten Buddy-Lasing Verfahren (siehe z.B. [ESG, 2009]) durchgeführt. Dabei übernimmt ein unbemanntes Teammitglied die als gefährlicher eingestufte Aufgabe der Zielmarkierung mit einem Laserdesignator, während das bemannte Kampfflugzeug das Wirkmittel, die LGB, aus einer sicheren Höhe abwirft. Unmittelbar nach dem Einschlag der Waffe erfolgt die Wirkungsaufnahme durch ein unbemanntes Teammitglied. Das dabei generierte Bildmaterial wird dem Piloten im Cockpit zur weiteren Betrachtung zur Verfügung gestellt, um die Wirkung auf das Ziel zu bewerten. Nach einer festgestellten erfolgreichen Bekämpfung ist die Missionaufgabe erfüllt und das Team kann auf direktem Weg zu den Stützpunkten zurückkehren.

5.1.4.2 Messmissionen

Im Rahmen von Vorversuchen konnte bei den Probanden ein einprägender Effekt über den Missionsverlauf bei wiederholten Durchführungen desselben Szenarios festgestellt werden. Dies machte sich vor allem durch ein unerwünschtes erfahrungsbasiertes Handeln der Probanden bemerkbar. So bereiteten sich beispielsweise einige Probanden bei wiederholter Durchführung einer bekannten Mission bereits vor Aktivierung einer unbekanntes Flugabwehrstellung auf die Ausführung von Gegenmaßnahmen, wie Ausstoßen von Chaffs und/oder Flares, vor. Um diesen Lerneffekten und somit auch den erfahrungsbasierten Handlungsweisen der Probanden entgegenzuwirken, wurden in der finalen experimentellen Evaluierung unterschiedliche Szenarien verwendet. Dabei sind die einzelnen Missionselemente, wie Flugplatz, FLOT, Korridor, CAP, Flugabwehrstellung sowie unbekannte Bedrohungen unterschiedlich in der Mission positioniert worden. In Tabelle 12 sind die verwendeten Messmissionen in Verbindung mit den gewählten Versuchsconfigurationen (vgl. Tabelle 11) aufgeführt.

Mission/ VK	Stützpunkt Fighter	Stützpunkt UCAV	SAM- Sites	Pop-Up Threat	Ziel	Anmerkung
A / 1	Lechfeld	Landsberg	4	1	Gebäude	
B / 2	Neuburg	Manching	3	0	Gebäude	
C / 3	Lechfeld	Landsberg	4	1	Fahrzeug	
D / 4	Lechfeld	Landsberg	4	0	Fahrzeug	
E / 1	Neuburg	München	2	1	Fahrzeug	Falsches Ziel

Tabelle 12: Übersicht der verschiedenen Messmissionen

In den Messmissionen A, C und D lag der Stützpunkt des bemannten Kampfflugzeuges in Lechfeld und in der Mission B und D in Neuburg. Der Stützpunkt für das unbemannte Team war dementsprechend entweder in Landsberg oder Manching angesiedelt. Abhängig von der Mission mussten zwei bis vier bekannte Flugabwehrstellungen unterdrückt werden, bevor das bemannte Kampfflugzeug gefahrlos zum Ziel vordringen konnte. Das primäre

Ziel bildete entweder ein Fabrikgebäude oder ein militärisches Fahrzeug, außer in der Messmission E. Hier wurde das im Vorfeld unterrichtete Ziel, ein militärischer Waffentransporter, durch ein falsches Ziel, einen militärischen Rettungswagen, ersetzt. In der Mission E musste somit zum Vergleich zu den restlichen Missionen keine Zielbekämpfung durchgeführt werden. Die primäre Aufgabe lag in der negativen Verifizierung des potentiellen Zielobjektes. Darüber hinaus war je nach Mission eine unbekannte Bedrohung, ein sogenannter Pop-Up Threat, im Szenario enthalten. Diese Bedrohung war im näheren Umfeld zum Korridor angesiedelt und wurde erst auf dem Rückflug zu den Stützpunkten aktiv.

Für die Durchführung der Messmissionen wurden dem Flugzeugführer des bemannten Kampfflugzeuges jeweils drei unbemannte Systeme zur Seite gestellt. Jedes dieser Systeme war mit einem Kamerasystem, Laserdesignator und zwei HARMs ausgestattet. Das bemannte Kampfflugzeug war ausschließlich mit lasergelenkten Bomben bewaffnet und verfügte über keine Wirkmittel, um feindliche Boden-Luft-Bedrohungen aktiv bekämpfen zu können. Im Falle eines feindlichen Beschusses war das bemannte Kampfflugzeug mit ausreichender Anzahl an Täuschkörpern zum Selbstschutz ausgestattet. Ebenfalls verfügte jedes Kampfflugzeug im Team über eine missionsrelevante Sensorik-Ausrüstung (z.B. MAW und RWR).

5.1.5 Abhängige Variablen

Die in Abschnitt 5.1.1 formulierten wissenschaftlichen Hypothesen müssen für die experimentelle Evaluierung *operationalisiert* werden. Darunter wird die Identifikation von erfassbaren Merkmalen am Untersuchungsobjekt verstanden, die den Inhalt einer Hypothese als *abhängige Variablen* wiedergeben. Je besser diese abhängigen Variablen die Kernaussage der Hypothese verkörpern, umso korrekter kann diese schlussendlich bestätigt oder falsifiziert werden. Die bereits dargelegten zu untersuchenden Hypothesen lassen sich aufgrund der allgemein gestalteten Formulierungen nur unvollständig durch ein singuläres Merkmal (AV) operationalisieren. Vielmehr müssen diese Behauptungen von verschiedenen Gesichtspunkten aus betrachtet werden, weshalb die Untersuchung hinsichtlich verschiedener Leistungs- und Verhaltensmaße sowie subjektiver Maße erfolgte. In Abbildung 80 sind diese Maße in Bezug auf das Arbeitssystem schematisch dargestellt.

Zur Beschreibung der erzielten *Leistungen* im Arbeitssystem wurden *missionsbezogene* Leistungsmaße, wie erfolgreiche Durchführung des Arbeitsziels, sowie *individuelle* Maße zu den Versuchspersonen, wie zeitliche Abweichung zum Missionsplan, herangezogen. Auch wurden *systembezogene* Größen, wie die Erfolgsrate der Durchführung von Teilaufgaben durch die einzelnen UCAVs, festgehalten, um die Leistung der unbemannten Teammitglieder zu beziffern. Welche Leistungsmaße im Detail erhoben worden sind, kann dem Abschnitt 5.3 entnommen werden.

Im Hinblick auf die Beantwortung der zuvor formulierten Hypothesen wurde das *Pilotenverhalten* mit dem technischen System, der MMS im Kampfflugzeugcockpit, erfasst. Dazu wurden die manuellen Eingaben, die visuellen Informationsaufnahmen des Probanden sowie die auditive Ein- (z.B. DVI-Kommando) und Ausgaben (z.B. Warntöne, Selbsterklärungen) aufgezeichnet. Verhaltensevaluierungen der maschinellen Systeme, wie den unbemannten Teammitgliedern, fanden im Rahmen dieser Arbeit nicht explizit statt.

Weiterführende Informationen zum resultierenden Verhalten der unbemannten Teammitgliedern kann beispielsweise dem Abschnitt 4.2 oder [Meitinger, 2008][Gangl et al., 2014] entnommen werden.

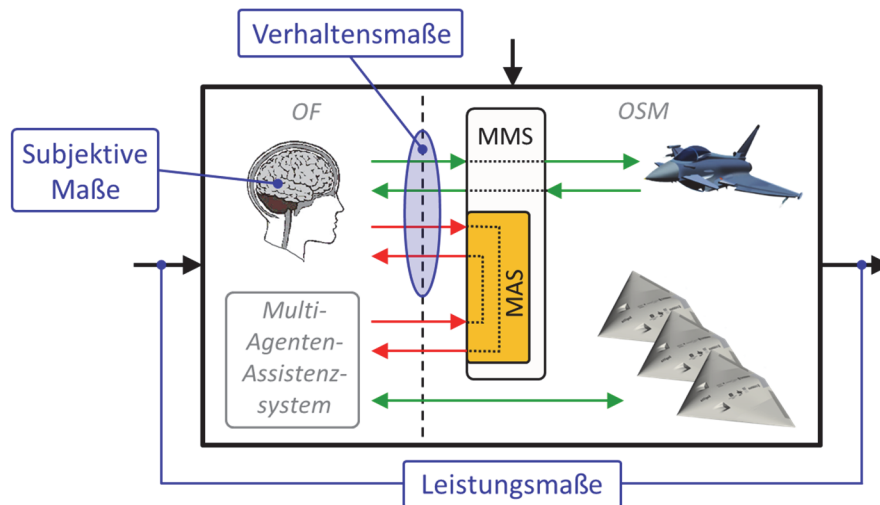


Abbildung 80: Schematische Darstellung der erhobenen Leistungs- und Verhaltensmaße sowie subjektiver Maße im Arbeitssystem

Die *subjektiven Maße* begründen die letzte Untergruppe der abhängigen Variablen, die in der experimentellen Evaluierung erfasst wurden. Die Bestimmungen der Ausprägungen dieser Variablen wurden über subjektive Einschätzungen durch die Versuchspersonen selbst vorgenommen. In der Experimentalkampagne wurden mehrere subjektive Maße, wie Beanspruchung, Situationsbewusstsein oder Akzeptanz, über Fragebögen oder standardisierte Erhebungsmethoden (vgl. Abschnitt 5.3) erfasst.

5.1.6 Messwerterfassung und Datenerhebung

Im Nachfolgenden werden die angewendeten quantitativen Erhebungsmethoden zur Messwerterfassung der abhängigen Variablen aufgezeigt. Die qualitativen Erhebungsmethoden, wie Interview oder Beobachten, werden hierbei nicht explizit aufgelistet. Weiterführende Informationen dazu können beispielsweise aus [Hussy & Jain, 2002] [Bortz & Döring, 2006][Sedlmeier & Renkewitz, 2013] entnommen werden.

Leistung

Die messtechnische Erfassung der einzelnen *Leistungsmaße*, wie Missionserfolg, Verluste, Erfüllung von Teilaufgaben, Effizienz im Umgang mit Ressourcen, zeitliche Abweichungen zur optimalen koordinativen Position oder Verweilzeiten der Kampfflugzeuge in den Erfassungsbereichen von feindlichen Flugabwehrstellungen, erfolgte während der Versuchsdurchläufe über ein Softwareprogramm (Datenlogger) automatisiert.

Verhalten

Neben den Leistungsmaßen fand die Aufzeichnung von *Verhaltensmaßen* der Probanden, wie manuelle/verbale Eingaben oder visuelle Informationsaufnahme, statt. Für die messtechnische Erfassung der *manuellen/verbalen Eingaben* des Piloten über die MMS wurde die Simulationsumgebung diesbezüglich erweitert. Die resultierende Architektur ist in Abbildung 81 dargestellt.

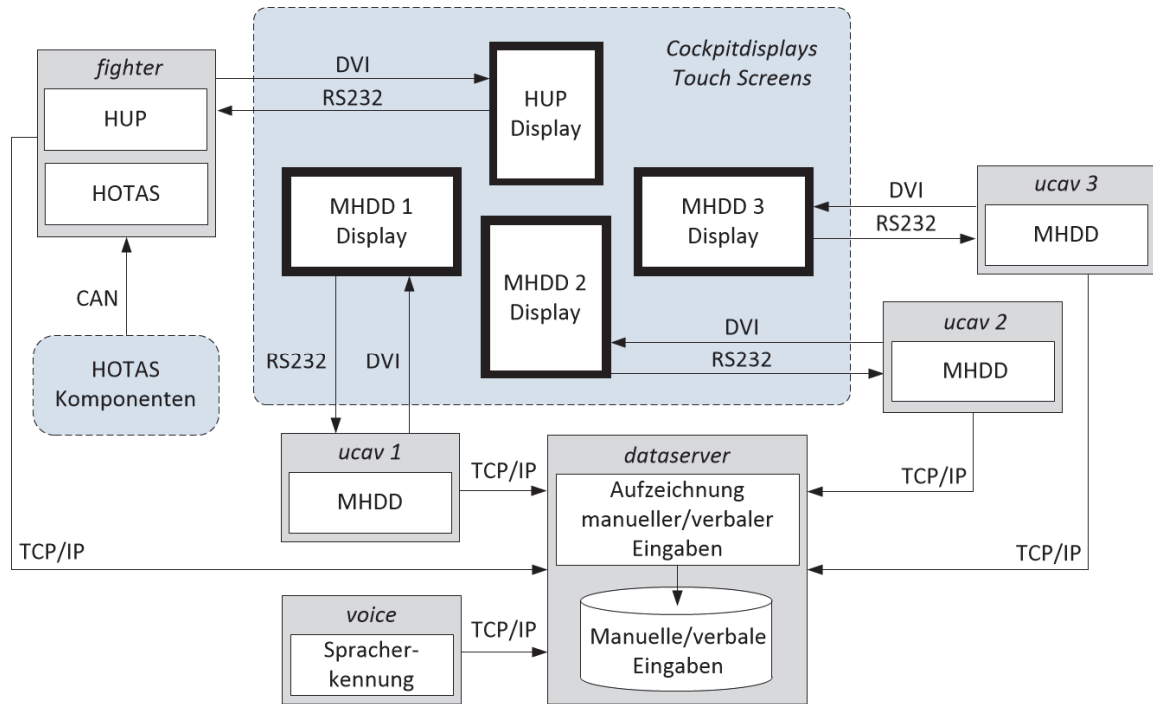


Abbildung 81: Erfassung der manuellen/verbaler Eingaben über die MMS

Für die Erfassung von Blickbewegungen zur Bestimmung der *visuellen Informationsaufnahme* des Probanden existieren verschiedene Messverfahren, wie das Kontaktlinsen- oder videobasierte Verfahren. Eine detaillierte Betrachtung dieser Verfahren kann beispielsweise in [Duchowski, 2007] gefunden werden. Im Rahmen der durchgeführten Experimentalkampagne kam das kommerziell erhältliche videobasierte System *faceLAB* [Seeing Machines, 2009] der Firma *Seeing Machines* zum Einsatz. Dieses System erfasst Blickbewegungen mittels einer *berührungsfreien* Methode. Es werden somit keine Komponenten des Messsystems am Probanden, wie beispielsweise über eine Brille oder Helm, befestigt. In Abbildung 82 ist der verwendete Messaufbau schematisch dargestellt.

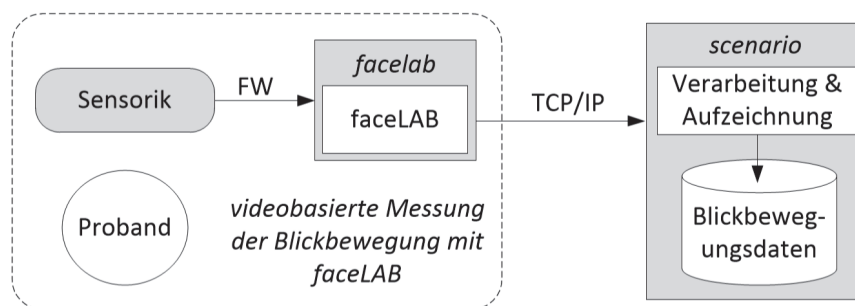


Abbildung 82: Messaufbau des Blickbewegungsmesssystems

Die Sensorik des Messsystems umfasst zwei Kameras, die mittels einer FireWire (FW) Schnittstelle mit dem zugehörigen Rechnersystem verbunden sind, sowie eine Infrarotlichtquelle, die im nicht sichtbaren Bereich operiert. Für die Erfassung der Blickbewegungen der Versuchspersonen wurde die Sensorik im Kampfflugzeugcockpit im Bereich des HUP-Displays (vgl. Abbildung 83) angebracht.

Die kontinuierliche Echtzeitauswertung der Kamerabilder findet im Messsystem faceLAB zweistufig statt. Zunächst wird über markante Gesichtsmerkmale, wie Augen- und Mundwinkel, die Ausrichtung des Kopfes in Bezug auf die Kamerasensoren erhoben. Im Anschluss daran findet die Erfassung der Augenbewegungen des Probanden über verschiedene Reflexionen im Auge, hervorgerufen durch das Infrarotlicht, statt. Basierend auf diesen ermittelten Daten und einem hinterlegten *Weltmodell* wird schlussendlich das Blickverhalten in Bezug auf die MMS bzw. Außensicht bestimmt. Das Weltmodell stellt dabei eine maßgetreue Modellabbildung der Umwelt im Computer, referenziert auf die Kamerasensoren, dar. In dieser Untersuchung bestand dieses aus einer Nachbildung der Cockpitdisplays mit der Außensicht (siehe Abbildung 83).

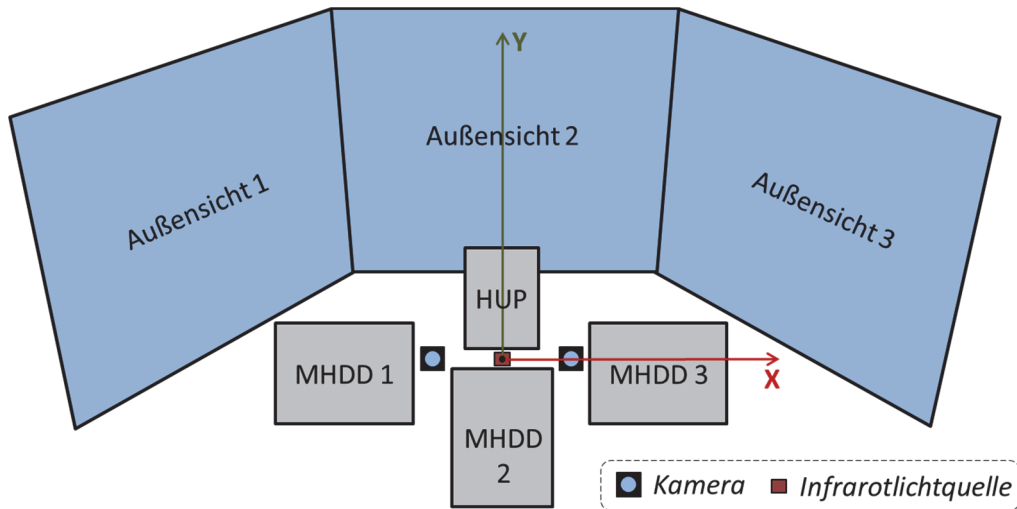


Abbildung 83: Umweltmodell für das Blickbewegungsmesssystem faceLAB

Die vom Messsystem faceLAB bereitgestellten Blickdaten wurden an das Rechnersystem *scenario* zur Weiterverarbeitung übertragen. Zur Auswertung der erfassten Blickbewegungen wurde ferner die Bestimmung von *Fixationen* und *Sakkaden* vorgenommen. Bei einer Fixation ist der Blick auf ein bestimmtes Objekt gerichtet, während es sich bei Sakkaden um sprunghafte Blickbewegungen zwischen einzelnen Fixationen handelt. Innerhalb von Sakkaden findet nach z.B. [Link, Tietze, Schmidt & Sievert, 2008] keine Informationsaufnahme statt. Gemäß der *Eye-Mind-Hypothese* von [Just & Carpenter, 1980] kann davon ausgegangen werden, dass es während Fixationen zu Informationsaufnahmen kommt. Um nun diese Fixationen automatisiert zu detektieren, wurde der *Dispersion Threshold Identification (I-DT) Algorithmus* [Salvucci, 1999][Salvucci & Goldberg, 2000] verwendet. Die auf diese Weise bestimmten Fixationen wurden zusammen mit den Rohdaten aus faceLAB über den gesamten Missionsverlauf aufgezeichnet.

Damit im Rahmen der Auswertung der erfassten Fixationen auf die im Cockpit wahrgenommenen Objekte auf der MMS bzw. Außensicht zurückgeschlossen werden konnte, musste neben den Blickkoordinaten auch der angezeigte Inhalt der Displays bekannt sein. Damit diese Information vorliegen, wurden die Inhalte der einzelnen Cockpitdisplays (MHDD und HUP) sowie der Außensichten zeitsynchronisiert aufgezeichnet. Dazu wurde jedes DVI-Signal (vgl. Abbildung 56) von einem Framegrabber abgegriffen und in der Form von Einzelbildsequenzen auf ein Speichermedium abgelegt.

Neben den visuell dargelegten Informationen konnten dem Piloten auch während der Missionsausführung verschiedene Informationen über den auditiven Kanal zugespielt werden. Generell handelte es sich um Warn- oder Hinweistöne sowie Selbsterklärungen

[Lettl & Schulte, 2013]. Diese Mitteilungen wurden messtechnisch erfasst, indem sie unmittelbar über das Softwaremodul „CAMU“ (siehe Abschnitt 4.1.1) abgegriffen und abgespeichert worden sind.

Subjektive Maße

Die Ermittlung der *Beanspruchung* der Versuchspersonen fand unter Verwendung des *NASA-Task Load Index* (NASA-TLX) Verfahrens nach [S. G. Hart & Staveland, 1988] statt. Hierbei handelt es sich um ein subjektives, mehrdimensionales Bewertungsverfahren mittels eines standardisierten Fragebogens. Die Beanspruchung wird in diesem Verfahren in sechs Teilbeanspruchungen (geistige Anforderung, körperliche Anforderung, zeitliche Anforderung, Leistung, Anstrengung und Frustration) unterteilt. Zunächst werden die einzelnen Teilbeanspruchungen gegeneinander gewichtet, bevor jede einzelne Teilbeanspruchung bezüglich ihrer absoluten Höhe bewertet wird. Das Ergebnis, ein globales Beanspruchungsmaß (*Task Load Index*), liefert einen gewichteten Mittelwert über die Teilbeanspruchungen. Der TLX-Wert erlaubt keine Rückschlüsse, um beispielsweise Überforderungssituationen zu erkennen, da keine Bezugs- oder Schwellwerte definiert sind. Jedoch können diese Werte herangezogen werden, um vor allem interindividuelle Veränderungen der Beanspruchung bei Veränderung z.B. der unabhängigen Variablen zu erfassen. Darüber hinaus ermöglicht dieses Verfahren, eine Aussage über die Zusammensetzungen einer erhobenen Beanspruchung hinsichtlich der 6 Teilbeanspruchungen zu tätigen. Für die Erhebung der Beanspruchung mittels dieser Methode muss die Simulation angehalten werden. Damit die Versuchspersonen dabei die soeben durchlebte Situation unverfälscht wiedergeben konnten, wurde unmittelbar nach einer Unterbrechung der NASA-TLX durchgeführt. Damit die erfassten Werte bezogen auf die Versuchskonfigurationen und die vorliegende Aufgabensituation miteinander verglichen werden konnten, erfolgte die Unterbrechung in jedem Experiment vor dem Einflug des bemannten Teammitgliedes in den Korridor, unmittelbar nach der Verfügbarkeit von Aufklärungsbildern zur Zielverifizierung und nach der Bekämpfung des Ziels mit einer LGB (Mission A-D) bzw. einem Missionsabbruch (Mission E) (vgl. Abschnitt 5.1.4).

Die Erfassung der personenbezogenen Daten zu jeder Versuchsperson sowie deren Einstellung gegenüber Simulatoren und unbemannter Systeme fand über eigens erstellte *Fragebögen* vor Beginn der experimentellen Untersuchungen statt. Darüber hinaus wurden nach jeder durchgeführten Mission subjektive Aussagen seitens der Probanden zu den einzelnen entwickelten Systemen, wie TKM oder MAS, in Abhängigkeit der VK über Fragebögen aufgenommen. Hierbei war das primäre Ziel die grundlegende Gebrauchstauglichkeit, die sogenannte *Usability*, der einzelnen Systemkonfigurationen festzuhalten. Ein weiterer Fragebogen wurde im Anschluss zum letzten Experiment genutzt, um eine übergreifende subjektive Meinung der Versuchspersonen zum entwickelten Arbeitssystemkonzept aufzunehmen.

Situationsbewusstsein

Die Erfassung des individuellen, subjektiven Situationsbewusstseins (vgl. Abschnitt 2.3.3) von Versuchspersonen kann grundsätzlich über direkte oder indirekte Erhebungsmethoden erfolgen (siehe z.B. [Rauch, 2009]). Bei den indirekten wird beispielsweise über das festgestellte Ergebnis von Situationsbewusstsein (Leistungs-, Verhaltensmaße) auf die vorliegende SA zurückgeschlossen. Nach [Endsley, 2000] unterliegt jedoch das Erfasste neben der SA meist noch weiteren Einflussgrößen. Direkte Methoden hingegen erfassen die SA ohne Umweg, auf „direktem“ Weg. In der Experimentalkampagne fand die Erfassung der SA ausschließlich über direkte Methoden statt. Zum Einsatz kam die

objektive *Situation Awareness Global Assessment Technique (SAGAT)* [Endsley, 1988] sowie subjektive *Situation Awareness Rating Technique (SART)* Verfahren [Taylor, 1990].

Im SAGAT Verfahren wird die SA des Probanden erfasst, indem dieser während einer Simulationsunterbrechung ausgewählte Fragen zur Situation gemäß den drei Ebenen nach [Endsley, 1988] (vgl. Abschnitt 2.3.3) beantwortet. Die Grundannahme in diesem Verfahren ist, dass die Antworten einen Aufschluss über das vorliegende Situationsbewusstsein zulassen. Das heißt auch, dass zum Erhebungszeitpunkt die tatsächlich notwendige SA bekannt sein muss, damit dazu geeignete Fragen den Probanden vorgelegt werden können.

Für die Erhebung der SA wurden dieselben Simulationsunterbrechungen wie bei der Erfassung der Beanspruchung mittels des NASA-TLX Verfahrens genutzt. Um Aussagen über die benötigte situationsabhängige SA zu den jeweiligen Messzeitpunkten in Bezug auf die Versuchskonfiguration treffen zu können, wurden Aufgabenanalysen sowie umfassende Vorversuche durchgeführt. Basierend darauf erfolgte die Formulierung der Fragen, die grundsätzlich folgende Inhalte abdeckten:

- Positionen von Missionsobjekten (bemanntes Kampfflugzeug, Schattenflieger, UCAVs, Zielobjekte, Flugabwehrstellungen)
- Zustände des bemannten Kampfflugzeuges (Flugparameter, Systemeinstellungen)
- Aktivitäten und verfügbare Ressourcen des bemannten Kampfflugzeuges sowie der unbemannten Systeme
- Relevanz feindlicher Bedrohungen

Neben diesem Verfahren wurde auch das SART-Verfahren zur Ermittlung der SA herangezogen. Hierbei handelt es sich um ein subjektives Verfahren, in dem die Versuchspersonen aus ihrer eigenen Sichtweise heraus über eine Ratingskala die vorherrschende SA beziffern. Die Erhebung findet dabei über zehn Fragen, die auf einer siebenstufigen Skala von „hoch“ bis „niedrig“ bewertet werden, statt. Die Fragen umfassen nach [Taylor, 1990] folgende Kategorien und Dimensionen:

Frage	Kategorien	Dimensionen
F01	Instabilität	Bedarf an Aufmerksamkeit
F02	Komplexität	
F03	Variabilität	
F04	Wachsamkeit	Genutzte Aufmerksamkeit
F05	Konzentration	
F06	Aufmerksamkeit	
F07	Kapazität	
F08	Informationsquantität	Verständnis der Situation
F09	Informationsqualität	
F10	Vertrautheit	

Tabelle 13: Kategorien und Dimensionen des SART Verfahrens

Ein Kritikpunkt dieses Verfahrens kann in der Selbstbeurteilung der SA durch die Versuchsperson selbst gesehen werden. Die Versuchsperson verfügt in der Regel nicht über das Wissen, welche relevanten Informationen nicht wahrgenommen worden sind.

Die subjektive Erhebung der SA mittels des SART Verfahrens erfolgte unmittelbar, jeweils im Anschluss an eine durchgeführte Mission.

5.1.7 Rahmenbedingungen

Für die experimentelle Evaluierung der in Abschnitt 5.1.1 formulierten Hypothesen wurde aufgrund der limitierten Anzahl an repräsentativen Versuchspersonen das *Within-Subjects-Design* gewählt. Jeder an der Experimentalkampagne teilnehmende Proband durchläuft somit jede einzelne Versuchskonfiguration (unabhängige Variable). Das Gegenstück dazu stellt das *Between-Subjects-Design* dar (jeder Proband durchläuft nur eine einzige Versuchskonfiguration).

Neben der geringeren benötigten Anzahl von Versuchsteilnehmer bei gleichbleibender Versuchsanzahl hat das *Within-Subjects-Design* einen weiteren wesentlichen Vorteil. Da alle Probanden jeden Versuch absolvieren, sind die *personenbezogenen* Störvariablen (z.B. Alter, Intelligenz, Erfahrung) der Probanden nach z.B. [Sedlmeier & Renkewitz, 2013] optimal in den verschiedenen Versuchskonfigurationen parallelisiert. Es sind daher keine zusätzlichen Maßnahmen zur Kontrolle dieser versuchspersonenbezogenen Störvariablen in den durchgeführten Experimenten notwendig.

Neben dieser Störvariablenklasse existieren, wie in 5.1.2 aufgeführt, noch weitere, die im Rahmen von Experimenten zu berücksichtigen sind. Um den Einfluss der Störvariablen hinsichtlich der Situationsmerkmale auf die abhängigen Variablen möglichst konstant zu halten, wurden verschiedene Vorkehrungen getroffen. Durch die Einhaltung eines im Vorfeld erarbeiteten Zeitplanes konnte sichergestellt werden, dass jeder Proband ungefähr zur selben Uhrzeit dasselbe Experiment absolvierte. Damit auch dieselben Umgebungsbedingungen (z.B. Geräuschpegel, Beleuchtung) vorherrschten, wurde der Kampfflugzeugsimulator mit einem stark geräuschkämpfenden Headset ausgestattet sowie über einen lichtundurchlässigen Sichtschutz (siehe Abbildung 84) abgeschottet.

Eine weitere Klasse von Störvariablen bilden die Versuchsleitermerkmale. Damit diese unerwünschten Einflüsse auf die abhängigen Variablen auf demselben Niveau gehalten werden, wurde die Zusammenarbeit mit den Probanden standardisiert. Dazu wurden verschiedene Checklisten ausgearbeitet, die sicherstellten, dass jede Versuchsperson dieselbe Information erhielt und über denselben Wissenstand verfügte.

Die Durchführung der Laborexperimente fand in der in Abbildung 84 dargestellten Experimentalumgebung statt. Das Kernelement stellte dabei der bereits in Abschnitt 4.1 erläuterte Kampfflugzeugsimulator mit den Außensichtsystemen dar.

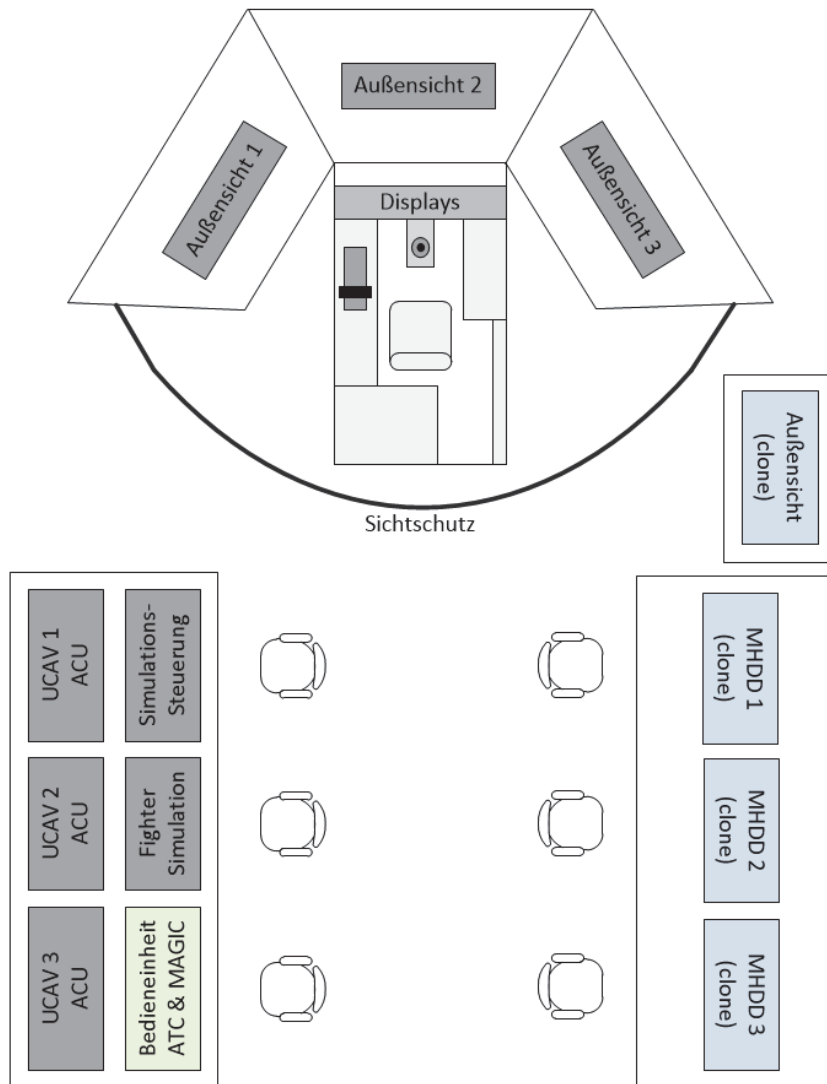


Abbildung 84: Experimentalumgebung mit Arbeitsplätzen zur Simulationssteuerung, zur Bedienung der simulierten Funkgegensprechanlage und zur Beobachtung des Pilotenverhaltens

Auf der linken Seite befanden sich zwei Arbeitsplätze zur Simulationssteuerung und Bedienung der simulierten Funkgegensprechanlage. Der Bediener der Simulationssteuerung war neben dieser Aufgabe auch für die Steuerung der Datenaufzeichnung verantwortlich. Für diese Aufgaben standen dem Bediener mehrere Bildschirmsysteme, dargestellt durch graue Blöcke, zur Verfügung. Damit während der Versuche auch eine Sprechfunkkommunikation zwischen dem Probanden und der Flugverkehrskontrolle (ATC) sowie der Einsatzleitstelle (Magic) stattfinden konnte, wurde eine Gegenstelle in die Experimentalumgebung integriert.

Die Bildschirme auf der rechten Seite (blaue Blöcke) in Abbildung 84 dienten dem Versuchsleiter dazu, die Missionsausführung zu beobachten. Darauf wurden die Inhalte der relevanten Cockpitdisplays MHDD 1 bis 3 sowie der Außensichten gespiegelt wiedergegeben. Zusätzlich dazu fand eine Überlagerung der gespiegelten Cockpitdisplays mit den erfassten Blickbewegungen sowie manuellen Eingaben statt. Abbildung 85 zeigt ein gespiegeltes MHDD mit aufgezeichneten Blickbewegungen (1, grüner Linienverlauf) sowie einer manuellen Eingabe (2, roter Kreis).

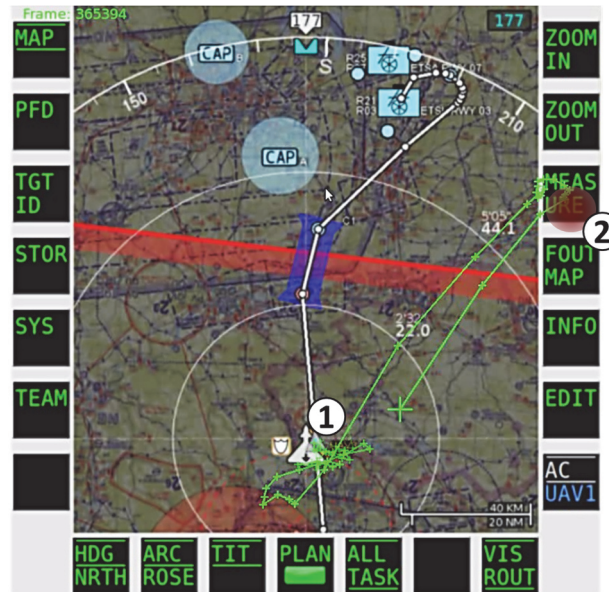


Abbildung 85: Gespiegeltes MHDD überlagert mit Blickbewegungen und manueller Eingabe zur Beobachtung des Pilotenverhaltens

5.2 Versuchsdurchführung

Im folgenden Abschnitt wird die Versuchsdurchführung dargelegt. Dazu wird beginnend im Abschnitt 5.2.1 der allgemeine Versuchsablauf zu den durchgeführten Experimenten erläutert. Dieser umfasst neben allgemeinen Durchführungsverfahren der Messmissionen auch Informationen über das abgehaltene Training. Zu Beginn jeder Messmission wurde ein militärisches Briefing abgehalten, um die Durchführung der Versuche so realitätsnah wie möglich zu gestalten. In Abschnitt 5.2.2 wird dieses zusammenfassend aufgezeigt. Im Anschluss an ein durchgeführtes Experiment, ein beispielhafter Ablauf ist in Abschnitt 5.2.3 angeführt, wurde ein Debriefing durchgeführt. Der Inhalt des Debriefings wird im Abschnitt 5.2.4 erläutert. Abschließend werden im Abschnitt 5.2.5 personenbezogene Daten in anonymisierter Form zu den Versuchspersonen aufgelistet.

5.2.1 Allgemeiner Versuchsablauf

Insgesamt wurden für die Durchführung der Experimentalkampagne drei Arbeitswochen benötigt. Für jede der sechs Versuchspersonen standen zwei komplette Tage zur Verfügung. Der erste Tag (siehe Tabelle 14) beinhaltete vor allem eine umfangreiche Einweisung in den Kampfflugzeugsimulator und in die Messwerterfassung. Deren Inhalt wurde direkt im Anschluss anhand spezifischer Trainingsmissionen erprobt. Am Ende des ersten Tages fand schlussendlich das erste Experiment (Messmission A) statt. Der zweite Tag (siehe Tabelle 15) diente vorwiegend der Durchführung von Experimenten. Im Nachfolgenden werden die beiden Versuchstage exemplarisch erläutert.

Versuchstag 1: Dieser begann mit der Erhebung von personenbezogenen Daten, wie Alter, Flugerfahrung und Ausbildung der Versuchsperson mit einem vorgefertigten Fragebogen (vgl. Abschnitt 5.2.5). Danach begann die Einweisung in den Kampfflugzeugsimulator. Die Einweisung wurde in mehrere Teile gegliedert. Im ersten Teil erfolgte die Erklärung von

Systemen, ihrer Bedienung und Funktionen, die ausschließlich dem operationellen Betrieb des Kampfflugzeuges zuzuordnen sind. Dazu zählten beispielsweise das Waffensystem, die HOTAS Bedienelemente, der Autopilot, verschiedene Display-Formate und die dazugehörige Symbolik. Die Erläuterungen der einzelnen Systeme inklusive der Funktionen wurden durch den Versuchsleiter anhand einer Checkliste durchgeführt. Nachdem alle Fragen der Versuchsperson beseitigt waren, ging es an die Erprobung der erklärten Systeme im operationellen Betrieb. Jeder Versuchsperson wurde ausreichend Zeit zur Verfügung gestellt, um sich mit den verschiedenen Systemen vertraut zu machen. Dazu zählte auch jedes einzelne System, sowie jede Funktion beliebig oft zu testen.

Nach einer kurzen Pause erfolgte die Sprecheradaption an das Spracherkennungssystem für den zweiten Einweisungsteil. Dazu musste der Pilot genau definierte Wörter, Zahlen und Sätze in das System sprechen. Dieser Vorgang diente der Erhöhung der Erkennungsrate des Spracherkennungssystems. Im Anschluss daran erfolgte die Einweisung in das luftgestützte Multi-UCAV-Führungssystem. Dazu zählte zum Beispiel die Team-Page, die Timeline-Page, das erweiterte Kartendisplay oder die Nutzung des Direct-Voice Input Systems. Für die Sicherstellung eines einheitlichen Wissenstands der Versuchspersonen kam eine Checkliste zum Einsatz. Nach Klärung aller offenen Fragen wurde die erste Testmission durchgeführt, die bereits alle Elemente der späteren Messmissionen beinhaltet. Die Versuchspersonen wurden hierbei aufgefordert, alle Funktionen und Systeme bezüglich der teambasierten Führung im operationellen Betrieb zu testen. Bei Problemen und Fragen stand der Versuchsleiter zur Verfügung. Nach Beendigung der Testmission 1 und einer kurzen Abschlussdiskussion ging es in die Mittagspause.

Zeit [min]	Ablauf
15	Fragebogen zur Erfassung von personenbezogenen Daten
60	Einweisung in das Kampfflugzeugcockpit durch den Versuchsleiter
30	Übungsflug (ohne unbemannte Teammitglieder)
10	Pause
15	Sprecheradaption für das DVI-System zur Erhöhung der Erkennungsrate des Spracherkennungssystems
30	Einweisung in das luftgestützte UCAV-Führungssystem
45	Testmission 1
60	Mittagspause
30	Konfiguration des Blickbewegungsmesssystems
10	Besprechung der Funkkommunikation mit ATC und der übergeordneten Einsatzleitstelle Magic
45	Testmission 2 mit Blickbewegungsmessung und Funkkommunikation
10	Pause
20	Einweisung in die SAGAT und NASA-TLX Messmethode
60	Testmission 3 mit Mission Briefing
10	Pause
90	<i>Messmission A</i> inklusive Fragebögen und Befragung

Tabelle 14: Versuchsablauf – Tag 1

Der nächste Punkt auf der Agenda beinhaltete die Einweisung in das Blickbewegungsmesssystem. Im Speziellen wurden dem Probanden seine Aufgaben für eine erfolgreiche Kalibrierung des Systems erläutert. Im Anschluss an die Kalibrierung fand die Besprechung des Funkkommunikationsablaufes mit der simulierten Flugverkehrskontrolle und Einsatzleitstelle statt. Hierbei kam es zur Erörterung der festgelegten Pflichtmeldepunkte und Sprechfunk-Frequenzen.

Die zweite Testmission beinhaltete erstmals die sensorische Erfassung der Blickbewegungen der Versuchsperson sowie die Durchführung der Funkkommunikation. Die Versuchsperson wurde dabei angehalten, die Mission so gut wie möglich eigenständig durchzuführen. Fragen und Probleme wurden jedoch nach wie vor vom Versuchsleiter beantwortet bzw. gelöst.

Nach einer erneuten Pause fand die Einweisung der Versuchspersonen in die Messmethoden, NASA-TLX und SAGAT, statt. Die einzelnen Punkte der Fragebögen wurden im Detail besprochen, um Verständnisprobleme im Vorfeld zu vermeiden. Den Probanden wurde vorgeführt, wie die Eintragung von Missionselementen im SAGAT-Test zu erfolgen hat und welche Hilfsmittel dafür zur Verfügung stehen.

Die letzte Trainingsmission begründete die Testmission 3. Am Anfang dieser Mission wurde erstmals ein taktisches Mission Briefing (vgl. Abschnitt 5.2.2) abgehalten. Der Proband musste diese komplexe Trainingsmission bereits eigenständig durchführen, das heißt, der Versuchsleiter beantwortete keine Fragen und löste keine Probleme während der gesamten Missionsdurchführung. Der Proband war auf sich selbst gestellt. Neben Funkkommunikation und Blickbewegungsmessung wurde am Ende der Testmission eine Messunterbrechung durchgeführt, um einen beispielhaften NASA-TLX und einen SAGAT-Test aufzunehmen. Im Anschluss an diese Testmission wurde nochmals eine kurze Pause abgehalten, in der offene Fragen oder Probleme diskutiert wurden. In der Regel waren bereits alle Fragen geklärt.

Nach dieser sehr umfangreichen Einweisungs- und Trainingsphase fand die erste Messmission statt.

Versuchstag 2: Der zweite Tag begann mit einem kurzen Trainingsprogramm. Hierbei konnten die Versuchspersonen die einzelnen im Kampfflugzeugsimulator integrierten Systeme nochmals nach Belieben testen. Diese Trainingseinheit sollte sicherstellen, dass der Proband über alle benötigten Funktionen und Subsysteme ausreichend im Bilde war. Nach Kalibrierung des Blickbewegungsmesssystems auf die Versuchsperson wurden die Messmission B bis E mit Ruhepausen durchgeführt.

Nach Beendigung der Befragung zu der letzten Messmission fand ein umfangreiches Abschlussgespräch mit dem Probanden unter Zuhilfenahme von Fragebögen statt.

Zeit [min]	Ablauf
15	Trainingsprogramm
15	Konfiguration der Blickbewegungsmessung
90	<i>Messmission B</i> inklusive Fragebögen und Befragung
15	Pause
90	<i>Messmission C</i> inklusive Fragebögen und Befragung
60	Mittagspause
90	<i>Messmission D</i> inklusive Fragebögen und Befragung
15	Pause
90	<i>Messmission E</i> inklusive Fragebögen und Befragung
60	Abschlussgespräch inklusive Fragebögen

Tabelle 15: Versuchsablauf – Tag 2

5.2.2 Mission Briefing

In einem militärischen Mission Briefing werden alle an der Mission beteiligten Personen über relevante Informationen in einer kompakten Form in Kenntnis gesetzt. Typischerweise erfolgt die Zuweisung von Zuständigkeiten. Um den Probanden in einen möglichst realitätsnahen Kontext zu versetzen, wurde zu Beginn jeder Messmission ein entsprechendes Briefing vom Versuchsleiter abgehalten, um den Probanden in bekannter Weise über notwendige Einsatzdetails zu informieren. Im Speziellen wurde der Proband über den anstehenden Auftrag, die vorherrschenden Wetterbedingungen im Operationsgebiet, bekannte Bedrohungen im Feindgebiet sowie die gültigen Einsatzregeln informiert. Der Aufbau des Briefings orientierte sich an die im Rahmen der Experimentalkampagne von der Bundeswehr zur Verfügung gestellten, nicht öffentlich zugänglichen Dokumente.

5.2.3 Exemplarischer Ablauf einer Messmission

Zu Beginn jeder Mission befanden sich die unbemannten Kampfflugzeuge höhengestaffelt in einem ausgewiesenen Verfügungsraum und warteten auf weitere Anweisungen (siehe Abbildung 86). Das bemannte Kampfflugzeug war auf der Startbahn des entsprechenden Stützpunktes mit einer positiv abgeschlossenen Vorflugkontrolle und mit laufenden Triebwerken positioniert. Das Kampfflugzeug war somit von Beginn an vollständig einsatzbereit und die jeweiligen an Bord integrierten Subsysteme waren entsprechend vorkonfiguriert. Sobald der Proband im Kampfflugzeugsimulator Platz nahm, startete die Mission. Dazu wurde dieser von einer übergeordneten Kommandostelle über eine MIDS-Meldung über den Auftrag, den Startzeitpunkt der Mission und die aktuelle bekannte Feindlage unterrichtet. Die verfügbaren Informationen wurden automatisch von den simulierten Kampfflugzeugsystemen übernommen und über Displays dem Piloten visuell dargestellt. Nach Bestätigung des erfolgreichen Empfanges des Auftrages oblag es dem Probanden, sein Team zu formieren. Dies geschah, indem dieser das TKM, stellvertretend für das unbemannte Team, über den anstehenden Auftrag informierte. Sobald dieser Prozess abgeschlossen war, begann das TKM koordinative Informationen mit dem

Probanden sowie dem unbemannten Team auszutauschen. Die eigentliche Missionsausführung startete erst, nachdem der Proband das TKM über die Missionsfreigabe informiert hatte. Diese Freigabe musste zu einem von der übergeordneten Kommandostelle bekanntgegebenen Missionsstartzeitpunkt gemäß der MIDS-Meldung erfolgen. Unmittelbar nach der Freigabe verließen die UCAVs das CAP und nahmen Kurs auf den Korridor. Nach Überquerung des Korridors begannen die unbemannten Systeme die feindlichen Flugabwehrstellungen eigenständig zu unterdrücken. Parallel dazu bereitete sich der Proband auf den Start vor.

Der Startzeitpunkt des bemannten Kampfflugzeugs musste mit den unbemannten Kräften koordiniert werden. Das bedeutete, dass das TKM ständig den Missionsfortschritt und den vorausprognostizierten Missionsverlauf mit dem des unbemannten Teams abglich, um den optimalen Startzeitpunkt für den Probanden zu ermitteln. Nach Einholung der Startfreigabe bei der Flugverkehrskontrolle über Sprechfunk konnte der Proband starten. Während des Startvorganges war dieser vorwiegend mit der Startprozedur, wie der Bedienung von Subsystemen, Überwachung von Systemparametern sowie Kommunikation mit der Flugverkehrskontrolle, beschäftigt. Kurz bevor der Proband den Korridor erreichte, wurde dieser von der Flugverkehrskontrolle an *Magic*, der Einsatzleitstelle, übergeben. Über *Magic* erhielt der Proband die Freigabe auf Missionsflughöhe zu steigen und die FLOT über einen zugewiesenen Korridor zu überqueren.

Im feindlichen Gebiet musste der Proband das Vordringen zur Abwurfposition mit seinem unbemannten Subteam koordinieren, um auf unerwartete Verzögerungen unverzüglich reagieren zu können. Parallel zum Vordringen unternahm ein UCAV die Aufgabe der Zielaufklärung. Das Ergebnis der Aufklärung wurde in Form von Aufklärungsbildern an den Teamführer weitergeleitet und in dessen Cockpit zur Anzeige gebracht. Sobald diese Bilder vorlagen, konnte der Proband das Ziel verifizieren und das Ergebnis seinem Team über das TKM sowie der Einsatzleitstelle über Sprechfunk mitteilen. Im Falle einer positiven Verifizierung wurde das Vordringen zum Abwurfbereich fortgesetzt. Im anderen Fall wurde der Proband von *Magic* angewiesen, die Mission vorzeitig abzubrechen und mit dem unbemannten Subteam unverzüglich zum Stützpunkt zurückzukehren. Ausgehend von einer positiven Zielverifizierung bereitete ein unbemanntes Teammitglied die Zielbeleuchtung vor. Jene unbemannten Teammitglieder, die keine missionsbezogene Teilaufgaben mehr abzarbeiten hatten, übernahmen den Begleitschutz für das bemannte Kampfflugzeug.

Sobald der Proband den Nahbereich der Abwurfposition der LGB erreicht hatte, musste dieser das Waffensystem aktivieren und den Angriff koordiniert mit dem unbemannten Beleuchter durchführen. Kurz bevor, spätestens jedoch bevor die Mindestbeleuchtungszeit der LGB unterschritten wurde, musste der Proband den Beleuchter zur Aufschaltung der Zielmarkierung unterrichten. Unmittelbar nach dem Einschlag der LGB übernahm ein unbemanntes Teammitglied die BDA-Rolle. Die Ergebnisse wurden in Form von Bildmaterial dem Probanden in seinem Cockpit zur weiteren Begutachtung zur Anzeige gebracht. Der Proband war hier ebenfalls verantwortlich zu entscheiden, ob das Ziel erfolgreich bekämpft wurde oder nicht. Dieses Ergebnis musste der Proband wiederum den restlichen Teammitgliedern über das TKM sowie der Einsatzleitstelle über Sprechfunk mitteilen. Im Falle einer erfolgreichen Bekämpfung kehrte das Team auf direktem Weg zurück zum Stützpunkt.

Je nach Messmission war entlang der Rückflugroute eine unbekannte Bedrohung positioniert (siehe Abbildung 79). Diese wurde erst nach Einflug des bemannten Kampfflugzeuges in die Wirkreichweite aktiv. Danach war es die Aufgabe der unbemannten

Teammitglieder eigenständig sowie unverzüglich auf die Bedrohung zu reagieren, um die bemannte Komponente vor einem potentiellen Abschuss zu schützen. Im Falle eines anfliegenden feindlichen Lenkflugkörpers konnte der Proband nur durch Einsatz von Gegenmaßnahmen und Luftmanöver der sich schnell annähernden Boden-Luft-Rakete entkommen. Bevor der Korridor zum Überqueren der FLOT genutzt werden konnte, musste der Proband für das gesamte Team eine Freigabe zum Einflug in den Korridor bei der Einsatzleitstelle einholen.

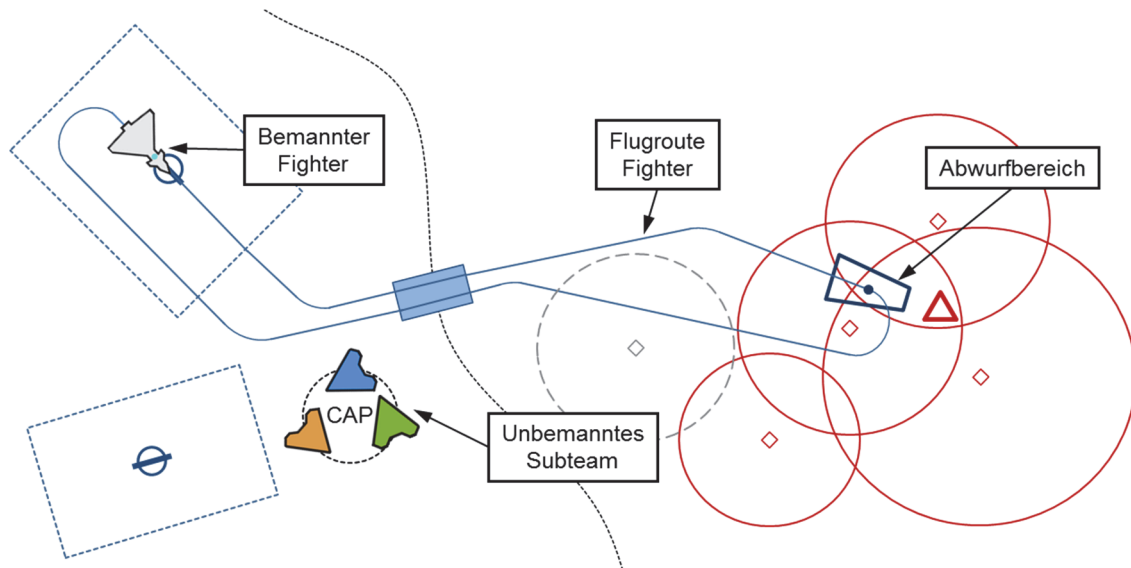


Abbildung 86: Ausgangssituation einer exemplarischen Messmission

Der letzte Missionsabschnitt begann mit der Überquerung der FLOT. Hier hatte der Proband als Teamführer sein Team aufzulösen, indem dieser die UCAVs an die entsprechenden Stützpunkte entließ. Nach dem Einholen der Landeerlaubnis bei der Flugverkehrskontrolle des Stützpunktes konnte der Proband die Luft-Boden-Angriffsmission mit der Landung beenden.

5.2.4 Debriefing

Unmittelbar im Anschluss nach jeder absolvierten Messmission fand das Debriefing statt. Der erste Teil des Debriefings hatte die subjektive Bewertung der soeben ausgeführten Mission in der entsprechenden Versuchskonfiguration durch den Probanden zum Inhalt. Dazu wurden dem Piloten Fragebögen zur Evaluierung der entwickelten Systeme in Abhängigkeit von der Versuchskonfiguration und zur Erfassung des subjektiven Situationsbewusstseins (SART) vorgelegt.

Der zweite Teil beinhaltet eine strukturierte Befragung über die soeben durchgeführte Mission. Im Rahmen dieser Befragung wurde speziell auf die vom Versuchsleiter erfassten Auffälligkeiten eingegangen, um die Beweggründe dazu qualitativ festzuhalten. Ebenfalls wurde der Proband vom Versuchsleiter zu seinen subjektiven Erfahrungen im Hinblick auf Stärken, Defizite und Verbesserungsvorschläge des zugrunde liegenden Systems strukturiert befragt.

5.2.5 Versuchspersonen

Für die experimentelle Messwerterfassung standen sechs Versuchspersonen im Alter von 26 bis 42 Jahren zur Verfügung. Jeder dieser Versuchspersonen war ein ausgebildeter Flugzeugführer der Luftwaffe der Bundeswehr und hatte mindestens die Grundschulung in taktischer Kampffliegerei (*Introduction to Fighter Fundamentals, IFF*) erfolgreich abgeschlossen. Eine Übersicht über die genaue Ausbildung der einzelnen Versuchspersonen bezogen auf die Missionsarten mit bemannten Luftfahrzeugen kann der Tabelle 16 entnommen werden. Neben der fliegerischen Ausbildung für bemannte Luftfahrzeuge wies jeder Proband zusätzlich eine Qualifikation als UAV-Operateur auf. Die Versuchspersonen verfügten somit über das notwendige militärische sowie taktische Vorwissen, um die zur Evaluierung entwickelten Einsatzmissionen (siehe Abschnitt 5.1.4) durchführen zu können.

	VP 1	VP 2	VP 3	VP 4	VP 5	VP 6
Alter	26	37	33	28	42	29
Missionsarten	(IFF)	RECCE	RECCE IDS	RECCE	RECCE IDS	(IFF)

Tabelle 16: Angaben zu Alter und ausgebildeten Missionsarten

Die Flugerfahrung der einzelnen Probanden mit bemannten Flugzeugen war sehr unterschiedlich. Diese reichte von 315 bis 2006 Stunden als verantwortlicher Flugzeugführer. Die Erfahrung mit unbemannten Systemen war innerhalb der Versuchspersonen recht unterschiedlich, diese reichten von 10 bis 600 Flugstunden als verantwortlicher UAV-Operateur. Die genauen Flugerfahrungen pro Versuchsperson, Flugzeugart und Flugzeugmuster kann der Tabelle 17 entnommen werden.

Flugzeugart und Muster		VP 1	VP 2	VP 3	VP 4	VP 5	VP 6
Bemannte Systeme	<i>Beechcraft T-6</i>	120	-	-	-	-	140
	<i>Beechcraft Bonanza</i>	-	50	-	-	-	-
	<i>Cessna Citation</i>	30	40	40	40	-	20
	<i>Cessna T-37</i>	-	150	120	130	130	-
	<i>Dornier/Dassault Alpha Jet</i>	-	-	-	-	56	-
	<i>Grob G120</i>	45	-	40	35	-	40
	<i>Northrop T-38</i>	120	150	120	130	120	140
	<i>Panavia Tornado</i>	-	1000	600	250	1700	-
Unbemannte Systeme	<i>IAI Heron</i>	40	-	600	-	60	40
	<i>Northrop Grumman Global Hawk</i>	-	10	-	10	-	-
Flugerfahrung Gesamt [h]		355	1400	1520	595	2066	380

Tabelle 17: Flugerfahrung in Stunden, unterteilt in Flugzeugart und Muster

5.3 Experimentelle Ergebnisse

In diesem Abschnitt erfolgt die Darlegung der im Rahmen der durchgeführten Experimentalkampagne erfassten und für diese Arbeit relevanten Ergebnisse. Zu Beginn werden im Abschnitt 5.3.1 die erhobenen Leistungsmaße aufgezeigt. Der nachfolgende Abschnitt 5.3.2 widmet sich primär den erhobenen Verhaltensmaßen. Die Auswertungen der subjektiven Einschätzungen der Versuchspersonen ist Inhalt des Abschnittes 5.3.3. Die Ergebnisse zu den durchgeführten Untersuchungen hinsichtlich des Situationsbewusstseins der Probanden sind im Abschnitt 5.3.4 aufgelistet.

5.3.1 Leistungsmaße

Im Nachfolgenden werden die erhobenen Leistungsmaße zur Bewertung der Mission, der unbemannten Teammitglieder und des Teamkoordinationsmoduls dargelegt.

5.3.1.1 Missionsparameter

Als oberstes Leistungskriterium zur Beurteilung des Gesamtsystemkonzeptes wurde der Missionserfolg festgehalten. Ein Missionserfolg war grundsätzlich dann gegeben, wenn die Messmission entsprechend dem Auftrag positiv beendet werden konnte. Die Messmissionen A bis D beinhalteten als Missionserfolg die erfolgreiche Bekämpfung des Zielobjektes und die Messmission E die korrekte Identifizierung eines „Falschziels“.

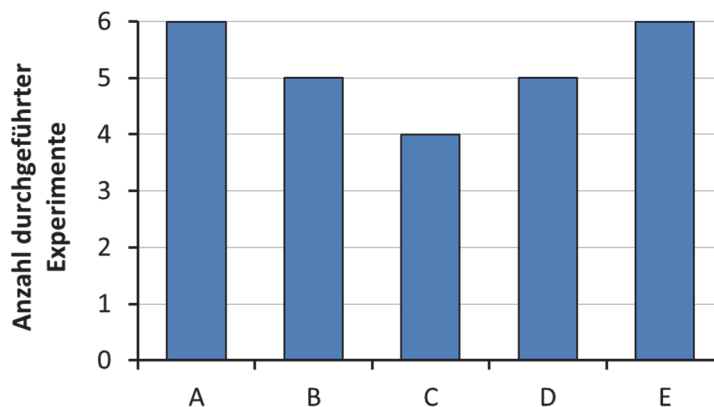


Abbildung 87: Erzielte Missionserfolge in den jeweiligen Messmissionen

Abbildung 87 zeigt eine Übersicht der erlangten Missionserfolge bezogen auf die jeweiligen Messmissionen. In den Messmissionen A und E wurde das Missionsziel von allen Versuchspersonen erfüllt. Hingegen konnten in den Messmissionen B und D jeweils ein Experiment und in Messmission C zwei Experimente nicht positiv zum Abschluss gebracht werden.

Die Ursache der Nichterfüllung der Missionen lag grundsätzlich in einer fehlenden Zielbeleuchtung des Targets, verursacht durch einen softwarebedingten Absturz der zugehörigen OCU. Dadurch war es den Probanden nicht mehr möglich, eine darauf aufbauende Bekämpfung des Zielobjektes vorzunehmen. Abgesehen von diesen Problemen waren die Probanden in der Lage, mit dem entwickelten System unabhängig von den Versuchskonfigurationen das Arbeitsziel in jedem Experiment erfolgreich zu erfüllen. Für die weiteren Datenauswertungen wurden nur Werte aus den erfolgreich abgeschlossenen

bzw. aus den nicht erfolgreich abgeschlossenen Messmissionen, bis zu dem Zeitpunkt als die Mission aufgrund des technischen Problems abgebrochen werden musste, herangezogen.

Während der Experimentalkampagne wurden auf Seite der bemannten sowie unbemannten Kräfte keine Verluste durch feindliche Einwirkungen verzeichnet. Das bemannte Kampfflugzeug befand sich in den Messmissionen im Durchschnitt ca. 8,3 Minuten in der Wirkreichweite von feindlichen Flugabwehrstellungen. Dabei waren diese in 11 Prozent der Zeit aktiv. Betrachtet man ausschließlich die Missionen ohne Pop-Up Bedrohungen (B und D), dann verweilte kein einziger Proband während der Missionsausführungen in einer aktiven Bedrohung. Auswirkungen auf die Verweilzeiten in aktiven Bedrohungen des bemannten Kampfflugzeuges in Abhängigkeit der Versuchskonfigurationen konnten nicht festgestellt werden. Im Vergleich dazu befand sich das unbemannte Team durchschnittlich in jeder Mission ca. 58 Minuten in der Wirkreichweite von Flugabwehrstellungen. Die Aktivität dieser war in 22,4 Prozent der Zeit gegeben.

5.3.1.2 Unbemannte Teammitglieder

In der experimentellen Untersuchung wurden auch Leistungsmaße zur Quantifizierung der von den unbemannten Teammitgliedern durchgeführten Aktivitäten (Aufklärung, Bekämpfung von Flugabwehrstellungen, Begleitschutz und Zielmarkierung) festgehalten. Grundsätzlich waren die unbemannten Teammitglieder in der Lage, jede zugewiesene Aufgabe eigenständig und zielgerichtet zu erfüllen. Im Folgenden werden diese detaillierter behandelt.

Die Zielaufklärung durch ein unbemanntes Teammitglied wurde mindestens eine Minute, im Durchschnitt jedoch 4,2 Minuten, vor dem eigentlichen Abwurf der LGB (Mission A bis D) bzw. geplanten Abwurf (Mission E) abgeschlossen. Das Bildmaterial stand ab diesem Zeitpunkt den Versuchspersonen zur abschließenden Zielverifizierung zur Verfügung. Ebenso erfolgte der Abschluss der Wirkungsaufnahme spätestens 23 Sekunden (Durchschnittlich 8,4 Sekunden) nach Einschlag der lasergelenkten Waffe.

Die vorab durch die übergeordnete Kommandostelle bekannt gegebenen Flugabwehrstellungen entlang der Flugroute des bemannten Kampfflugzeuges wurden vom unbemannten Team zur Gänze (100%) in den durchgeführten Experimenten unterdrückt (ohne Berücksichtigung von Experimenten mit implementationsbedingten, also nicht konzeptbedingten Problemen). Hingegen fand oftmals keine Unterdrückung von unbekanntem Flugabwehrstellungen (Pop-Up Threats) durch unbemannte Teammitglieder im Rahmen der Ausübung des Begleitschutzes statt. Hierbei lag die Bekämpfungsrate bei 27,7%. Die Ursachen für diesen niedrigen Wert konnte in den Handlungsweisen der Probanden gefunden werden. Diese führten meist unmittelbar nach Sensieren einer neuen Bedrohung durch den RWR ein Flugmanöver aus, um den Gefahrenbereich unverzüglich zu verlassen. Da dadurch keine potentielle Gefahr für das bemannte Kampfflugzeug bestand, entschlossen sich die unbemannten Teammitglieder, aufgrund des dort implementierten Verhaltenswissens, ebenfalls den Wirkbereich ohne Bekämpfung zu verlassen.

In Abbildung 88 ist das soeben Beschriebene bezogen auf die verschiedenen Messmission dargestellt. Durchschnittlich wurden 87,6% aller Flugabwehrstellungen in den durchgeführten Experimenten unterdrückt. Dabei wurde für die Unterdrückung einer Flugabwehrstellung im Mittel 1.05 HARMs benötigt.

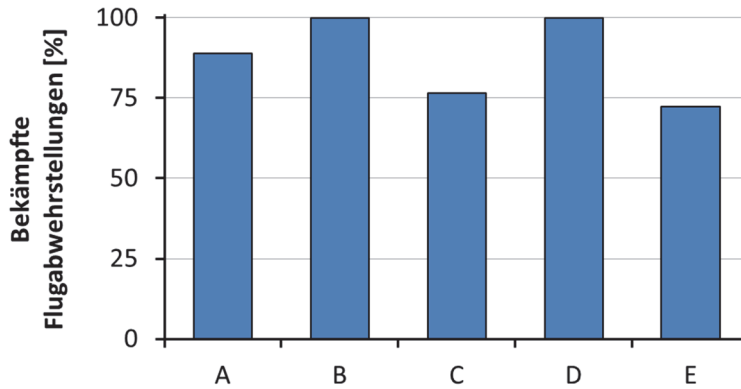


Abbildung 88: Durchschnittliche Bekämpfungsrates der feindlichen Flugabwehrstellungen durch die unbemannten Teammitglieder bezogen auf die Messmissionen

Die Zielbeleuchtung wurde in allen Messmissionen (A bis D), abgesehen von den vorher erwähnten aufgetretenen Simulationsproblemen, durch ein unbemanntes Teammitglied erfolgreich im Einklang mit dem bemannten Kampfflugzeug ausgeführt. Die Lasermarkierung des Zielobjektes war vom Aufschaltzeitpunkt bis zum Einschlag der LGB kontinuierlich (100%) gegeben.

5.3.1.3 Abweichungen

Die Abweichungen zwischen der Ist-Position des bemannten Kampfflugzeuges und der optimalen koordinativen Soll-Position (vgl. Abschnitt 3.3.4) wurden während der Missionsdurchführungen festgehalten. Die Betrachtung der Abweichungen erfolgte dabei ausschließlich vom Start des bemannten Kampfflugzeuges bis hin zum Abwurf der Waffe bzw. bis zum Erreichen der Angriffsposition (Mission E), da im Rückflug grundsätzlich keine koordinativen Aufgaben zu bewältigen waren. Die optimale koordinative Soll-Position wurde auf der MAS durch das Schattenfliegersymbol visualisiert. Anzumerken ist hierbei, dass diese Soll-Position kontinuierlich an den tatsächlichen Missionsverlauf durch das TKM adaptiert wurde.

Die Piloten wurden im Rahmen der Briefings instruiert, sich bestmöglich in den Koordinationsverlauf einzugliedern, was eine Einhaltung der koordinativen Soll-Position beinhaltet. In Abbildung 89 sind die mittleren zeitlichen Abweichungen über die verschiedenen Missionsphasen (siehe Anhang) einer Messmission in Form eines Box-Plot Diagramms (siehe z.B. [Sedlmeier & Renkewitz, 2013]) aufgeführt.

Die mittlere zeitliche Abweichung zwischen der Ist- und Soll-Position lag in den Messmissionen A, B und E im Durchschnitt bei 11,6 Sekunden. In der Messmission D (keine SEK und räumliche Koordinationsinformationen) lag die Abweichung im Mittel bei 27,8 Sekunden. Die höchste Abweichung konnte in der Messmission C (keine zeitlichen Koordinationsinformationen) mit einer durchschnittlichen Abweichung von 134,7 Sekunden festgehalten werden. Die Anwendung eines Signifikanztest (Signifikanzniveau $\alpha = 0.05$) hat gezeigt, dass bezogen auf die Vergleichskonfiguration A zu B ($t(10) = 1,263$; $p_t = 0,235$) sowie D ($t(10) = 1,003$; $p_t = 0,169$) keine signifikanten Änderungen vorliegen. Die zeitlichen Abweichungen sind in C ($t(10) = 2,331$; $p_t = 0,041$) und E ($t(10) = 2,312$; $p_t = 0,043$) im Vergleich zu A signifikant unterschiedlich. Der signifikante Unterschied zwischen den Messmissionen A zu E (selbe VK) lässt sich auf die unterschiedliche Aufgabenstellung zurückführen.

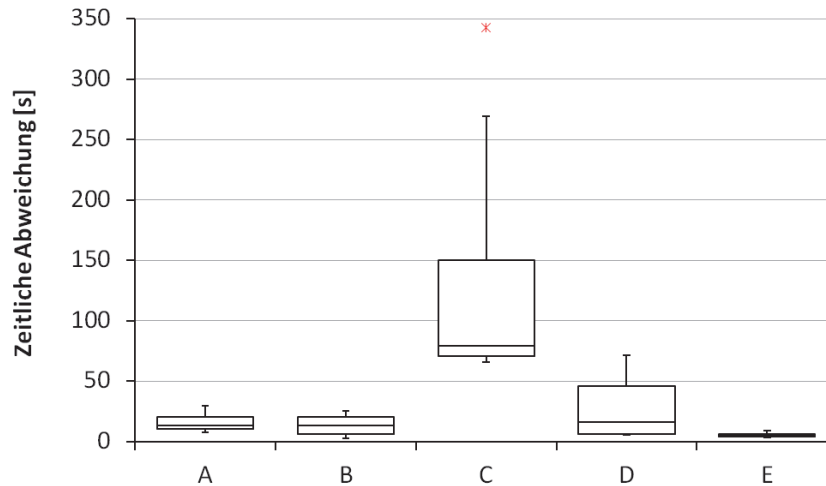


Abbildung 89: Zeitliche Abweichung von der optimal koordinativen Soll-Position [Gangl et al., 2013a]

5.3.1.4 Assistenzsystemmeldungen

Das TKM konnte über Assistenzsystemmeldungen in allen Missionen (A-E) den Probanden in der Rolle *alerting assistance* über Missstände in Kenntnis setzen. Ausschließlich in der Messmission C wurde der Proband nicht über Missionsverzögerungen informiert, da in dieser Versuchskonfiguration keine zeitlichen Koordinationsinformationen zur Verfügung standen. In Tabelle 18 sind die Assistenzsystemmeldungen bezogen auf die durchgeführten Versuche aufgelistet. Im Durchschnitt wurden 4 Meldungen pro Messmission auf der MAS zur Anzeige gebracht. Davon fielen 69,7% Prozent der Meldungen in die Kategorie Missionsverzögerung. Eine Missionsverzögerung trat immer dann auf, wenn die Ausführung einer Aktivität durch ein unbemanntes Teammitglied deutlich länger andauerte als initial von diesem prognostiziert. Oftmals war die Ursache dafür die außerplanmäßige Durchführung eines Selbstschutzmanövers, um einer feindlichen Luft-Boden-Rakete auszuweichen. In der Messmission E fielen kaum Missionsverzögerungen an, da im Vergleich zu den restlichen Missionen weniger Flugabwehrstellungen im Szenario anzutreffen waren und darüber hinaus keine Zielbekämpfung stattgefunden hat (frühzeitiger Missionsabbruch!).

Assistenzsystemmeldungen	A	B	C	D	E
Missionsziel bekannt geben	0	1	1	1	0
Eigene Aktivitäten benennen	0	1	0	0	0
Routeninformation bekannt geben	0	2	2	1	0
Ziel verifizieren	3	3	2	3	2
Bekämpfungserfolg benennen (BDA)	1	2	1	1	0
Laser Verfügbar/Anschalten	0	4	1	4	0
Missionsverzögerung berücksichtigen	25	28	-	27	3
Gesamt	29	41	7	37	5

Tabelle 18: Erfasste Assistenzsystemmeldungen in der Experimentalkampagne

5.3.2 Verhaltensmaße

Im Rahmen der durchgeführten Experimente wurden verschiedene Maße zur Erfassung des Pilotenverhaltens aufgezeichnet. Im Nachfolgenden werden diese dargelegt.

5.3.2.1 Qualität der aufgezeichneten Blickdaten zur Aufmerksamkeitsbestimmung

Die Aufmerksamkeitsverteilung der Versuchspersonen über den Missionsverlauf wurde mit Hilfe der Blickbewegungsmessung erfasst. Das eingesetzte Messsystem faceLAB (siehe Abschnitt 5.1.6) liefert neben den Nutzdaten eine Kennzahl zu jedem diskret gemessenen Wert, die einen Rückschluss auf die Blickqualität zulässt. Ein Wert von null kennzeichnet dabei eine ungültige Messung. Die Ursachen dafür können recht vielfältig sein. Beispielsweise kann der Lidschluss der Augen oder eine ungünstige Kopfposition (z.B. Augenmerkmale können aufgrund eines zu stark gedrehten Kopfes in Bezug auf die Sensoren nicht mehr erfasst werden) zu ungültigen Resultaten führen. Eine Kennzahl von eins zeigt die Erfassung des Kopfes über die vorher definierten Gesichtsmerkmale an. In diesem Fall wird der Schnittpunkt des ermittelten Kopfvektors mit dem vorgegebenen Umweltmodell vom System als Blickkoordinaten interpretiert. Ein Wert von zwei beinhaltet zusätzlich die messtechnische Erfassung der Pupillen. Hierbei nutzt das System die tatsächliche Blickrichtung des Probanden, um auf das Betrachtete zu schließen. Liegt eine Kennzahl von drei vor, konnten zusätzlich zu den Pupillen und dem Kopfvektor auch Reflexionen im Auge des Probanden erfasst werden, was zu einer Verbesserung der Messgenauigkeit beiträgt.

Für die Auswertungen wurden ausschließlich Daten mit einer Kennzahl von mindestens zwei verwendet. Bezogen auf die aufgezeichneten Messdaten konnten somit im arithmetischen Mittel 72,6% des Blickverhaltens aller Probanden (Standardabweichung $\sigma = 10,6\%$, $\min = 49,1\%$, $\max = 89,4\%$) in den Missionsausführungen erfasst werden. Die Menge an nutzbaren Daten war in den durchgeführten Blickbewegungsmessungen maßgeblich von den Merkmalen (z.B. Gesichtszüge) der jeweiligen Versuchsperson abhängig, wie aus der Abbildung 90 hervorgeht. Im Nachfolgenden werden zur weiteren Auswertung der Blickbewegungsdaten ausschließlich in den Datensätzen enthaltene Fixationen herangezogen.

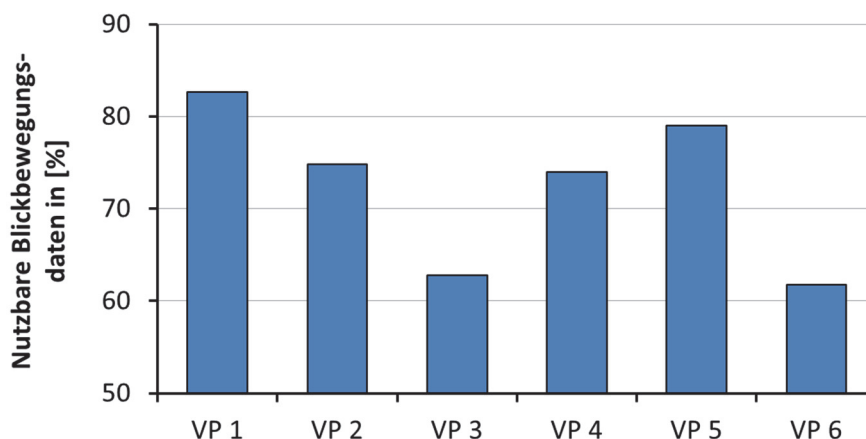


Abbildung 90: Messtechnisch erfasste Blickdaten bezogen auf die Versuchspersonen

5.3.2.2 Head-Down und Head-Up Betrachtung

Als *Head-Down* Zeit wird im Umfeld der Flugführung eine Zeitdauer bezeichnet, in der die Aufmerksamkeit eines Piloten auf im Cockpit angeordnete Systeme, wie Displays oder Bedienelemente, gerichtet ist. Im Gegenstück dazu gibt die *Head-Up* Zeit Auskunft über die Zeitdauer in der ein Pilot seine Aufmerksamkeit außerhalb des Cockpits fokussiert hat.

In Abbildung 91 sind die durchschnittlichen Head-Up und Head-Down Zeiten in Abhängigkeit der Missionsphase (Hin- und Rückflug) der Probanden über alle Messmissionen gegenüber gestellt. Unterschiede hinsichtlich Versuchskonfiguration konnten nicht ermittelt werden. Im Hinflug, nach durchgeführtem Startvorgang bis zum Abwurf der LGB bzw. Missionsabbruch, war die Aufmerksamkeit des Piloten im Durchschnitt 88,24% ($\sigma = 5,34\%$, Spannweite $R = 17,66\%$) auf die Cockpitdisplays (MHDD 1 bis 3 und HUP) gerichtet. 11,76% Prozent der Blicke wurden außerhalb (Außensicht 1 bis 3 inklusive HUD) erfasst. Im Rückflug, vom Abwurf der LGB bis zum Übertritt in das eigene Gebiet, überwiegte die Head-Down Zeit mit 78,57% ($\sigma = 12,07\%$, $R = 45,51\%$).

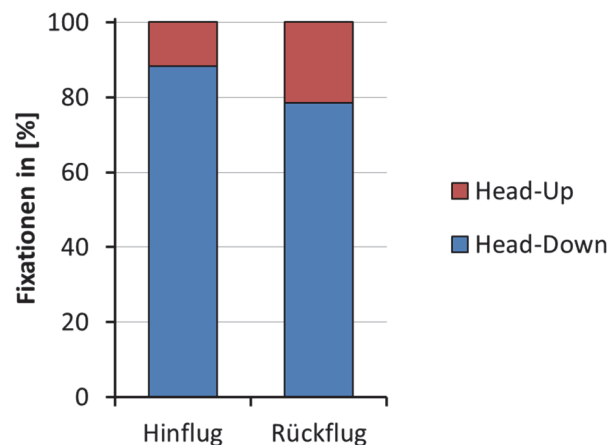


Abbildung 91: Gegenüberstellung der Head-Up zur Head-Down Zeit im Hin- und Rückflug

Zwischen den Head-Up bzw. Head-Down Zeiten in Bezug auf die Flugphasen Hin- und Rückflug liegen signifikante Unterschiede ($t(58) = 3,706$; $p_t = 0,0005$; $\alpha = 0.05$) vor. Im Mittel liegt diese Aufmerksamkeitsverschiebung zwischen den beiden Flugphasen bei 9,67%. Im Nachfolgenden wird die Verteilung der Fixationen über den Missionsverlauf für die Flugphasen Hin- und Rückflug im Cockpit detaillierter analysiert.

5.3.2.3 Aufmerksamkeitsverteilung im Cockpit

In Abbildung 92 ist die durchschnittliche Aufmerksamkeitsverteilung im Cockpit der Versuchspersonen für den Hinflug zum Zielobjekt dargestellt. Im Durchschnitt fallen 92,21% ($\sigma = 3,86\%$) der Aufmerksamkeit der Versuchspersonen über alle Messmissionen auf die drei MHDD-Seiten Map, Team-Page sowie Timeline-Page. Die verbleibenden 7,79% verteilen sich auf die restlichen MHDD-Seiten (z.B. Fuel-, Engine-, Weapon-Page) sowie HUP. Aufgrund dieser untergeordneten Rollen, werden diese Pages nicht weiter betrachtet.

Wie aus Abbildung 92 ersichtlich, ist in Abhängigkeit der Versuchskonfiguration die Aufmerksamkeit zwischen den drei zuvor genannten MHDD-Seiten unterschiedlich verteilt. Dem Kartendisplay kommt mit einem durchschnittlichen Anteil von 64,9% ($\min = 53,7\%$, $\max = 77,7\%$) über alle Versuchskonfigurationen die größte Bedeutung zu.

Der durchschnittliche Anteil der von den Probanden aufbrachten Aufmerksamkeit für die Timeline-Page liegt bei 19,5% (ohne Konfiguration C) und für die Team-Page bei 11,7%.

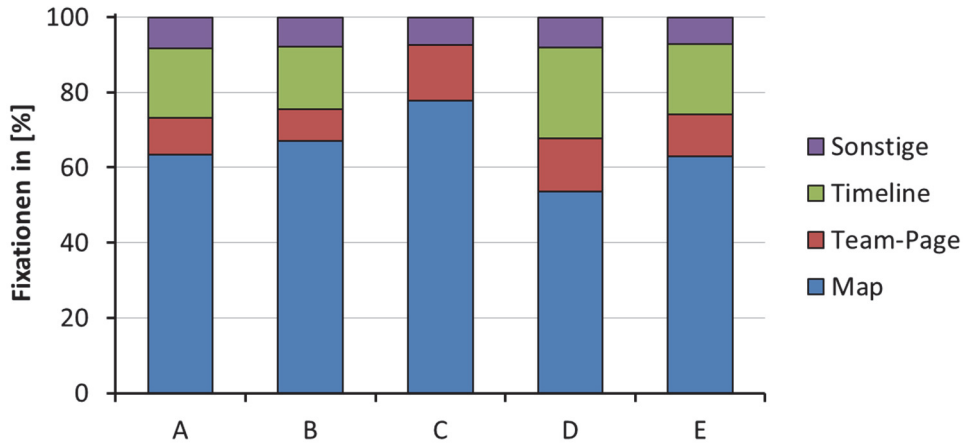


Abbildung 92: Durchschnittliche Aufmerksamkeitsverteilung im Cockpit während des Hinflugs

Betrachtet man die Aufmerksamkeitsverteilung im Hinblick auf die verschiedenen Versuchskonfigurationen genauer, so lassen sich durch Signifikanzbetrachtungen ($\alpha = 0.05$) keine nennenswerten Unterschiede zwischen der Vergleichskonfiguration A zu den Konfigurationen B und E feststellen. Hingegen zeigt das Fehlen von temporären Koordinationsinformationen in Konfiguration C ($t(10) = 3,678$; $p_t = 0,0042$) und räumlichen in Konfiguration D ($t(10) = 2,887$; $p_t = 0,016$) signifikante Unterschiede im Anteil der zugewendeten Aufmerksamkeit auf das Kartendisplay im Vergleich zu A. In Konfiguration C nimmt die durchschnittliche Nutzung des Kartendisplays zu, während diese in D abnimmt. Signifikante Aufmerksamkeitsänderungen hinsichtlich der Timeline-Page (bei Verfügbarkeit) und Team-Page konnten nicht festgestellt werden.

In Abbildung 93 ist die durchschnittliche Aufmerksamkeitsverteilung der Probanden im Cockpit bezogen auf den Rückflug veranschaulicht. Hier liegt der Fokus der Versuchspersonen primär auf dem Kartendisplay. Durchschnittlich 70,9% der Aufmerksamkeit (min = 63,97%, max = 77,16%) über die verschiedenen Versuchskonfigurationen kommen diesem zu. Den verbleibenden Anteil teilen sich Größtenteils die Timeline-Page (Durchschnitt 8,91% – ohne VK 3) und die Team-Page (Durchschnitt 10,58%) untereinander auf.

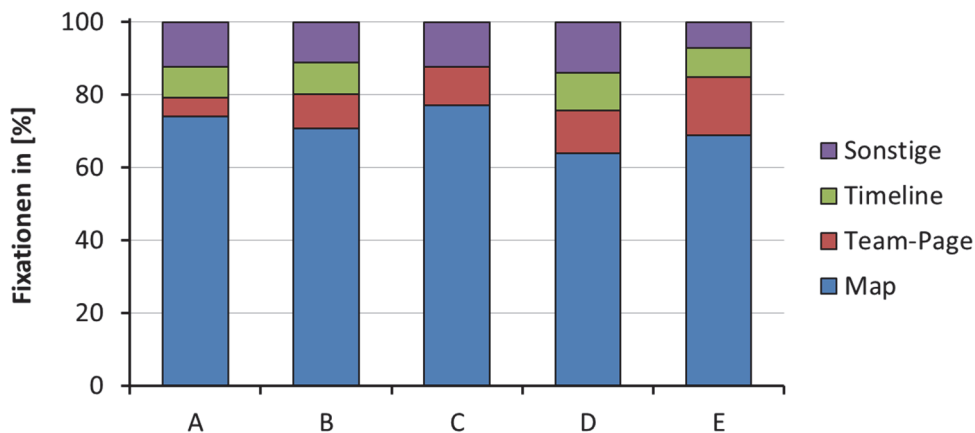


Abbildung 93: Durchschnittliche Aufmerksamkeitsverteilung im Cockpit während des Rückfluges

Die Aufmerksamkeit der Probanden war gemäß den festgehaltenen Daten im Cockpit vorwiegend auf das Kartendisplay fokussiert. Ebenso nahmen die Timeline-Page sowie die Team-Page eine bedeutende Rolle ein. Im Rückflug war der prozentuale Anteil an zugewandter Aufmerksamkeit auf das Kartendisplay im Vergleich zum Hinflug höher. Der Anteil hinsichtlich Timeline-Page und Team-Page nahm hingegen ab, war jedoch trotzdem noch nennenswert gegeben, obwohl grundsätzlich keine koordinativen Aufgaben mehr zu bewältigen waren.

5.3.2.4 Flugführung und Missionsmanagement

Die Aufmerksamkeitsverteilung wurde auch hinsichtlich der Kategorien Flugführung und Missionsmanagement betrachtet, um einen Anhaltspunkt für die benötigten mentalen Ressourcen für die teambasierte UCAV-Führung in Verbindung mit der Missionsausführung zu erhalten. Dabei wurden die erfassten Fixationen in den Außensichten der Flugführung zugesprochen, ebenso die unter den Begriff „Sonstige“ (z.B. Engine-Page) zusammengefassten Displayformate. Die Timeline-Page und Team-Page wurden hingegen dem Missionsmanagement zugeordnet. Ein Sonderfall in der Auswertung nahm das Kartendisplay aufgrund des hohen Integrationsgrades in die MAS ein. Am Kartendisplay werden Informationen zu beiden Kategorien angeboten. Die Analyse der Zuordnung der Anteile an Aufmerksamkeit am Kartendisplay bezüglich der beiden Kategorien wurde anhand der Betrachtung des aufgezeichneten Bildmaterials zusammen mit den Blickbewegungsdaten sowie der manuellen Eingaben vorgenommen.

In Abbildung 94 ist die durchschnittliche Aufmerksamkeitsverteilung hinsichtlich Flugführung und Missionsmanagement für die Missionsphasen Hinflug sowie Rückflug dargestellt. Der Anteil an durchschnittlich zugewandeter Aufmerksamkeit für das Missionsmanagement über alle Experimente während des Hinflug zum Ziel betrug 59,4% ($\sigma = 5,5\%$). Im Rückflug war dieser Anteil mit 41,5% ($\sigma = 8,8\%$) geringer.

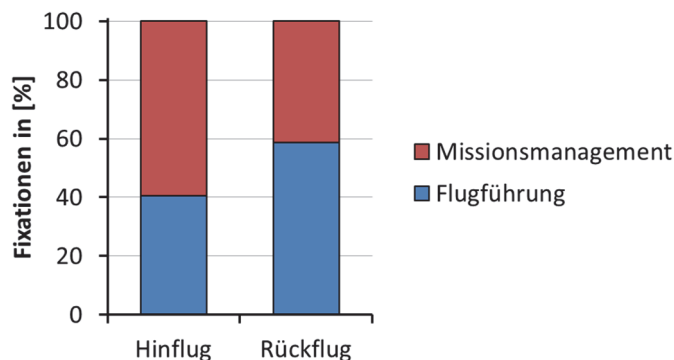


Abbildung 94: Durchschnittliche Aufmerksamkeitsverteilung über alle Experimente hinsichtlich Flugführung und Missionsmanagement

Auffällig in den in Abbildung 94 dargestellten Daten ist der relativ hohe Anteil an Missionsmanagement im Rückflug. In dieser Phase fielen in den jeweiligen Messmissionen grundsätzlich keine Tätigkeiten, wie die Koordinierung von Aktivitäten mit dem unbemannten Team, an. Während der Missionsausführungen konnte oftmals in längeren Streckenflugphasen, sowohl im Hinflug als auch Rückflug, eine einkehrende Langeweile bzw. Unterforderung bei den Versuchspersonen beobachtet werden. Die Probanden begannen mit dem entwickelten und für sie neuartigen UCAV-Führungssystem „herumzuspielen“. Dieser beobachtete Sachverhalt lässt sich in den aufgezeichneten Blickdaten

wieder finden und liefert eine Erklärung für den hohen Anteil an Aufmerksamkeitszuwendung zum Missionsmanagement. Da dieser Effekt sowohl in den Daten für den Rück- als auch Hinflug enthalten ist, kann keine qualitative Aussage zum tatsächlichen Ressourcenbedarf für die Multi-UCAV Führung hinsichtlich der verschiedenen Versuchskonfigurationen getätigt werden. Jedoch können aus den erhobenen Daten und den Beobachtungen auf genügend freie Ressourcen zur Flugführung und zum Missionsmanagement bei den Versuchspersonen in den jeweiligen Missionsausführungen rückgeschlossen werden.

5.3.2.5 Heat Map ausgewählter MHDD-Pages und Außensicht

Die Visualisierung der Aufmerksamkeitsverteilung kann mit Hilfe von sogenannten *Heat Maps* (siehe z.B. [Špakov & Miniotas, 2007]) erfolgen. Dabei wird die Intensität der Aufmerksamkeit mit einer farblichen Abstufung dargestellt. In Abbildung 95 und Abbildung 96 sind diese für die wesentlichsten MHDD-Pages sowie der mittleren Außensicht über alle Experimente in den VK 1 und 2 (vgl. Tabelle 12) dargestellt. Als Farbkodierung der Intensität wurden die Regenbogenfarben (rot (hoch) bis violett (niedrig)) verwendet. Die Hintergrundbilder der einzelnen Heat Maps geben nur eine exemplarische Momentaufnahme wieder und sind daher nur als Anhaltspunkte für die Aufmerksamkeitsverteilung über den Missionsverlauf zu verstehen. Für die Erstellung wurde die frei zugängliche Software *OGAMA (Open Gaze And Mouse Analyzer)* [Voßkühler, 2009] herangezogen.

In Abbildung 95 sind die Heat Maps für die Team-Page (links) sowie der Timeline-Page (rechts) dargestellt. Der obere Bereich der Team-Page war für die Probanden von besonderem Interesse. Hierbei konnten die Probanden detaillierte Informationen zu den noch freien Ressourcen sowie Aktivitäten der UCAVs entnehmen. Der Kommunikationsverlauf zwischen den Probanden und dem TKM nahm hingegen eine sehr untergeordnete Rolle ein. Da grundsätzlich alle Probanden über den Missionsverlauf die Team-Page am linken MHDD im Vordergrund hatten, lässt sich auf diesem Display im unteren Drittel die Wahrnehmung der Assistenzsystemmeldungen samt Eingabemöglichkeiten gut erkennen. Im Umfeld des linken Spots wurde die Beschreibung des Misstates und im Umfeld des rechten Spots die Eingabemöglichkeiten dargestellt.

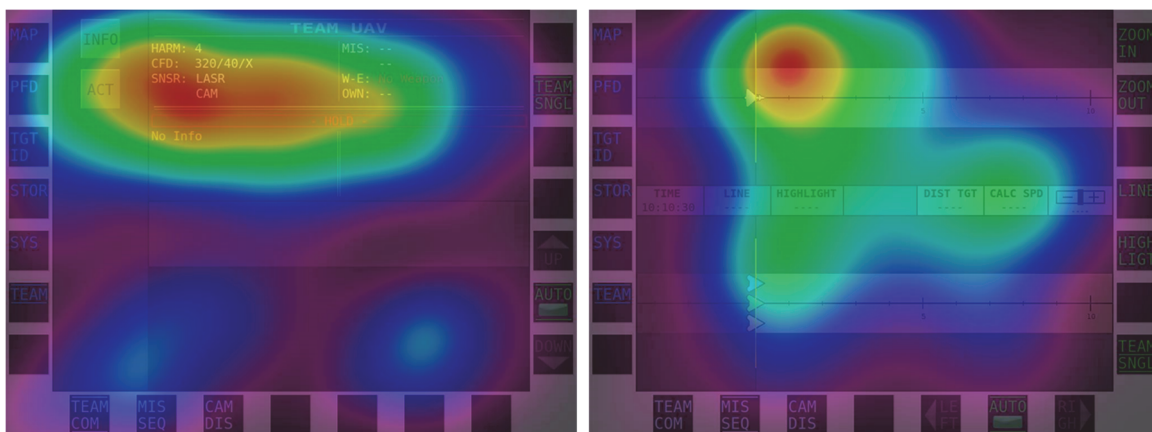


Abbildung 95: Heat Map: Team-Page (links) und Timeline-Page (rechts)

Auf der rechten Seite der Abbildung 95 ist die Verteilung der Aufmerksamkeit für die Timeline-Page veranschaulicht. Primär war der Fokus auf den Zeitstrahl für das bemannte Kampfflugzeug gelegt, vor allem der zeitliche Nahbereich wurde verstärkt betrachtet. Die

vom TKM berechneten Vorgaben zur Fluggeschwindigkeit, welche es einzuhalten galt, um sich koordinativ im Missionsgeschehen zu bewegen, wurde ein relativ hoher Stellenwert eingeräumt. Dem Zeitstrahl der unbemannten Teammitglieder kam im Gegensatz zum Zeitstrahl des bemannten Kampfflugzeuges eine untergeordnete Rolle zu. Hier wurde vor allem dem unmittelbaren zeitlichen Nahbereich Aufmerksamkeit zugesprochen. Bei Detailanalysen war erkennbar, dass vor allem in Situationen, in denen die Probanden auf die Fertigstellung der Bearbeitung einer Aktivität durch ein unbemanntes Teammitglied warteten, um beispielsweise eine abhängige Aktivität ausführen zu können, vermehrt den Nahbereich der Timeline des UCAV-Teams im Fokus hatten.

In Abbildung 96 ist die Heat Map für das Kartendisplay (links) und für die mittlere Außensicht (rechts) veranschaulicht. Die Aufmerksamkeit ist im Kartendisplay im unmittelbaren Nahbereich in Richtung des Flugweges konzentriert. Mit steigendem Abstand zur Position des bemannten Kampfflugzeuges sowie links und rechts von dessen geplanten Flugweg nimmt die Intensität der Aufmerksamkeit ab. Auf dem HUD in der mittleren Außensicht sind schwerpunktmäßig Flugführungsinformationen dargestellt. Dabei wird vorwiegend das Flugzeugsymbol sowie die eingestellte Geschwindigkeit des Autopiloten betrachtet.

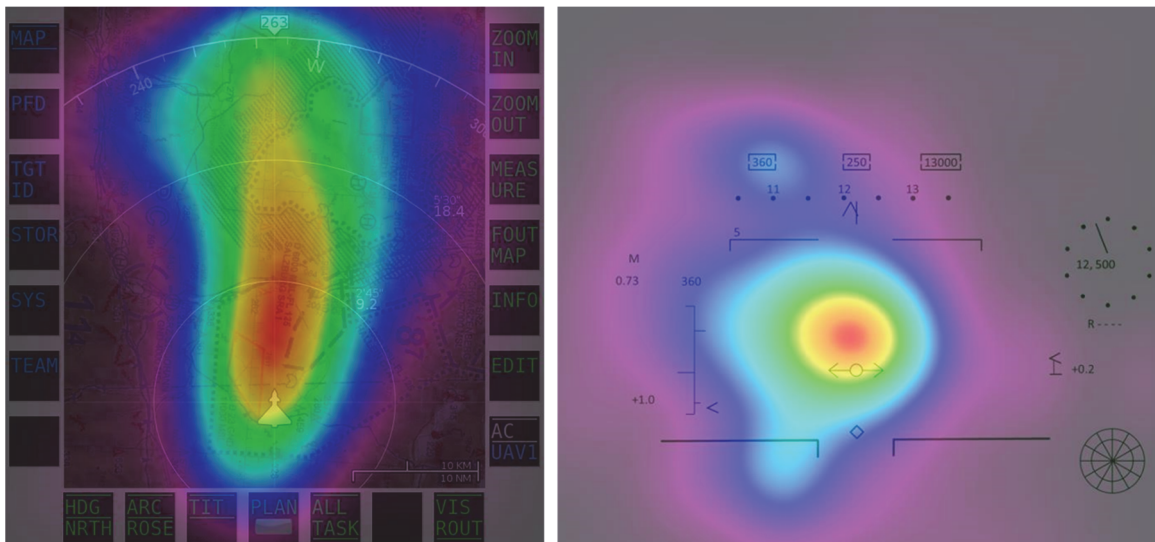


Abbildung 96: Heat Map: Kartendisplay (links) und Head-Up Display (rechts)

5.3.2.6 Assistenzsystemmeldung

Je nachdem, ob das TKM von einer Überforderung des Piloten ausging oder nicht, konnte die Versuchsperson eine angebotene Aufgabenvereinfachung einer Assistenzsystemmeldung nutzen oder nur den Erhalt der Assistenzsystemmeldung quittieren. Beide Fälle führten zu einer unmittelbaren Deaktivierung der Assistenzsystemmeldung. In 82,35% der dargelegten Meldungen bestätigten die Versuchspersonen den Erhalt der Meldungen (siehe Abbildung 97), bevor sie den angezeigten Missstand über Systemfunktionen behoben. Die Aufgabenvereinfachung wurde hingegen in 9,24% aller dargelegten Meldungen zur weiteren Bearbeitung genutzt. Auf die verbleibenden 8,40% der Meldungen reagierten die Versuchspersonen nicht aktiv, beseitigten jedoch den angezeigten koordinativen Missstand unter Nutzung von Systemfunktionen, was zu einer automatischen Deaktivierung der Assistenzsystemmeldung führte.

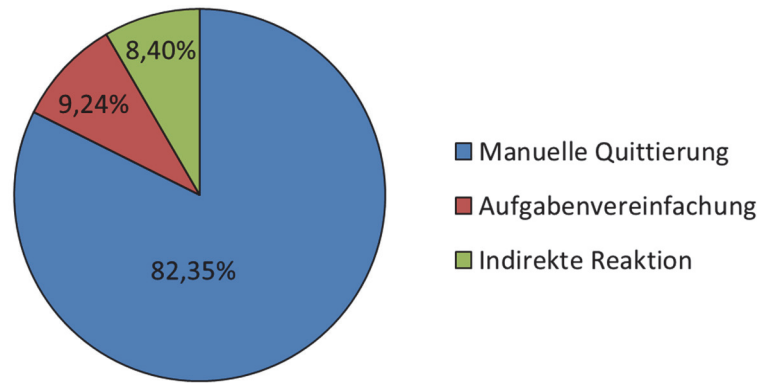


Abbildung 97: Reaktionen auf Assistenzsystemmeldungen

Zusammenfassend kann festgehalten werden, dass alle vom TKM ausgegebenen Assistenzsystemmeldungen in den durchgeführten Experimenten von den Probanden wahrgenommen wurden. Im Durchschnitt benötigten die Probanden 3,9 Sekunden (min = 1,2 und max = 11,8 Sekunden), um eine Maßnahme zur Behebung des angezeigten Misstandes zu tätigen.

5.3.2.7 Auswertung von Bildmaterial

Eine essentielle Aktivität der Versuchspersonen während der Missionsdurchführungen bestand in der Auswertung von Bildmaterial zur Zielverifizierung sowie zur Wirkungsaufnahme. In den ersten vier Messmissionen (A-D) entsprach das Bildmaterial dem im Briefing aufgezeigten Zielobjekt. Im Durchschnitt wurde für die Zielverifizierung 7,8 Sekunden und für die Schadensbeurteilung 5,6 Sekunden benötigt.

Um Auswirkungen auf das Pilotenverhalten im Zusammenspiel mit der Automation im Falle eines falschen Zielobjektes zu untersuchen, wurde in der Mission E das gebriefte Ziel durch einen militärischen Rettungswagen ersetzt. Im Mittel lag die benötigte Zeitdauer für die Verifizierung des Falschziels bei 32,3 Sekunden. In Abbildung 98 sind die benötigten Zeiten für die Zielverifizierung im Falle eines erwarteten bzw. falschen Zielobjektes veranschaulicht.

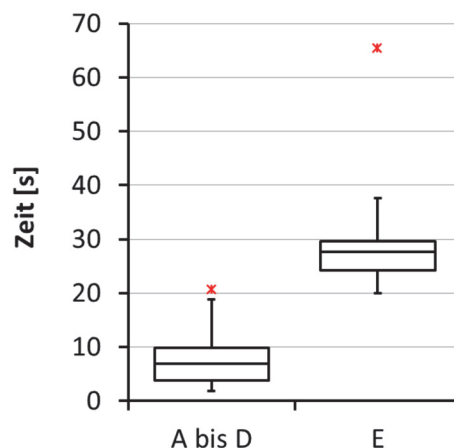


Abbildung 98: Dauer der Zielverifizierung hinsichtlich eines erwarteten bzw. falschen Zielobjektes

Wie aus Abbildung 98 hervorgeht, benötigten die Versuchspersonen im Falle eines falschen Zielobjektes für den Verifizierungsprozess wesentlich länger. Die Anwendung eines t-

Tests ($\alpha = 0.05$) zeigte, dass die Unterschiede zwischen den beiden Fällen (A-D und E) als signifikant ($t(27) = 3,289$; $p_t = 0,0028$; $n_{A-D} = 23$; $n_E = 6$) einzustufen sind.

Anhand der aufgezeichneten Daten konnte festgehalten werden, dass jede Versuchsperson in der Lage war, das Ziel korrekt als Falschziel zu identifizieren. Die Kennzeichnung des Falschziels durch Rotkreuz-Symbole war jedoch sehr prägnant und eindeutig für einen Betrachter erkennbar. Die für die Verifizierung benötigte Zeitdauer war trotzdem deutlich länger als die eines erwarteten Zielobjektes. Bei qualitativen Analysen des Bildmaterials samt Blickverhalten konnte man bei einigen Probanden deutlich erkennen, dass diese auf Anhieb das Ziel als Falschziel erkannten. Trotzdem wurde meist der Livestream des Beleuchters herangezogen, um das Falschziel aus anderen Perspektiven genauer zu analysieren.

Die Ursache für den länger andauernden Verifizierungsprozess im Falle eines Falschziels wird im Phänomen *kognitiver Tunnel* (siehe z.B. [Wickens, 2005]) gesehen. Die Aufmerksamkeit der Probanden war zum Zeitpunkt der Zielverifizierung vorwiegend auf Informationen konzentriert, die ihre Erwartungshaltung, die Bekämpfung eines Waffentransporters, unterstützt. Durch das Auftreten einer unerwarteten Situation benötigten die Probanden eine entsprechende Zeit, um aus ihrem kognitiven Tunnel „Zielbekämpfung“ heraus zu kommen und das vermeintliche Ziel als falsch zu verifizieren.

5.3.3 Subjektive Maße

Dieser Abschnitt zeigt die Ergebnisse auf, die mit Hilfe von subjektiven Erhebungsmethoden ermittelt wurden.

5.3.3.1 NASA-TLX

Der NASA-TLX Test kam im Rahmen der Experimentalkampagne zur Erhebung der subjektiven Beanspruchung der Probanden zum Einsatz. Insgesamt wurden drei NASA-TLX Tests pro Messmission durchgeführt (vgl. Abschnitt 5.1.6). Der erste Test gibt dabei die Beanspruchung in einer Missionsphase von eher niedriger Arbeitsbelastung wieder. In Abbildung 99 sind die Ergebnisse zu diesem in Abhängigkeit zur Versuchsperson dargestellt. Der mittlere Unterschied zwischen maximal und minimal erhobenem TLX-Wert einer Versuchsperson liegt dabei bei 17,8% über die verschiedenen Messmissionen. Den geringsten Unterschied weist dazu VP 1 mit 9,6% und den größten die VP 6 mit 23,7% auf. Daraus ist ersichtlich, dass die Versuchspersonen die für die Bewertung zur Verfügung stehende Skala individuell unterschiedlich stark ausgenutzt haben. Auch wurden die Ausprägungen der subjektiven Beanspruchung für ähnliche Arbeitsbelastungen interpersonell zum Teil sehr stark unterschiedlich bewertet. So weist beispielsweise der TLX-Wert für Mission C bei VP 1 17,0% und bei VP 4 65,6% auf. Ein Vergleich der erhobenen TLX-Werte ist daher nur intrapersonell sinnvoll.

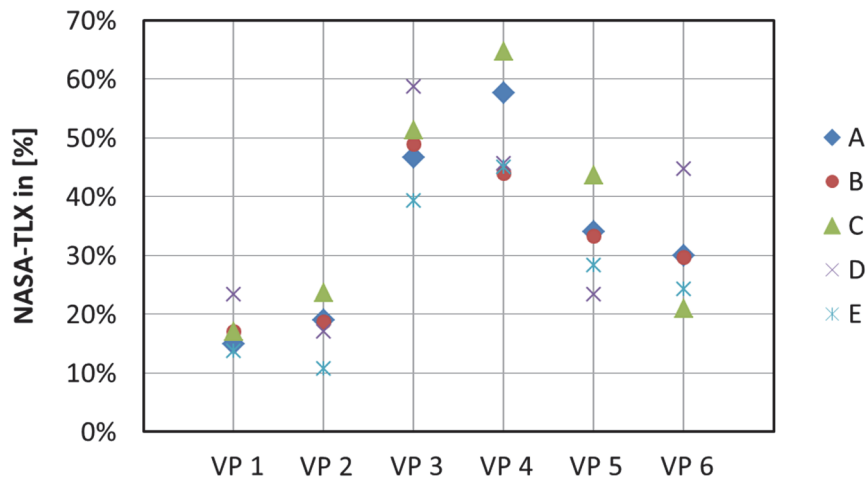


Abbildung 99: NASA-TLX Wert in Abhängigkeit der Versuchspersonen und Messmissionen für den ersten Messpunkt (niedrige Arbeitsbelastung)

Die Aufnahme des zweiten NASA-TLX Wertes fand unmittelbar nach Verfügbarkeit von Aufklärungsmaterial zum Zielobjekt statt. In dieser Flugphase waren bereits erste koordinative Tätigkeiten aus Sicht der Versuchspersonen zu bewältigen, weshalb von einem Anstieg der Arbeitsbelastung ausgegangen wurde. Nennenswerte Unterschiede bzw. Anstiege der Beanspruchung bei einem intrapersonellen Vergleich mit den NASA-TLX Werten für niedrige Arbeitsbelastung konnten jedoch nicht festgestellt werden. Die ermittelten NASA-TLX Werte sind in Abbildung 100 dargestellt.

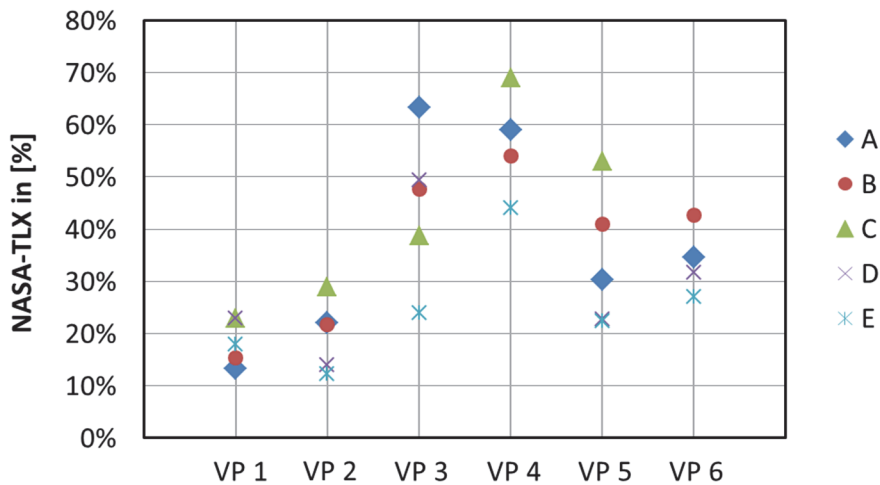


Abbildung 100: NASA-TLX Wert in Abhängigkeit der Versuchspersonen und Messmissionen für den zweiten Messpunkt (mittlere Arbeitsbelastung)

Der letzte NASA-TLX Wert wurde unmittelbar nach der Bekämpfung erhoben. Die aufgenommenen TLX-Werte sind in Abbildung 101 dargestellt. Hier sind keine nennenswerten Unterschiede zu den beiden vorangegangenen erhobenen TLX-Werten erkennbar.

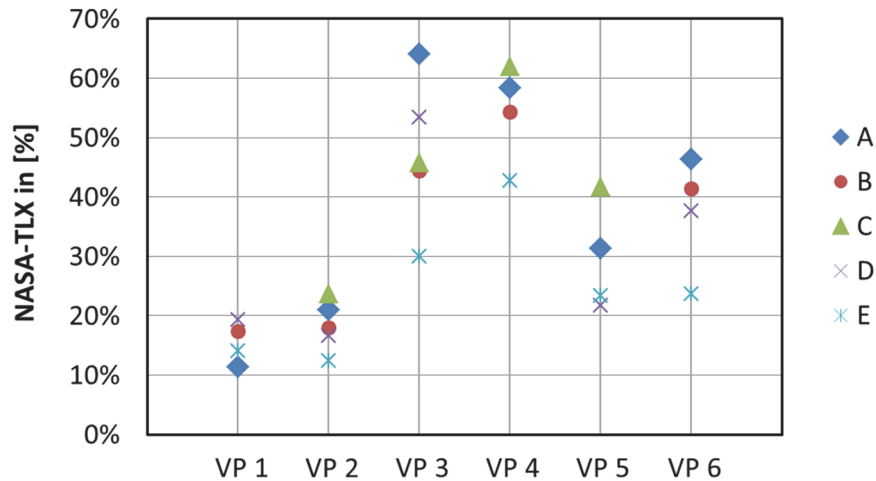


Abbildung 101: NASA-TLX Wert in Abhängigkeit der Versuchspersonen und Messmissionen für den dritten Messpunkt (hohe Arbeitsbelastung)

Um eine Aussage über die verschiedenen Versuchskonfigurationen tätigen zu können, wurde die mittlere Beanspruchung über eine Mission betrachtet. Hierbei wies der mittlere TLX-Wert für die Mission C, dicht gefolgt von Mission B und A, den höchsten Wert auf. Jedoch konnte während der Missionsausführungen in Verbindung mit dem Ausfüllen der NASA-TLX Fragebogen beobachtet werden, dass sich eine „suboptimale“ Bearbeitung von Teilaufgaben durch die UCAVs meistens erhöhend auf die verschiedenen Dimensionen auswirkte. Betrachtet man die einzelnen Missionen im Zusammenhang mit den dokumentierten Missionsverlaufsaufzeichnungen (Mitschrift), dann kann der Anstieg der Beanspruchungen vorwiegend dem tatsächlichen Missionsverlauf zugeschrieben werden anstatt den Versuchskonfigurationen.

In Abbildung 102 ist die durchschnittliche Zusammensetzung der Beanspruchung über die einzelnen Messmissionen veranschaulicht. Im Allgemeinen ist die Verteilung der verschiedenen Teilbeanspruchungen über die unterschiedlichen Messmissionen annähernd identisch. In der Messmission C nahm im Gegensatz zu den restlichen Missionen die Teilbeanspruchung Frustration einen deutlich höheren Anteil ein. Dies war den suboptimalen Missionsverläufen aber auch dem Fehlen der zeitlichen Koordinationsinformationen geschuldet, was aus den Aufzeichnungen der Interviews hervorgeht.

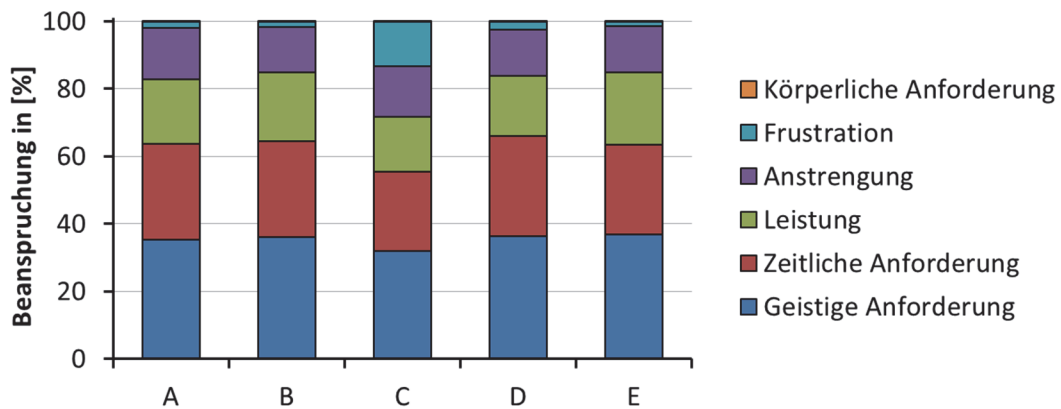


Abbildung 102: Zusammensetzung der Gesamtbeanspruchung bezogen auf die verschiedenen Messmissionen

5.3.3.2 Einstellung der Probanden

Zu Beginn der Experimente wurde die persönliche Einstellung der Piloten hinsichtlich Flugsimulatoren und unbemannten Systemen mittels Fragebögen erhoben. In Tabelle 19 sind die wesentlichsten Ergebnisse dazu dargestellt. Die sechs Versuchspersonen waren gegenüber dem Einsatz von Flugsimulatoren im Rahmen von Ausbildungsprogrammen und Trainingszwecken sehr positiv eingestellt. Sie sahen die Nutzung von Simulatoren zur experimentellen Erprobungen von Systemen als sehr zweckmäßig und geeignet an. Der Einsatz von unbemannten Systemen anstelle von bemannten wurde grundsätzlich als sinnvoll erachtet. Von einigen der Versuchspersonen wurde in diesem Zusammenhang angemerkt, dass nicht jede Tätigkeit eines herkömmlichen bemannten von einem unbemannten System (z.B. aus ethischen Gründen) ersetzt werden kann. Ebenso schätzten die Probanden die bemannte-unbemannte Zusammenarbeit in einer gemeinsamen Mission als sinnvoll ein.

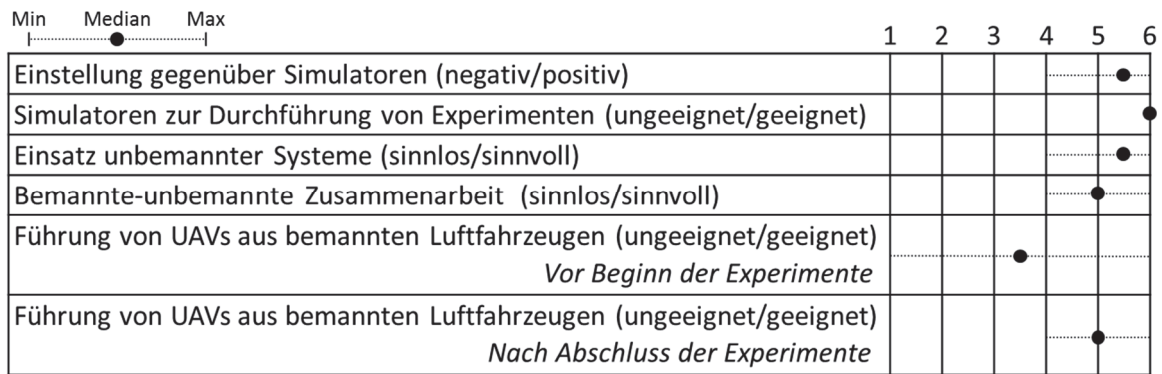


Tabelle 19: Einstellung der Probanden hinsichtlich Simulatoren und unbemannter Systeme

Die Haltung der Versuchspersonen hinsichtlich der Führung von unbemannten Systemen aus einem bemannten Kampfflugzeug war vor Beginn der Experimente sehr unterschiedlich. Die Meinungen reichte von sehr ungeeignet bis hin zu sehr geeignet. Nach Abschluss der Experimente wurde dieselbe Frage nochmals vorgelegt. Hierbei konnte eine deutliche Änderung der Meinungen der Probanden verzeichnet werden. Die Bewertungsspanne reichte hierbei von 4 bis 6 (Median = 5).

5.3.3.3 Allgemeines zur Durchführung

Vor Durchführung der Messmissionen fand eine Einweisung in den Simulator samt Training statt. Dieses wurde von allen Testpersonen als sehr ausreichend empfunden (vgl. Tabelle 20). Ebenso wurden die ausgearbeiteten Szenarien einer Luft-Boden-Angriffsmission zur Evaluierung der luftgestützten Führung von mehreren unbemannten Systemen als sehr geeignet erachtet. Eine häufig anzutreffende Anmerkung seitens der Probanden war, dass im „realen Leben“ noch weitere Randbedingungen, wie die Luftraumstruktur oder zeitliche Koordinierung mit anderen Kräften, zu beachten sind. Die den Messmissionen vorangegangenen Mission Briefings wurden von den Probanden als sehr informativ und auch zweckmäßig eingestuft. Für die Durchführung der intrusiven Messverfahren (NASA-TLX, SAGAT) musste die Simulation dreimal unterbrochen werden. Dies empfanden die meisten Probanden als sehr störend.

Min Median Max	1	2	3	4	5	6
Das vorausgehende Training war ungenügend/ausreichend.						●
Die Missionen für die Evaluierung waren ungeeignet/geeignet.						●
Das Mission Briefing war inhaltslos/informativ.					●	
Die Messunterbrechungen waren störend/nicht störend.		●				

Tabelle 20: Allgemeines zur Durchführung der Experimente

5.3.3.4 Eignung des Flugsimulators

Mit Hilfe eines Fragebogens wurden nach Abschluss der Experimente die subjektiven Meinungen der Versuchspersonen zu dem für die Experimente verwendeten Kampfflugzeugsimulator abgefragt. Generell wurde der Simulator für die Durchführung der Experimente als sehr geeignet eingestuft (siehe Tabelle 21). Vereinzelt Verbesserungsvorschläge, wie eine zusätzliche Autopilotenanzeige im HUP (im HUD war diese Anzeige vorhanden) oder variablere Sitzhöhenverstellung, wurden angemerkt. Die in den Simulator implementierten Funktionen (z.B. Autopilotenfunktionen) zur Führung des Kampfflugzeuges im Missionskontext wurden als ausreichend befunden. Das Steuer- und Flugverhalten des Simulators war gemäß den Probanden für die Durchführung der Versuche sehr geeignet. Als Kritikpunkt wurde von einzelnen Versuchspersonen das Flugverhalten in der Start- aber vor allem Landephase beziffert. Die computergenierte Außensicht wurde als realitätsnah wahrgenommen.

Min Median Max	1	2	3	4	5	6
Der Simulator war für die Experimente ungeeignet/geeignet.						●
Notwendige Funktionen zur Führung waren nicht vorhanden/vorhanden.					●	
Das Steuer- und Flugverhalten des Simulators war ungeeignet/geeignet.						●
Die Außensicht war unrealistisch/realistisch.					●	

Tabelle 21: Bewertung des Kampfflugzeugsimulators

5.3.3.5 Unbemannte Teammitglieder

Die Versuchspersonen wurden im Anschluss einer Messmission angehalten, das unbemannte Team anhand von Fragebogen zu evaluieren. In Tabelle 22 sind die wesentlichsten Ergebnisse daraus dargelegt. Im Allgemeinen wurden die unbemannten Teammitglieder als sehr hilfreich in der Missionsausführung angesehen. Negative Bewertungen waren generell auf software- bzw. implementationsbedingte Probleme zurückzuführen. Die Bewertung der Verhaltensweisen der unbemannten Teammitglieder wurde tendenziell eher als nachvollziehbar gegenüber überraschend bewertet. Die Absichten hingegen wurden in den meisten Experimenten als ausreichend bekannt angesehen. Auch wurden die unbemannten Teammitglieder als kompetente Systeme erachtet.

Min Median Max	1	2	3	4	5	6
Die UCAVs waren in der Missionsausführung störend/hilfreich.					●	
Die Verhaltensweisen war überraschend/nachvollziehbar.				●		
Absichten waren ungenügend/ausreichend bekannt.					●	
Die UCAVs handelten inkompetent/kompetent.					●	

Tabelle 22: Bewertung der unbemannten Teammitglieder

5.3.3.6 Mensch-Agenten-Schnittstelle

Im Nachfolgenden werden die wesentlichsten Ergebnisse der ausgewerteten Fragebögen zur MAS zusammengefasst dargelegt.

Team-Page

Die Team-Page wurde von den Probanden pauschal als sehr geeignetes Interface zur Kooperation mit den unbemannten Teammitgliedern eingestuft. Die Anzeige der Missionsausrüstung, wie verfügbare Waffen und Sensoren, stellte für alle VP eine sehr notwendige Information dar. Ähnliches konnte für die sequentielle Aktivitätsliste und den angezeigten Dialogverlauf erhoben werden, wie der Tabelle 23 entnommen werden kann. Hinsichtlich der Aktivitätsliste wurde von einigen Versuchspersonen angemerkt, dass diese standardmäßig im Singlemodus und nicht im Teammodus zur Anzeige gebracht werden soll. Der Singlemodus wurde von allen Versuchspersonen bevorzugt und in den Missionsausführungen auch genutzt. Anzumerken ist hierbei, dass die Probanden keine Eingriffsmöglichkeiten zur Führung eines einzelnenUCAVs hatten, jedoch trotzdem die Anzeige auf diesem Level bevorzugten.

Der Dialogverlauf stellte generell eine essentielle Information für die Probanden dar. Jedoch wird diese Information, wie auch aus der Blickbewegungsmessung hervorgeht, relativ selten benötigt. Ein Proband hatte deshalb dazu angedacht, diese Informationen in eine Art Untermenü zu verschieben und dafür den freien Platz mit zusätzlicheUCAV Statusinformationen, wie z.B. den Informationen aus der Timeline-Page, zu ergänzen.

	1	2	3	4	5	6
Die Team-Page war ungeeignet/geeignet.					●	
Die Anzeige zur Missionsausrüstung war überflüssig/notwendig.						●
Die sequentielle Aufgabenliste war störend/hilfreich.						●
Der Dialogverlauf war überflüssig/notwendig.						●
Der Single- wurde dem Teammodus gegenüber nicht bevorzugt/bevorzugt.						●

Tabelle 23: Subjektive Bewertung der Team-Page

Kartendisplay

Die Versuchspersonen befanden das Kartendisplay als sehr zweckmäßig (siehe Tabelle 24). Die verwendete Symbolik konnte gut interpretiert werden. Die Bedienung der Funktionen entsprach ebenso ihren Vorstellungen. Jedoch hatten sich einige Probanden eine „innovativere“ Bedienung des Kartendisplays über die Berührungsbildschirme gewünscht, ähnlich zur Bedienung von Kartensoftwareprogrammen auf Smartphones mit multi-touch Option. Die Darstellungen der Aktivitätspfeile zur Abbildung der aktuellen Tätigkeiten derUCAVs wurden als sehr sinnvoll erachtet. Einige Versuchspersonen gaben in diesem Zusammenhang an, dass diese Pfeile ihre SA deutlich verbesserten. Die Schattenfliegeranzeige wurde von den Probanden durchwegs als sehr notwendig erachtet.

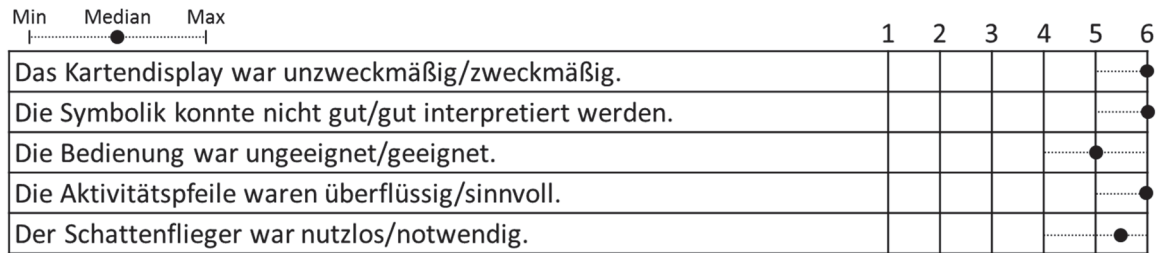


Tabelle 24: Subjektive Bewertung des Kartendisplays

Timeline-Page

Die Timeline-Page zur Visualisierung der zeitlichen Koordinationsinformationen wurde von allen Probanden als sehr sinnvoll erachtet. Die Symbolik konnte gut interpretiert werden. Einige Probanden wiesen jedoch explizit auf die Überlappungen von Symbolen in vereinzelt Situationen hin. Von einem Probanden wurde gewünscht, neben den relativen Zeitbezügen eine absolute Zeit anzugeben. Die Bedienung der Timeline-Page sowie der Funktionsumfang wurden ebenfalls als sehr geeignet erachtet. Die Auswertung der manuellen Eingaben zeigte allerdings auf, dass fast ausschließlich die Zoomfunktion auf der Timeline-Page von den Probanden genutzt wurde. Die Funktionen zur Anzeige koordinativer Zusammenhänge (Highlight), zeitlicher Bezüge (Line) und abschalten der automatischen Zeitnachführung (Position Freeze) wurden kaum bis gar nicht genutzt. Die Probanden stufen den angezeigten Schattenflieger als notwendig ein.

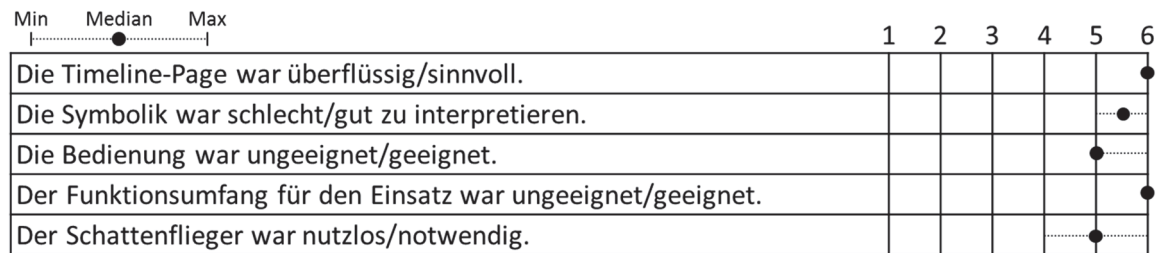


Tabelle 25: Subjektive Bewertung der Timeline-Page

Assistenzsystemmeldungen

Die subjektive Meinung der Versuchspersonen zu den Assistenzsystemmeldungen wurde ebenfalls über Fragebögen erfasst. In Tabelle 26 sind die Erkenntnisse daraus abgebildet. Diese Meldungen wurden von allen Versuchspersonen als sehr hilfreich erachtet. In diesem Zusammenhang wurde von einigen Versuchspersonen angemerkt, dass diese Funktion sie vor allem auf „vergessene, durchzuführende Aufgaben“ hingewiesen haben, die sie wohl ohne diesen Hinweis nicht bzw. viel zu spät erledigt hätten. Ebenso kam der Wunsch auf, über diese Meldungen weitere missionsrelevante Informationen, wie z.B. die Verfügbarkeit neuer Aufklärungsbilder oder die erfolgreiche Bekämpfung einer Flugabwehrstellung, zur Verfügung zu stellen.

Die angezeigten Missstände konnten von den Versuchspersonen in der Regel gut interpretiert werden. Jedoch bestand gelegentlich der Fall, dass die Beschreibung aus Sicht der Probanden als unvollständig erachtet wurde. So sollte beispielsweise ein angezeigter Hinweis zu einer Missionsverzögerung einen absoluten Zeitwert und eine dedizierte Begründung beinhalten.

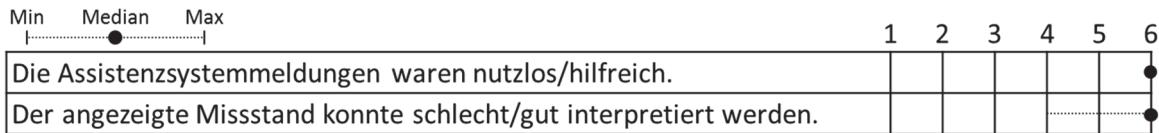


Tabelle 26: Subjektive Bewertung der Assistenzsystemmeldungen durch die Versuchspersonen

Eingabe von Informationen

Die Versuchspersonen nutzten zur Eingabe von koordinativen Informationen an das TKM im Regelfall die Touch-Funktionalitäten der Cockpitdisplays. Diese Eingabemodalität wurde als sehr geeignet angesehen. Der auf dem HOTAS angebrachte Cursor sowie das DVI-System wurden bis auf ein paar singuläre „Versuche“ nicht von den Versuchspersonen zur Eingabe herangezogen, weshalb dazu keine bewertende Aussage getroffen werden kann.

5.3.3.7 Versuchskonfigurationen

In Tabelle 27 sind die subjektiven Einschätzungen der Versuchspersonen zu den verschiedenen Versuchskonfigurationen dargelegt. Die VK 1 wurde von den Probanden grundsätzlich als geeignet angesehen, ebenso wie die Darlegung der Informationen zur kooperativen Teamkoordination. Als Hauptkritikpunkt wurde häufig die „starre“ teambasierte Führung genannt. Vor allem in Situationen, in denen der Missionsablauf nicht den Vorstellungen des Probanden entsprach oder aufgrund eines softwarebedingten Simulationsfehlers ins Stocken geriet, wollten die Probanden meist dedizierte Aufgaben an einzelne UCAVs kommandieren, was aber so nicht im Design vorgesehen war. In der VK 2 war im Gegensatz zur VK 1 keine SEK verfügbar. Diese Konfiguration wurde von den Probanden deutlich schlechter eingestuft als die Vergleichskonfiguration. Bemängelt wurde vor allem, dass die regelmäßigen Statusmeldungen (Selbsterklärungen) der einzelnen Teammitglieder nicht mehr automatisch erfolgten. Diese Information mussten somit eigenständig über die Displays eruiert werden. Einige Probanden merkten dabei auch an, dass sie als Teamführer und somit Verantwortungsträger, regelmäßig über deren Tätigkeiten explizit informiert werden wollen. In der VK 3 war im Vergleich zur VK 1 keine temporären Koordinationsinformationen verfügbar. Diese Tatsache wirkte sich negativ auf die Bewertung der Informationsdarlegung aus. Bis auf einen Probanden wurde das Fehlen der zeitlichen Koordinationsinformation als sehr negativ bewertet. Eine Versuchsperson merkte an, dass die fehlende zeitlichen Informationen nur durch ständiges Beobachten der unbemannten Teammitglieder ausgeglichen werden konnte. In der VK 4 fehlten die räumlichen Koordinationsinformationen sowie die auditiven Ausgaben der SEK. Das Fehlen der beiden Komponenten wirkte sich ebenfalls negativ auf die Qualität der Informationsdarstellung aus. VK 4 wurde als geeigneter bewertet als VK 2, obwohl hier neben der fehlenden koordinativen räumlichen Informationen auch keine SEK zur Verfügung stand. Die Ursache kann in dem sequentiellen Ablauf der Durchführungen der einzelnen Messmissionen gesehen werden.

Min	Median	Max	1	2	3	4	5	6
Die Versuchskonfiguration 1 (Mission A, E) war ungeeignet/geeignet.							●	
Die Informationsdarlegung war lückenhaft/umfassend.							●	
Die Versuchskonfiguration 2 (Mission B) war ungeeignet/geeignet.				●				
Die Informationsdarlegung war lückenhaft/umfassend.					●			
Das Fehlen der SEK war negativ/positiv zu werten.				●				
Die Versuchskonfiguration 3 (Mission C) war ungeeignet/geeignet.								●
Die Informationsdarlegung war lückenhaft/umfassend.							●	
Das Fehlen der zeitlichen Informationen war negativ/positiv zu werten.			●					
Die Versuchskonfiguration 4 (Mission D) war ungeeignet/geeignet.							●	
Die Informationsdarlegung war lückenhaft/umfassend.					●			
Das Fehlen der SEK war negativ/positiv zu werten.			●					
Das Fehlen der geom. Informationen war negativ/positiv zu werten.				●				

Tabelle 27: Subjektive Bewertung verschiedener Versuchskonfigurationen

5.3.4 Situationsbewusstsein

Die Untersuchung des Situationsbewusstseins in der Experimentalkampagne wurde mit Hilfe der subjektiven Methode SART und der objektiven Methode SAGAT durchgeführt. Im Nachfolgenden werden die erfassten Ergebnisse erläutert.

5.3.4.1 Situational Awareness Rating Technique

Im Anschluss an jede Missionsdurchführung wurde von den Probanden ein SART-Fragebogen bearbeitet. Um den singulären Einfluss einer Frage bei der Darlegung der Ergebnisse zu relativieren, wurde für die Auswertung die 3D-Methode (vgl. Abschnitt 5.1.6) verwendet. In Abbildung 103 sind die erfassten Durchschnittswerte des Situationsbewusstseins, eingeteilt in die verschiedenen Kategorien der 3D-Methode, dargestellt.

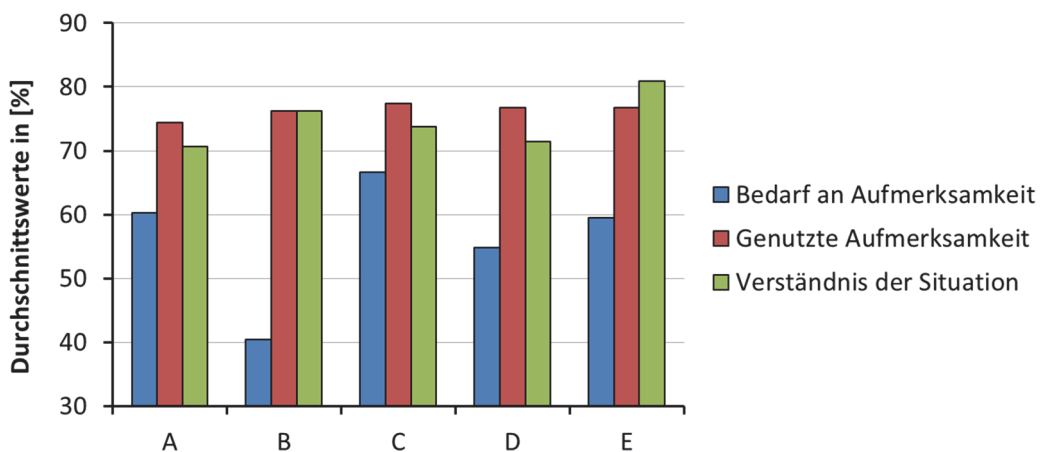


Abbildung 103: Erfasste Durchschnittswerte des Situationsbewusstseins mittels SART-Verfahren (3D-Methode) in Bezug auf die einzelnen Messmissionen

Die Kategorie „Bedarf an Aufmerksamkeit“ gibt Auskunft, wie variabel, komplex und instabil der Verlauf der Situation von den Versuchspersonen eingeschätzt worden ist. Im

Mittel lag dieser Wert über alle Messmissionen bei 56,3%. Der geringste Wert trat in der Mission B mit 40,5% auf und der höchste in Mission C mit 66,7%. Die zweite Kategorie „Genutzte Aufmerksamkeit“ fasst die subjektiven Empfindungen hinsichtlich der aufgebrauchten Konzentration, Aufmerksamkeit und Wachsamkeit sowie der verbleibenden mentalen Restkapazitäten zusammen. Im Durchschnitt nimmt diese Kategorie über alle Messmissionen einen Wert von 76,3% ein. Dieser Mittelwert ist annähernd über die verschiedenen Versuchskonfigurationen identisch. Die Spannweite der Mittelwerte beträgt lediglich 3% (max = 77,4%; min = 74,4%; $\sigma = 1,14\%$). Die letzte Kategorie gibt die subjektive Auffassung über das Verständnis der Situation der Versuchspersonen wieder. Dazu bewerten die Versuchspersonen die Qualität und Quantität der von ihnen während der Mission aufgenommenen Informationen und urteilen über die Vertrautheit der Situation. Die Mittelwerte in den verschiedenen Versuchskonfigurationen sind auch in dieser Kategorie annähernd gleich. Im Durchschnitt über alle Messmissionen liegt der Wert bei 74,6% (max = 81%; min = 76,2%; $\sigma = 4,16\%$).

Bezogen auf die verschiedenen Messmissionen wurde im Regelfall der Bedarf an Aufmerksamkeit geringer als die genutzte Aufmerksamkeit und das Verständnis der Situation von den Versuchspersonen bewertet. Dies lässt auf ein relativ gut ausgeprägtes Situationsbewusstsein aus Sicht der Versuchspersonen schließen.

5.3.4.2 Situation Awareness Global Assessment Technique

Die SA Erhebung mittels SAGAT-Test fand in zwei getrennten Aufgabenteilen statt. Der erste Teil umfasste die positionsbezogene Eintragung verschiedener Missionsobjekte, wie feindlicher Flugabwehrstellungen oder unbemannter Teammitglieder, in einer Nachbildung des Kartendisplays. Auf dem Kartendisplay standen keine relevanten Informationen im Sinne der Fragenbeantwortung zur Verfügung. Lediglich die Stützpunkte, FLOT sowie der Korridor wurde als Referenzmaß vorgegeben. Die genaue Anzahl der einzutragenden Objekte hing jeweils von der Messmission sowie dem Zeitpunkt der Simulationsunterbrechung ab. Für die Auswertung dieser Objekte wurde für jedes Objekt 2 Punkte vergeben, welches im Umkreis von 2.5NM (entspricht auf der Karte 1:250 000 ca. 1,8cm) von der tatsächlichen Objektposition in die Karte eingetragen wurde. Bei einer Abweichung unter 5NM wurde 1 Punkt und darüber kein Punkt vergeben. In Tabelle 28 sind die erzielten Ergebnisse in Prozent zur maximal erzielbaren Punkteanzahl zusammengefasst aufgelistet.

Mission	VP 1	VP 2	VP 3	VP 4	VP 5	VP 6
A	42,46	73,81	61,90	64,29	82,54	47,62
B	63,89	37,78	18,89	59,44	87,50	68,89
C	49,44	46,30	72,22	81,48	70,11	61,11
D	67,06	66,19	78,73	90,00	72,62	70,79
E	55,71	37,14	36,19	26,39	81,43	68,89

Tabelle 28: Ergebnisse der Positionsbestimmung der durchgeführten SAGAT-Tests in Prozent

Der zweite Teil der SA-Erhebung bestand in der Beantwortung von situationsrelevanten Fragen gemäß der drei Ebenen des Situationsbewusstseins nach [Endsley, 1988]. Die Bewertung korrekter Antworten erfolgte mit zwei und Antworten mit geringen Abweichungen mit einem Punkt. In Tabelle 29 sind die dabei erzielten Ergebnisse zusammengefasst aufgelistet.

Mission	VP1	VP2	VP3	VP4	VP5	VP6
A	78,57	73,81	71,43	69,05	78,57	57,14
B	73,81	78,57	78,57	69,05	57,14	76,19
C	50,00	64,29	66,67	52,38	35,71	14,29
D	52,38	66,67	61,90	85,71	61,90	54,76
E	66,67	64,29	57,14	76,19	61,90	47,62

Tabelle 29: Ergebnisse des Frageteils der durchgeführten SAGAT-Tests in Prozent

In Abbildung 104 sind die durchschnittlich erzielten Ausprägungen des Situationsbewusstseins (Positionsbestimmung + Frageteil) bezogen auf die verschiedenen Messmissionen grafisch veranschaulicht.

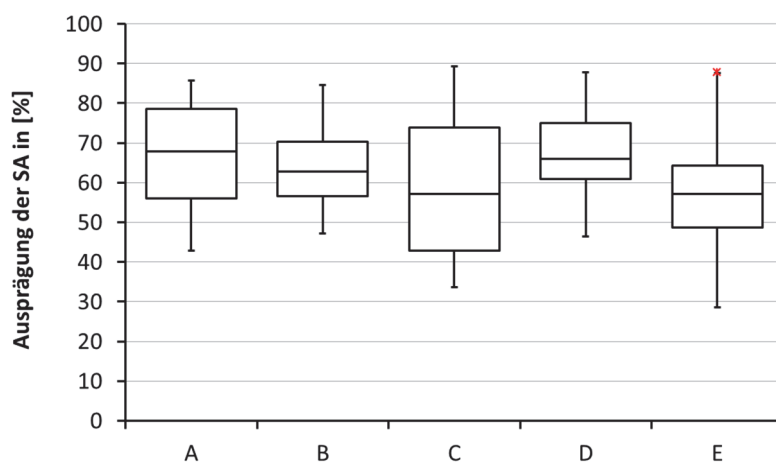


Abbildung 104: Aufgenommene Ausprägungen der SA in Prozent mittels SAGAT-Tests bezogen auf die verschiedenen Messmissionen

Wie aus dem Box-Plot Diagramm hervorgeht, unterliegen die erfassten SA-Werte einer hohen Streuung. Die durchschnittliche Spannweite über alle Messmissionen liegt dabei bei 47,3%. Die maximale Spannweite weist Messmission E mit 59,3% und die minimale Messmission B mit 37,38% auf. Bei Vergleich der Mediane zwischen den verschiedenen Messmissionen ist ersichtlich, dass diese wertemäßig relativ nahe zusammen liegen. Der maximale Unterschied liegt dabei zwischen Vergleichskonfiguration A ($m = 67,86\%$) und Messmission C ($m = 57,15\%$) vor und beträgt 10,71%.

Durchgeführte Signifikanztests zeigten auf, dass bis auf Messmission E ($t(34) = 2,367$; $p_t = 0,023$; $\alpha = 0.05$) keine signifikanten Unterschiede zur Vergleichsmision A vorliegen. In der Mission E lag allerdings ein anderer Aufgabenkontext vor. Zwischen der Vergleichsmision A und Mission C ($t(31) = 1,691$; $p_t = 0,100$; $\alpha = 0.1$; $n_A = 18$; $n_C = 15$) konnte ein schwacher signifikanter Unterschied ausgemacht werden. Betrachtet man in diesem Zusammenhang auch die bereits aufgezeigten subjektiven Bewertungen der Versuchspersonen, so lässt sich dieser Unterschied, die Abnahme der SA, auf die fehlenden zeitlichen Koordinationsinformationen in Messmission C zurückführen.

5.4 Diskussion

Im vorangegangenen Abschnitt dieses Kapitels wurden die verschiedenen Ergebnisse aus der Experimentalkampagne zur Evaluierung des entwickelten Arbeitssystemansatzes dargestellt. Im Nachfolgenden werden diese herangezogen, um hinsichtlich den in Abschnitt 5.1.1 formulierten Hypothesen spezifischere Aussagen zu tätigen.

Aus den in dieser Arbeit gewonnenen experimentellen Ergebnissen, allen voran dem Leistungsmaß „Missionserfolg“, geht klar hervor, dass die luftgestützte Führung mehrerer UCAVs aus einem einsitzigen Kampfflugzeug auf einem LOI von 4 in einer gemeinsamen Luft-Boden-Angriffsmission mit dem erarbeiteten Arbeitssystemkonzept grundsätzlich möglich ist. In allen Messmissionen konnten die Probanden, abgesehen von den bereits erwähnten implementationsbedingten Problemen, das Arbeitsziel vollständig erfüllen. Keiner der Probanden fühlte sich dabei bei seinen Tätigkeiten, auch nicht in sehr arbeitsintensiven Missionsphasen, über die Maßen beansprucht. Betrachtet man in diesem Zusammenhang die in Abschnitt 5.1.1 formulierte Hypothese (a), so kann diese bestätigt werden.

Zur Unterstützung des Piloten hinsichtlich der kooperativen Teamkoordination ist im Arbeitssystem das TKM vorgesehen worden. Die primäre Tätigkeit des TKMs in den durchgeführten Experimenten bestand darin, den Piloten sowie die unbemannten Teammitglieder mit Informationen im Sinne einer effektiven Koordination zu versorgen. Da der Missionserfolg stets gegeben war, kann davon ausgegangen werden, dass die unbemannten Systeme, genauer die OCUs, in der Lage waren, diese Information zu nutzen und im Gegenzug das TKM mit ausreichenden koordinativen Informationen zu versorgen. In dieser Arbeit stand vor allem die Untersuchung der Kooperation des Piloten mit dem technischen System im Vordergrund. Deshalb wurde in Abhängigkeit der Versuchskonfigurationen das Angebot an koordinativen Informationen für die Probanden variiert, mit dem Hintergrund Änderungen messtechnisch zu erfassen.

Im Allgemeinen konnte beobachtet werden, dass sich die Probanden recht gut auf die Änderungen des Angebotes an koordinativen Informationen einstellen konnten. Bei fehlenden Informationen intensivierten die Versuchspersonen ihre Aufmerksamkeit auf die verbleibenden Informationen, um Defizite darüber auszugleichen. Fehlende Informationen wurden grundsätzlich von allen Probanden als negativ bewertet, was zur Folge hatte, dass alle von der Standardkonfiguration (VK 1) abweichenden Systemkonfigurationen als „ungeeigneter“ erachtet wurden.

Darüber hinaus führten fehlende koordinative Informationen oftmals zu einer geringen Abnahme des Situationsbewusstseins der Probanden. Auch konnte festgehalten werden, dass vor allem das Fehlen der temporären Informationen eine deutliche Verschlechterung der Eingliederung der Probanden in den Missionskontext mit sich zog. Die Folge waren längere Missionszeiten und somit auch Verweilzeiten über bedrohtem Gebiet. Änderungen hinsichtlich der Beanspruchung der Piloten bei fehlenden Koordinationsinformationen konnten keine festgestellt werden, da der Einfluss des Missionsverlaufes auf die Beanspruchung deutlich ausgeprägter war als durch die verschiedenen Versuchskonfigurationen.

Neben der Anzeige von koordinativen Informationen in der Rolle *associative assistance* war es auch Aufgabe des TKMs die Probanden über Missstände in der Rolle *alerting assistance* zu unterrichten. In den meisten Fällen erfolgte die Behebung durch die

Probanden eigenständig und unmittelbar ohne weitere bzw. zusätzliche Unterstützungsleistung seitens des TKMs. Die subjektiven Haltungen der Versuchspersonen gegenüber den Assistenzsystemmeldungen waren äußerst positiv.

Die Hypothese (b) in Abschnitt 5.1.1 hatte zum Inhalt, dass das TKM einen unterstützenden Beitrag zur kooperativen Teamkoordination leistet. Gemäß den soeben aufgelisteten Resultaten kann diese Hypothese dementsprechend angenommen werden.

Die entwickelte MAS begründet die Schnittstelle zwischen dem Piloten und dem TKM und somit unbemannten Systemen. Ein großer Anteil der Aufmerksamkeit der Probanden war während der Missionsausführungen darauf fokussiert. Betrachtet man in diesem Zusammenhang die verschiedenen *Heat Maps* aus Abschnitt 5.3.2.5, so geht daraus hervor, dass bestimmte Informationen häufig und andere wiederum eher selten bis gar nicht von den Probanden zur Missionsbewältigung herangezogen wurden, was auf ein ergonomisches Verbesserungspotential schließen lässt.

Die angestellten Untersuchungen hinsichtlich der Gebrauchstauglichkeit der entwickelten MAS zeigten auf, dass diese generell als sehr geeignet von den Versuchspersonen angesehen wurden. Auch konnten die dargestellten Assistenzsystemmeldungen von den Probanden während der Missionsausführungen gut wahrgenommen werden. Der gelbe Balken in Verbindung mit einem akustischen Warnton konnte die Aufmerksamkeit der Probanden effektiv und zuverlässig auf die zur Anzeige gebrachten Assistenzsystemmeldungen lenken.

Die Probanden waren während der Experimente in der Lage, mit dem TKM und somit dem unbemannten Team über die MAS auf geeignete Art und Weise zusammenzuarbeiten, weshalb auch die verbleibende Hypothese (c) ebenfalls angenommen werden kann.

Bei den dargelegten Ergebnissen gilt jedoch auch zu beachten, dass diese unter reinen Laborbedingungen ermittelt wurden. Trotz des für eine derartige Untersuchung relativ hohen Realitätsgrads der Experimentalumgebung kann davon ausgegangen werden, dass die Übertragbarkeit der erzielten Ergebnisse in die Realität nicht im vollen Ausmaß gegeben sein wird (geringe externe Validität). Einschränkend ist auch der teilweise geringe Stichprobenumfang aufgrund der limitierten Verfügbarkeit von geeigneten Probanden zu betrachten.

6 Zusammenfassung und Ausblick

Diese Dissertation hatte die Entwicklung eines Arbeitssystem- und Automatisierungsansatzes zur Führung mehrerer unbemannter Kampfflugzeuge aus einem einsitzigen Kampfflugzeug im Missionskontext einer Luft-Boden-Angriffsmission zum Inhalt.

Dazu wurde zu Beginn dieser Arbeit das Umfeld der Führung von am Markt verfügbaren unbemannten Luftfahrzeugen detaillierter betrachtet. Daraus ging relativ deutlich hervor, dass mit konventionellen Systemen das Ziel dieser Arbeit nicht erreicht werden kann, da im Allgemeinen mehrere Bediener für den operationellen Einsatz eines einzelnen Systems notwendig sind. Um dem Piloten trotzdem die Führung mehrerer UCAVs aus einem Cockpit zu ermöglichen, wurde in dieser Arbeit angedacht, weitere Automationstechnologien in das Gesamtsystem zu integrieren.

Als globaler Lösungsansatz wurde die Theorie der kognitiven Automation [Onken & Schulte, 2010] gewählt, um vor allem menschenbezogene Probleme im Zusammenspiel mit hochautomatisierten Systemen weitgehend zu vermeiden. Zunächst erfolgte eine schrittweise Herleitung eines Arbeitssystemkonzeptes ausgehend von einem rein bemannten Kampfflugzeugteam. Dabei wurden bemannte durch unbemannte Systeme mit an Bord integrierten kognitiven Agenten ersetzt. Um den Arbeitsaufwand zur kooperativen Führung der UCAVs aus Sicht des Piloten möglichst gering zu halten, wurde der Abstraktionsgrad der Führung auf teambasierter Ebene festgelegt. Dieser Entscheidung lag die Annahme zugrunde, dass die Arbeitsbelastung im Kampfflugzeugcockpit auch ohne UCAV-Führung bereits sehr hoch ist. Ferner wurde dieser gewählte hohe Automationsgrad als der technologisch interessanteste und herausforderndste angesehen. Nicht zuletzt konnte auf diese Weise auf die Vorarbeiten von [Meitinger, 2008] zurückgegriffen werden. Die teambasierte Führung hatte den Zusammenschluss der unbemannten Teammitglieder zu einer singulären Instanz, dem OCU-Subteam, zur Folge. Als eine Schwierigkeit im resultierenden Arbeitssystem wurde die Ausgestaltung der Kooperation, genauer der kooperativen Teamkoordination, zwischen dem Piloten und dem OCU-Subteam angesehen.

Als Ausgangspunkt für weiterführende konzeptionelle Überlegungen erfolgte die Betrachtung der Koordinationstheorie von [Malone & Crowston, 1990]. Gemäß dieser Theorie setzt sich die Koordination aus verschiedenen Komponenten und damit in Verbindung stehenden Prozessen zusammen. Die einzelnen Komponenten samt Prozessen wurden für den in dieser Arbeit zugrunde liegenden Anwendungsfall einer Luft-Boden-Angriffsmission eingehender analysiert. Darüber hinaus wurden auch die Voraussetzungen einer effektiven Koordination nach [Klein et al., 2005] mit berücksichtigt.

Um den Piloten bei diesen koordinativen Tätigkeiten mit dem unbemannten Subteam zu unterstützen, wurde ein Assistenzsystem, das Teamkoordinationsmodul, in das Arbeitssystem mit aufgenommen, das stellvertretend im Sinne des Piloten die koordinativen Tätigkeiten mit dem unbemannten Subteam als eine Art „Mittelsmann“ ausübt. Die Ausgestaltung der Verhaltensweisen des TKMs mit dem Piloten fand anhand der Grundforderungen und Rollen eines Assistenzsystems nach [Onken & Schulte, 2010] statt.

Damit der Pilot und das TKM in Interaktion treten können, wurde auch eine Mensch-Maschine-Schnittstelle, spezieller eine Mensch-Agenten-Schnittstelle, im Gesamtsystem vorgesehen. Für die Konzeptionierung dieser wurde im Vorfeld eine Arbeitsplatzanalyse eines konventionellen bemannten Kampfflugzeuges hinsichtlich der für die MAS in Frage kommenden Schnittstellenelemente vorgenommen. Ebenso erfolgte eine Betrachtung der verschiedenen Modalitäten des Menschen im Hinblick auf eine geeignete Darlegungsform der Informationen. Die Erkenntnisse daraus zeigten auf, dass der Großteil der menschlichen Informationsaufnahme über den visuellen Kanal erfolgt, weshalb sich die Informationsausgabe im erarbeiteten MAS-Konzept primär auf diese Modalität stützt. Für die Eingabe von koordinativen Informationen an das TKM wurden unterschiedliche Schnittstellenelemente (Funktionstasten, Touchscreen, HOTAS, DVI) im Bedienkonzept vorgesehen.

Im Anschluss an die Konzeptionierung des Gesamtsystems wurde der entwickelte Ansatz in eine Experimentalumgebung implementiert. Für die Abbildung der bemannten Komponente wurde ein Kampfflugzeugsimulator inklusive der Subsysteme zur Durchführung einer militärischen Luft-Boden-Angriffsmission entwickelt und aufgebaut. Für die technische Umsetzung der unbemannten Teammitglieder wurde auf bereits am Institut für Flugsysteme verfügbare Softwaresysteme zurückgegriffen und diese entsprechend modifiziert. Die Implementierung des Teamkoordinationsmoduls erfolgte anhand eines modularen Architekturansatzes. Darüber hinaus wurde die konzeptionierte Mensch-Agenten-Schnittstelle in den Kampfflugzeugsimulator integriert.

Abschließend wurde das entwickelte Gesamtsystem in Mensch-Maschine-Experimenten umfassend evaluiert. Hieraus konnte festgehalten werden, dass unter Einsatz von kognitiver Automation ein einzelner Pilot durchaus in die Lage versetzt werden kann, mehrereUCAVs in einer gemeinsamen Luft-Boden-Angriffsmission aus dem Cockpit auf einem LOI von 4 zu führen.

Das Angebot an koordinativen Informationen des TKMs wurde grundsätzlich von den Probanden als vollständig erachtet. In einigen Experimenten kam es zu einer Reduzierung des Informationsumfanges. Fehlende Informationen führten dabei grundsätzlich zu einer Verschlechterung der Akzeptanz des Gesamtsystems. Eine signifikante Veränderung der mentalen Beanspruchung der Versuchspersonen in Abhängigkeit fehlender Informationen konnte nicht festgestellt werden, da der Einfluss der Missionsdynamik auf die Beanspruchung deutlich stärker ausgeprägt war. Hinsichtlich der Betrachtung der SA überwog ebenfalls der Einfluss des Missionsverlaufes. Aber auch hier bewerteten die Versuchspersonen ihr Situationsbewusstsein in allen Experimenten als gut ausgeprägt.

Neben der Ausgabe von Informationen in der Rolle *associative assistance*, war es auch Aufgabe des TKMs, die Versuchspersonen auf koordinative Missstände in der Rolle *alerting assistance* in der Form von Assistenzsystemmeldungen hinzuweisen. Das Ziel, die Aufmerksamkeit des Piloten auf einen detektierten Missstand zu lenken, konnte in allen auftretenden Fällen erreicht werden. Die subjektive Haltung der Probanden gegenüber diesen Meldungen fiel in allen betrachteten Bewertungskategorien äußerst positiv aus.

Die Gebrauchstauglichkeit der entwickelten MAS wurde von den Piloten generell als sehr geeignet und zweckmäßig für die Durchführung einer Luft-Boden-Angriffsmission angesehen. Die konzipierten Anzeigeelemente konnten gemäß den ausgewerteten Fragebögen von den Probanden gut interpretiert werden. Eingaben an das TKM wurden bis auf ein paar singuläre Ausnahmen ausschließlich über die berührungsempfindlichen Cockpitdisplays vorgenommen, weshalb auch keine Aussage über die Eignung der verbleibenden Eingabelemente getätigt werden konnte.

In dieser Arbeit wurde die kooperative Multi-UCAV Führung, basierend auf kognitiver Automation, auf einem sehr hohen Realitätsgrad in einer eigens dafür entwickelten Experimentalumgebung untersucht. Die daraus gewonnenen Erkenntnisse sind dabei als eine Art Ausgangsbasis für weiterführende Forschungsaktivitäten auf diesem Gebiet zu verstehen. Im Nachfolgenden werden abschließend Anregungen zur Weiterentwicklung aufgezeigt.

Während der Durchführung der Experimente konnte bei den Probanden in manchen Missionsphasen, wie z.B. im Streckenflug, eine deutliche Unterforderung beobachtet werden. Als eine Erklärung dafür kann der in dieser Arbeit gewählte hohe Automationsgrad angesehen werden. Eine Möglichkeit, um Unter- sowie Überforderungen zu vermeiden, stellt die Implementierung adaptiver Automationsansätze dar. Hierbei könnte beispielsweise ein Assistenzsystem kontinuierlich die Beanspruchung des Piloten evaluieren und in Abhängigkeit des Ergebnisses eine Funktionsverteilung zwischen Mensch und Maschine vornehmen. Ziel sollte es sein, das Beanspruchungsmaß des Piloten über den gesamten Missionsverlauf auf einem annähernd konstanten, mittleren Niveau zu halten. Schwierigkeiten hierbei stellen vermutlich die Erfassung der Beanspruchung des Piloten sowie die Ausgestaltung der dynamischen Funktionsteilung dar.

Die unbemannten Teammitglieder konnten in dieser Arbeit ausschließlich auf einer teambasierten Ebene geführt werden. Seitens der Probanden wurde jedoch in vereinzelt Situationen ein direkter Zugriff auf ein spezifisches UCAV als erforderlich angesehen. Um diesen Forderungen nachzukommen, könnte beispielsweise neben der teambasierten Führung zusätzlich dazu ein aufgabenbasierter Führungsansatz (Zuweisung von dezidierten Aufgaben an ein spezifisches UCAV) den Piloten zugänglich gemacht werden. Hierbei gilt vor allem zu untersuchen, wie ein UCAV sinnvoll aus den unbemannten Subteam herausgelöst sowie zurück eingegliedert werden kann, vor allem hinsichtlich der Aufgabenverteilung und Auflösung von gegenseitigen Abhängigkeiten.

A. Literaturverzeichnis

- Abbott, T. S. (1993). *Functional Categories for Future Flight Deck Designs*. Hampton, Virginia, USA.
- Adams, S. M., Friedland, C. J. (2011). A survey of unmanned aerial vehicle (UAV) usage for imagery collection in disaster research and management. In *9th International Workshop on Remote Sensing for Disaster Response*. Stanford, California, USA.
- Aizawa, K., Tanaka, S. (2009). A constant-time algorithm for finding neighbors in quadrees. *IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence*, 31(7), 1178–1183. doi:10.1109/TPAMI.2008.145
- Anderson, J. R., Bothell, D., Byrne, M. D., Douglass, S., Lebiere, C., Qin, Y. (2004). An integrated theory of the mind. *Psychological Review*, 111(4), 1036–1060. doi:10.1037/0033-295X.111.4.1036
- Anderson, J. R., Lebiere, C. (1998). *The atomic components of thought* (Vol. 3). Mahwah, NJ: Lawrence Erlbaum.
- Ansorge, U., Leder, H. (2011). *Wahrnehmung und Aufmerksamkeit*. Wiesbaden, Deutschland: VS Verlag für Sozialwissenschaften.
- AT&T Corporation. (2002). *AT&T Natural Voices: Text-To-Speech Engines*. System Developer's Guide (Release 1.4.1).
- Austin, R. (2010). *Unmanned Aircraft Systems - UAVS Design, Development and Deployment*. Chichester, UK: John Wiley & Sons, Ltd.
- Bair, J. H. (1989). Supporting cooperative work with computers: Addressing meeting mania. In *Thirty-Fourth IEEE Computer Society International Conference* (pp. 208–217).
- Barnes, M., Jentsch, F. (2010). *Human-robot interactions in future military operations*. Farnham, Burlington: Ashgate Publishing Company.
- Baxter, J. W., Horn, G. S. (2005). Controlling teams of uninhabited air vehicles. In *Proceedings of the fourth international joint conference on autonomous Agents and multiagent Systems - AAMAS 2005* (pp. 27–33). New York, USA: ACM. doi:10.1145/1082473.1082800
- Baxter, J. W., Horn, G. S., Leivers, D. P. (2008). Fly-by-agent: Controlling a pool of UAVs via a multi-agent system. *Knowledge-Based Systems*, 21(3), 232–237. doi:10.1016/j.knosys.2007.11.005
- Baxter, J. W., Richards, D. (2010). Whose Goal is it anyway? User Interaction in an Autonomous System. In *Proceedings of the workshop on Goal Directed Autonomy AAAI-2010*. Atlanta, USA.
- Benzler, A., Brüggewirth, S., Böhm, F., Donath, D., Kriegel, M., Maiwald, F., Meitinger, C., Rauschert, A., Reidlstürz, P., Strenzke, R., Uhrmann, J. (2011). *Hubschrauber-abgesetzte Sensorplattform „Manned-Unmanned Teaming (MUM-T)“*. Abschlussbericht. Universität der Bundeswehr München.
- Berndt, J. S. (2011). *JSBSim an open source, platform-independent, flight dynamics model in C++*. JSBSim Reference Manual.

- Besada-Portas, E., de la Torre, L., de la Cruz, J. M., de Andrés-Toro, B. (2010). Evolutionary Trajectory Planner for Multiple UAVs in Realistic Scenarios. *IEEE Transactions on Robotics*, 26(4), 619–634. doi:10.1109/TRO.2010.2048610
- Biggers, K. E., Ioerger, T. R. (2001). Automatic generation of communication and teamwork within multi-agent teams. *Applied Artificial Intelligence: An International Journal*, 15(10), 875–916. doi:10.1080/088395101753242679
- Billings, C. (1997). *Aviation automation: The search for a human-centered approach*. Mahwah, NJ, USA: Lawrence Erlbaum Associates.
- Borghoff, U. M., Schlichter, J. H. (2000). *Computer-Supported Cooperative Work*. Berlin, Heidelberg: Springer-Verlag. doi:10.1007/978-3-662-04232-8
- Bortoff, S. A. (2000). Path planning for UAVs. In *Proceedings of the American Control Conference*. Chicago, Illinois, USA.
- Bortz, J., Döring, N. (2006). *Forschungsmethoden und Evaluation für Human- und Sozialwissenschaftler* (4th ed.). Heidelberg: Springer Medizin Verlag.
- Brand, Y. (2012). *Entwicklung und Implementierung eines Weaponmanagementsystems in eine Kampfflugzeugsimulationsumgebung*. Bachelorarbeit. Universität der Bundeswehr München.
- Brockhaus, R., Alles, W., Luckner, R. (2011). *Flugregelung* (3rd ed.). Berlin, Heidelberg: Springer-Verlag.
- Brüggenwirth, S., Pecher, W., Schulte, A. (2011). Design Considerations for COSA 2. In *IEEE Symposium Series on Computational Intelligence (SSCI)*. Paris, Frankreich.
- Brüggenwirth, S., Schulte, A. (2012). COSA 2 - A Cognitive System Architecture with Centralized Ontology and Specific Algorithms. In *IEEE International Conference on Systems, Man, and Cybernetics (IEEE SMC 2012)*. Seoul, Korea.
- Bühner, M., Ziegler, M. (2009). *Statistik für Psychologen und Sozialwissenschaftler*. München, Deutschland: Pearson Studium.
- Bundestag. (2013). Deutscher Bundestag 17. Wahlperiode - Antrag der Fraktion der SPD: Für eine umfassende Debatte zum Thema Kampfdrohnen. Drucksache 17/13192.
- Cannon-Bowers, J. A., Salas, E., Blickensderfer, E., Bowers, C. A. (1998). The Impact of Cross-Training and Workload on Team Functioning: A Replication and Extension of Initial Findings. *Human Factors: The Journal of the Human Factors and Ergonomics Society*, 40(1), 92–101. doi:10.1518/001872098779480550
- Cannon-Bowers, J. A., Salas, E., Converse, S. (1993). Expert Team Decision Making*. In J. N. Castellan (Ed.), *Individual and Group Decision Making: Current Issues* (pp. 221–245). Hillsdale, New Jersey: Lawrence Erlbaum Associates.
- Castelfranchi, C. (1998). Modelling social action for AI agents. *Artificial Intelligence*, 103(1), 157–182.
- Chappelle, W., McDonald, K., McMillan, K. (2011). *Important and critical psychological attributes of USAF MQ-1 Predator and MQ-9 Reaper Pilots according to subject matter experts*. Wright-Patterson Air Force Base, OH, USA.
- Christoffersen, K., Woods, D. (2002). How to make automated Systems Team Players. *Advances in Human Performance and Cognitive Engineering Research*, 2, 1–12.
- Clark, H. H. (1996). *Using language*. Cambridge, UK: Cambridge University Press.
- Clark, H. H., Brennan, S. E. (1991). Grounding in communication. In L. B. Resnick, J. M. Levine, S. D. Teasley (Eds.), *Perspectives on socially shared cognition* (pp. 127–149). Washington, USA: American Psychological Association.

- Clauß, S., Kriegel, M., Schulte, A. (2013). UAV Capability Management using Agent Supervisory Control. In *AIAA Infotech@Aerospace 2013 Conference*. Boston, MA, USA.
- Clauß, S., Schulte, A. (2014). Leitende Kontrolle eines UAV durch einen Kognitiven Agenten. In *3. Interdisziplinärer Workshop - Kognitive Systeme: Mensch, Teams, Systeme und Automaten*. Magdeburg, Deutschland.
- Cummings, M. L. (2015). Operator Interaction with Centralized Versus Decentralized UAV Architectures. In K. P. Valavanis, G. J. Vachtsevanos (Eds.), *Handbook of Unmanned Aerial Vehicles - Volume 2*. Dordrecht, Niederlande: Springer-Verlag.
- 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*, 1(2).
- Cummings, M. L., Mitchell, P. J. (2005). Managing Multiple UAVs Through a Timeline Display. In *Infotech@Aerospace 2005 Conference*. Reston, Virginia: American Institute of Aeronautics and Astronautics. doi:10.2514/6.2005-7060
- De Martino, A. (2012). *Introduction to modern EW systems*. Boston, London: Artech House.
- Deutsch, M. (1962). Cooperation and trust: Some theoretical notes. *Nebraska Symposium on Motivation*, 230–275.
- Dixon, S. R., Wickens, C. D., Chang, D. (2004). Unmanned Aerial Vehicle Flight Control: False Alarms versus Misses. *Proceedings of the Human Factors and Ergonomics Society 48th Annual Meeting*.
- Dixon, S. R., Wickens, C. D., Chang, D. (2005). Mission Control of Multiple Unmanned Aerial Vehicles: A Workload Analysis. *Human Factors: The Journal of the Human Factors and Ergonomics Society*, 47(3), 479–487. doi:10.1518/001872005774860005
- Donath, D. (2012). *Verhaltensanalyse der Beanspruchung des Operateuers in der Multi-UAV-Führung*. Dissertation. Universität der Bundeswehr München.
- Donath, D., Rauschert, A., Schulte, A. (2010). Cognitive assistant system concept for multi-UAV guidance using human operator behaviour models. In *HUMOUS'10*. Toulouse, France.
- Donath, D., Schulte, A. (2008). *Piloten-Assistenz-System für Luftfahrzeuge (PILAS)*. Projektbericht. Universität der Bundeswehr München.
- Draper, M. H., Ruff, H. A. (2000). Multi-sensory displays and visualization techniques supporting the control of unmanned air vehicles. In *Proceedings of the IEEE International Conference on Robotics and Automation*. San Francisco, CA, USA.
- Duchowski, A. T. (2007). *Eye tracking methodology: Theory and practice* (2nd ed.). London: Springer-Verlag.
- Edwards, A. L. (1980). *Versuchsplanung in der psychologischen Forschung* (3rd ed.). Frankfurt am Main: Fachbuchhandlung für Psychologie GmbH Verlagsabteilung.
- Eid, M., Gollwitzer, M., Schmitt, M. (2013). *Statistik und Forschungsmethoden* (3rd ed.). Weinheim, Basel: Beltz Verlag.
- Elke, G., Konradt, U., Majonica, B., Zimolong, B. (1993). Problemfelder und Perspektiven kooperationsfördernder Software. In U. Konradt, L. Drisis (Eds.), *Software-Ergonomie in der Gruppenarbeit* (pp. 9–22). Leske + Budrich.
- EMT. (2009). *Aladin Mini-Luftaufklärungssystem*. Ingenieurgesellschaft Dipl.-Ing. Hartmut Euer mbH.

- Endsley, M. R. (1988). Situation awareness global assessment technique (SAGAT). In *Proceedings of the IEEE 1988 National Aerospace and Electronics Conference* (pp. 789–795).
- 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(1), 32–64. doi:10.1518/001872095779049543
- Endsley, M. R. (2000). Direct measurement of situation awareness: Validity and use of SAGAT. In M. R. Endsley, D. J. Garland (Eds.), *Situation awareness analysis and measurement* (pp. 131–157). Mahwah, NJ, USA: Lawrence Erlbaum Associates.
- Entin, E. E., Serfaty, D. (1999). Adaptive Team Coordination. *Human Factors: The Journal of the Human Factors and Ergonomics Society*, 41(2), 312–325. doi:10.1518/001872099779591196
- ESG. (2009). *Demonstrator Einsatzkonzept - Agile UAV in vernetzter Umgebung*. Elektroniksystem-und Logistik-GmbH. Fürstenfeldbruck, Deutschland.
- Farrell, W., Jameson, S., Stoneking, C. (2003). Shared situation awareness for Army applications. In *Proceedings of 2003 National Symposium on Sensor and Data Fusion*. San Diego, CA, USA.
- Ferber, J. (1999). *Multi-Agent Systems: An Introduction to Distributed Artificial Intelligence*. Harlow, London, UK: Addison-Wesley/Pearson Education Limited.
- FIPA. (2002). *FIPA ACL Message Structure Specification*. Foundation for Intelligent Physical Agents. Geneva, Switzerland.
- Fitts, P. M. (1951). *Human engineering for an effective air-navigation and traffic-control system*. Ohio State University Research Foundation. Columbus, OH.
- Flemisch, F., Onken, R. (1998). The cognitive assistant system and its contribution to effective man/machine interaction. In *NATO System Concepts and Integration Panel Symposium: The Application of Information Technology (Computer Science) in Mission Systems*. Monterey, CA, USA.
- Flühr, H. (2012). *Avionik und Flugsicherungstechnik* (2nd ed.). Berlin, Heidelberg: Springer-Verlag.
- Franke, J. L., Zaychik, V., Spura, T. M., Alves, E. E. (2005). Inverting the operator/vehicle ratio: Approaches to next generation UAV command and control. In *Proceedings of Association for Unmanned Vehicle Systems International*. Baltimore, MD, USA.
- Frey, A. (2005). *Überwachung und Kontrolle in einem künstlichen kognitiven System zur autonomen Fahrzeugführung*. Dissertation. Universität der Bundeswehr München.
- Gangl, S., Lettl, B., Schulte, A. (2013a). Management of multiple Unmanned Combat Aerial Vehicles from a Single-Seat Fighter Cockpit in manned-unmanned Fighter Missions. In *AIAA Infotech@Aerospace 2013 Conference*. Boston, MA, USA.
- Gangl, S., Lettl, B., Schulte, A. (2013b). Single-Seat Cockpit-based Management of MultipleUCAVs Using On-Board Cognitive Agents for Coordination in Manned-Unmanned Fighter Missions. In *Human-Computer Interaction (HCI) International 2013*. Las Vegas, NV, USA.
- Gangl, S., Lettl, B., Schulte, A. (2014). *Kognitive und Kooperative Automation zur luftgestützte Führung unbemannter Kampfflugzeuge*. Abschlussbericht. Universität der Bundeswehr München.

- General Atomics Aeronautical. (2014). Ground Control Stations. Retrieved from <http://media.ga.com/image-library/unmanned-aircraft-systems/ground-control-stations/>
- Gerken, P., Jameson, S., Sidharta, B., Barton, J. (2003). Improving Army Aviation Situational Awareness with Agent-Based Data Discovery. In *59th American Helicopter Society Conference 2003*. Phoenix, Arizona, USA.
- Grandt, M., Ley, D. (2008). Unterstützung von Entscheidungsprozessen durch benutzerzentrierte Gestaltung von Führungssystemen. In L. Schmidt, C. M. Schlick, J. Grosche (Eds.), *Ergonomie und Mensch-Maschine-Systeme* (pp. 79–102). Berlin, Heidelberg: Springer-Verlag.
- Groth, C., Meitinger, C., Donath, D., Schulte, A. (2006). Missionsauftragsanalyse in COSA als Funktionsmodule eines Pilotenassistenzsystems. In *Deutscher Luft-und Raumfahrtkongress*. Braunschweig, Deutschland.
- Guzzo, R. A., Dickson, M. W. (1996). Teams in organizations: recent research on performance and effectiveness. *Annual Review of Psychology*, 47, 307–338.
- Hacker, W., Pierre, S. (2014). *Allgemeine Arbeitspsychologie: Psychische Regulation von Tätigkeiten* (3rd ed.). Göttingen, Deutschland: Hogrefe Verlag GmbH & Co.KG.
- Hackman, R. J. (1987). The design of work teams. In J. W. Lorsch (Ed.), *Handbook of Organizational Behavior* (pp. 315–342). New York, USA: Prentice-Hall.
- Hart, P., Nilsson, N., Raphael, B. (1968). A formal basis for the heuristic determination of minimum cost paths. *IEEE Transactions of Systems Science and Cybernetics*, (2), 100–107.
- Hart, S. G., Staveland, L. E. (1988). Development of NASA-TLX (Task Load Index): Results of empirical and theoretical research. In P. A. Hancock, N. Meshkati (Eds.), *Human mental workload (Advances in psychology - Book 52)* (pp. 139–183). Amsterdam: Elsevier Science/North-Holland.
- Hazlebeck, T. E. (2011). *United States Air Force Aircraft Accident Investigation Board Report*. Holloman Air Force Base, New Mexiko.
- Herczeg, M. (2009). *Software-Ergonomie: Theorien, Modelle und Kriterien für gebrauchstaugliche interaktive Computersysteme* (3rd ed.). München, Deutschland: Oldenbourg Wissenschaftsverlag GmbH.
- Heron System. (2012). *Operational Manual-Flight Manual* (2nd ed.). TM (GE)HR-05-2.
- Hoc, J.-M. (2001). Towards a cognitive approach to human-machine cooperation in dynamic situations. *International Journal of Human-Computer Studies*, 54(4), 509–540. doi:10.1006/ijhc.2000.0454
- Hollnagel, E., Woods, D. D. (2005). *Joint cognitive systems: Foundations of cognitive systems engineering*. Boca Raton, Florida, USA: CRC Press - Taylor & Francis Group.
- Howitt, S. L., Richards, D. (2003). The human machine interface for airborne control of UAVs. In *2nd AIAA Unmanned Systems, Technologies, and Operations - Aerospace, Land, and Sea Conference and Workshop*. San Diego, CA, USA.
- Hussy, W., Jain, A. (2002). *Experimentelle Hypothesenprüfung in der Psychologie*. Göttingen: Hogrefe-Verlag.
- Hussy, W., Schreier, M., Echterhoff, G. (2013). *Forschungsmethoden in Psychologie und Sozialwissenschaften* (2nd ed.). Berlin, Heidelberg: Springer-Verlag. doi:10.1007/978-3-642-3436-9

- ICAO. (2012). Rules of the Air - No. 43. In *Annex 2 to the Convention on International Civil Aviation*. International Civil Aviation Organization. Chicago.
- International Organization for Standardization. (2004). *DIN EN ISO 6385:2004-05 (D) - Grundsätze der Ergonomie für die Gestaltung von Arbeitssystemen*.
- International Organization for Standardization. (2006). Teil 110: Grundsätze der Dialoggestaltung. In *DIN EN ISO 9241 - Ergonomie der Mensch-System-Interaktion*.
- Jameson, S., Franke, J. (2005). Collaborative Autonomy for Manned/Unmanned Teams. In *American Helicopter Society 61th Annual Forum*. Grapevine, Texas.
- Jennings, N. R. (1996). Coordination techniques for distributed artificial intelligence. In G. M. P. O'Hare, N. R. Jennings (Eds.), *Foundations of Distributed Artificial Intelligence* (pp. 187–210). New York, USA: John Wiley & Sons.
- Johannsen, G. (1993). *Mensch-Maschine-Systeme*. Berlin, Heidelberg, New York: Springer-Verlag.
- Joiko, K., Schmauder, M., Wolff, G. (2006). *Psychische Belastung und Beanspruchung im Berufsleben: Erkennen-Gestalten* (3rd ed.). Dortmund-Dorfstfeld: Bundesanstalt für Arbeitsschutz und Arbeitsmedizin.
- Just, M. A., Carpenter, P. A. (1980). A theory of reading: from eye fixations to comprehension. *Psychological Review*, 87(4), 329–354.
- Kellerer, J. P. (2010). *Untersuchung zur Auswahl von Eingabeelementen für Großflächendisplays in Flugzeugcockpits*. Dissertation. Technische Universität Darmstadt.
- Klein, G. (2001). Features of Team Coordination. In M. McNeese, E. Salas, M. R. Endsley (Eds.), *New Trends in Cooperative Activities: Understanding System Dynamics in Complex Environments* (pp. 68–95). Santa Monica, CA: Human Factors and Ergonomics Society.
- Klein, G., Feltovich, P. J., Jeffrey, B. M., Woods, D. D. (2005). Common ground and coordination in joint activity. In W. B. Rouse, K. R. Boff (Eds.), *Organizational Simulation* (pp. 139–184). Hoboken, NJ, USA: John Wiley & Sons.
- Klien, G., Woods, D. D., Bradshaw, J. M., Hoffman, R. R., Feltovich, P. J. (2004). Ten challenges for making automation a “Team Player” in Joint Human-Agent Activity. *Intelligent Systems, IEEE Computer Society*, 19(6), 91–95.
- König, R., Zoche, P. (1991). Möglichkeiten und Grenzen von “Cooperative Work.” In J. L. Encarnação (Ed.), *Telekommunikation und multimediale Anwendungen der Informatik* (pp. 293–302). Berlin, Heidelberg: Springer-Verlag. doi:10.1007/978-3-642-77060-9_27
- Kriegel, M. (2011). *Wissensbasierte Konfiguration eines unbemannten Fluggerätes als Architekturansatz zur kognitiven Flugführung*. Dissertation. Universität der Bundeswehr München.
- Kriegel, M., Brüggewirth, S., Schulte, A. (2011). Knowledge Configured Vehicle: A layered artificial cognition based approach to decoupling high level UAV mission tasking from vehicle implementation properties. In *AIAA Guidance, Navigation, and Control Conference*. Portland, Oregon, USA.
- Kriegel, M., Schulte, A. (2006). Work System Analysis of the Integration of Autonomous Functions and Intelligent Operator Assistance in UAV Guidance. In *NATO RTO-Meeting Proceedings HFM-135: Human Factors of Uninhabited Military Vehicles as Force Multipliers*. Biarritz, Frankreich.

- Küpfmüller, K. (1959). Informationsverarbeitung durch den Menschen. *Nachrichtentechnische Zeitschrift*, 12(2), 68–74.
- Lahres, B., Rayman, G. (2009). *Objektorientierte Programmierung - Das umfassende Handbuch* (2nd ed.). Bonn: Galileo Press.
- Laird, J. E. (2008). Extending the Soar cognitive architecture. In *Proceedings of the first Artificial General Intelligence*. Memphis, TN, USA: IOS Press.
- Laird, J. E., Newell, A., Rosenbloom, P. S. (1987). SOAR: An Architecture for General Intelligence. *Artificial Intelligence*, 33, 1–64.
- Laminar Research. (2013). *Manual for X-Plane 10 Global, Regional, and Demo versions*.
- Langley, P., Laird, J. E., Rogers, S. (2009). Cognitive architectures: Research issues and challenges. *Cognitive Systems Research*, 10(2), 141–160.
doi:10.1016/j.cogsys.2006.07.004
- Lee, J. D., See, K. A. (2004). Trust in Automation: Designing for Appropriate Reliance. *Human Factors*, 46(1), 50–80.
- Lehman, J. F., Laird, J. E., Rosenbloom, P. (2007). A gentle Introduction to SOAR, an Architecture for Human Cognition: 2006 update.
- Lenz, A., Onken, R. (2000). Pilot's assistant in tactical Military transport Aircraft missions - Crew Assistant Military Aircraft CAMA. In *RTO HFM Symposium on Usability of Information in Battle Management Operations*. Oslo, Norwegen.
- Lettl, B., Schulte, A. (2013). Self-explanation capability for cognitive agents on-board of UCAVs to improve cooperation in a manned-unmanned fighter team. In *AIAA Infotech@Aerospace 2013 Conference*. Boston, MA, USA.
- Link, D., Tietze, H., Schmidt, L., Sievert, A. (2008). Berührungslose Augen- und Blickbewegungsmessung. In L. Schmidt, C. M. Schlick, J. Grosche (Eds.), *Ergonomie und Mensch-Maschine-Systeme* (pp. 371–392). Berlin Heidelberg: Springer-Verlag.
- Maiwald, F. (2013). *Maschinelle Beanspruchungsprädiktion zur ressourcengerechten Adaption eines Pilotenassistenzsystems*. Dissertation. Universität der Bundeswehr München.
- Maiwald, F., Schulte, A. (2011a). Mental Resource Demands Prediction as a Key Element for Future Assistant Systems in Military Helicopters. In *Human-Computer Interaction (HCI) International 2011 Conference- Engineering Psychology and Cognitive Ergonomics*. Orlando, Florida, USA.
- Maiwald, F., Schulte, A. (2011b). *Military Rotorcraft Associate Teaming (MiRA-T)*. Abschlussbericht. Universität der Bundeswehr München.
- Maiwald, F., Schulte, A. (2012). Adaptation of a Human Resource Model by the Use of Machine Learning Methods as Part of a Military Helicopter Pilot Associate System. *Proceedings of the Human Factors and Ergonomics Society Annual Meeting*, 56(1), 970–974.
- Malone, T. W., Crowston, K. (1990). What is coordination theory and how can it help design cooperative work systems? In *Proceedings of the 1990 ACM conference on Computer-supported cooperative work* (pp. 357–370).
- Malone, T. W., Crowston, K. (1994). The interdisciplinary study of coordination. *ACM Computing Surveys*, 26(1), 87–119. doi:10.1145/174666.174668
- Manzey, D. (2012). Systemgestaltung und Automatisierung. In P. Badke-Schaub, G. Hofinger, K. Lauche (Eds.), *Human Factors - Psychologie sicheren Handelns in Risikobranchen* (2nd ed., pp. 333–352). Berlin, Heidelberg: Springer-Verlag.

- Mathieu, J. E., Heffner, T. S., Goodwin, G. F., Salas, E., Cannon-Bowers, J. A. (2000). The influence of shared mental models on team process and performance. *The Journal of Applied Psychology*, 85(2), 273–283.
- Meitinger, C. (2008). *Kognitive Automation zur kooperativen UAV-Flugführung*. Dissertation. Universität der Bundeswehr München.
- Meitinger, C., Schulte, A. (2006a). Cognitive machine co-operation as basis for guidance of multiple UAVs. In *NATO RTO HFM-135 Symposium on Human Factors of Uninhabited Military Vehicles as Force Multipliers*. Biarritz, France.
- Meitinger, C., Schulte, A. (2006b). Human-Centred Automation for UAV Guidance: Oxymoron or Tautology? - The Potential of Cognitive and Co-operative Systems. In *Proceedings of the 1st "Moving Autonomy Forward" Conference*. Lincoln, United Kingdom.
- Meitinger, C., Schulte, A. (2007a). *Algorithmenentwicklung und Simulation zur Schwarmführung vonUCAVs. GARTEUR AG FM-14 - Autonomy in UAVs*. Projektbericht. Universität der Bundeswehr München. UniBwM / LRT13 / IB / 2007-1.
- Meitinger, C., Schulte, A. (2007b). Onboard Artificial Cognition as Basis for Autonomous UAV Co-operation. In *GARTEUR AG FM-14 - Autonomy in UAVs. Technical Proceedings GARTEUR/TP-163*. Group for Aeronautical Research and Technology in Europe.
- Meyer, D. E., Kieras, D. E. (1997). A computational theory of executive cognitive processes and multiple-task performance: Part I. Basic mechanisms. *Psychological Review*, 104(1), 3–65.
- Miller, C. A., Funk, H., Goldman, R., Meisner, J., Wu, P. (2005). Implications of adaptive vs. adaptable UIs on decision making: Why “automated adaptiveness” is not always the right answer. In *Proceedings of the 1st International Conference on Augmented Cognition*. Las Vegas, NV, USA.
- Millot, P., Lemoine, M. P. (1998). An attempt for generic concepts toward human-machine cooperation. In *IEEE International Conference on Systems, Man, and Cybernetics* (pp. 1044–1049). San Diego, CA, USA.
- Mitchell, P., Cummings, M. L. (2005). Management of multiple dynamic human supervisory control tasks. In *10th International Command and Control Research and Technology Symposium (ICCRTS)*. MacLean, VA, USA.
- Moreland, B., Ennis, M., Yeates, R., Condon, T. (2007). Hunter Standoff Killer Team (HSKT) Ground and Flight Test Results. In *Proceedings of SPIE Volume 6578, Defense Transformation and Net-Centric Systems 2007*. doi:10.1117/12.724966
- Nachtigall, C., Wirtz, M. (2009). *Wahrscheinlichkeitsrechnung und Interferenzstatistik - Statistische Methoden für Psychologen Teil 2* (5th ed.). Weinheim, München: Juventa Verlag.
- NATO Standardization Agency. (2012). *STANAG 4586 (Edition 3) - Standard Interfaces of UAV Control System (UCS) for NATO UAV Interoperability*. Brussels, Belgium.
- NUANCE Communications. (2007). *NUANCE VoCon Embedded Development System - Developer's Guide (V2.6-July)*. Merelbeke, Belgien.
- Onken, R., Prevot, T. (1994). CASSY - Cockpit Assistant System for IFR Operation. In *19th International Council of the Aeronautical Sciences (ICAS) Congress*. Anaheim, CA, USA.

- Onken, R., Schulte, A. (2010). *System-Ergonomic Design of Cognitive Automation*. Studies in Computational Intelligence, Volume 235. Springer Berlin Heidelberg. doi:10.1007/978-3-642-03135-9
- Onken, R., Walsdorf, A. (2001). Assistant systems for aircraft guidance: cognitive man-machine cooperation. *Aerospace Science and Technology*, 5(8), 511–520.
- Oppermann, R. (1994). *Adaptive user support: ergonomic design of manually and automatically adaptable software*. Hillsdale, New Jersey: Lawrence Erlbaum Associates.
- Parasuraman, R., Barnes, M. J., Cosenzo, K. (2007). Adaptive automation for human-robot teaming in future command and control systems. *The International C2 Journal*, 1(2), 43–68.
- Parasuraman, R., Miller, C. A. (2004). Trust and Etiquette in High-Criticality Automated Systems. *Communications of the ACM*, 47(4), 51–55.
- Parasuraman, R., Riley, V. (1997). Humans and automation: Use, misuse, disuse, abuse. *Human Factors: The Journal of the Human Factors and Ergonomics Society*, 39(2), 230–253.
- Parasuraman, R., Sheridan, T. B., Wickens, C. D. (2000). A model for types and levels of human interaction with automation. *IEEE Transactions on Systems, Man, and Cybernetics. Part A: Systems and Humans*, 30(3), 286–297.
- Paris, C. R., Salas, E., Cannon-Bowers, J. A. (2000). Teamwork in multi-person systems: a review and analysis. *Ergonomics*, 43(8), 1052–1075.
- Picot, A., Reichwald, R., Wigand, R. T. (2001). *Die grenzenlose Unternehmung - Information, Organisation und Management* (4th ed.). Wiesbaden: Gabler/Springer Fachmedien.
- Platts, J. T., Whitby, J. A., Richards, D. (2009). A Human-Centric Design Process for Highly Autonomous Unmanned Air Systems. *NATO RTO-EN-SCI-208 Advanced Automation Issues Für Supervisory Control in Manned-Unmanned Teaming Missions*.
- Puder, A., Römer, K. (2000). *MICO: An open source CORBA implementation*. Software, IEEE (3rd ed.). dpunkt - Verlag für digitale Technologie GmbH.
- Putzer, H. J. (2004). *Ein uniformer Architekturansatz für kognitive Systeme und seine Umsetzung in ein operatives Framework*. Dissertation. Universität der Bundeswehr München.
- Putzer, H. J., Onken, R. (2001). COSA—A generic approach towards a cognitive system architecture. In *Proceedings of 8th European Conference on Cognitive Science Approaches to Process Control (CSAPC)*. München, Deutschland.
- Putzer, H. J., 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
- Rao, A. S., Georgeff, M. P. (1995). BDI Agents: From Theory to Practice. In *First International Conference on Multi-Agent Systems (ICMAS)*. San Fransisco, CA, USA.
- 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.
- Rauch, N. (2009). *Ein verhaltensbasiertes Messmodell zur Erfassung von Situationsbewusstsein im Fahrkontext*. Dissertation. Julius-Maximilians-Universität Würzburg.

- Rauschert, A. (2013). *Kognitives Assistenzsystem zur Führung unbemannter Luftfahrzeuge in bemannt-unbemannten Flugmissionen*. Dissertation. Universität der Bundeswehr München.
- Rauschert, A., Schulte, A. (2011). Cognitive and cooperative assistant system for aerial manned-unmanned teaming missions. *NATO Research and Technology Organization (RTO), Human Factors and Medical Panel Symposium, Task Group HFM-170 on Supervisory Control of Multiple Uninhabited Systems: Methodology and Enabling Operator Interface Technologies*.
- Ruff, H. A., Calhoun, G. L., Draper, M. H., Fontejon, J. V., Guilfoos, B. J. (2004). Exploring automation issues in supervisory control of multiple UAVs. In *Human Performance, Situation Awareness, and Automation Technology Conference* (pp. 218–222). Daytona Beach, Florida, USA.
- Salas, E., DiazGranados, D., Klein, C., Burke, S. C., Stagl, K. C., Goodwin, G. F., Halpin, S. M. (2008). Does Team Training Improve Team Performance? A Meta-Analysis. *Human Factors: The Journal of the Human Factors and Ergonomics Society*, 50(6), 903–933. doi:10.1518/001872008X375009
- Salas, E., Dickinson, T. L., Converse, S. A., Tannenbaum, S. I. (1992). Toward an understanding of team performance and training. In R. W. Swezey, E. Salas (Eds.), *Teams: Their Training and Performance*. Norwood, NJ: Ablex Publishing.
- Salvucci, D. D. (1999). *Mapping eye movements to cognitive processes*. Dissertation. Carnegie Mellon University Pittsburgh.
- Salvucci, D. D., Goldberg, J. H. (2000). Identifying fixations and saccades in eye-tracking protocols. In *Proceedings of the Eye Tracking Research & Applications Symposium* (pp. 71–78). Palm Beach Gardens, FL, USA.
- Sauter, J. A., Matthews, R., Parunak, H. V. D., Brueckner, S. A. (2005). Performance of digital pheromones for swarming vehicle control. In *4th International Joint Conference on Autonomous Agents and Multiagent Systems (AAMAS 2005)*. Utrecht, Niederlande.
- Schaub, H. (2012). Wahrnehmung, Aufmerksamkeit und Situation Awareness (SA). In P. Badke-Schaub, G. Hofinger, K. Lauche (Eds.), *Human Factors - Psychologie sicheren Handelns in Risikobranchen* (2nd ed., pp. 63–82). Berlin, Heidelberg: Springer-Verlag.
- Schenk, J., Rigoll, G. (2010). *Mensch-Maschine-Kommunikation: Grundlagen von sprach- und bildbasierten Benutzerschnittstellen*. Berlin, Heidelberg: Springer-Verlag. doi:10.1007/978-3-642-05457-0
- Schnell, R., Hill, P. B., Esser, E. (2011). *Methoden der empirischen Sozialforschung* (9th ed.). München, Deutschland: Oldenbourg Wissenschaftsverlag GmbH.
- Schouwenaars, T. (2006). *Safe trajectory planning of autonomous vehicles*. Dissertation. Massachusetts Institute of Technology.
- Schouwenaars, T., Valenti, M., Feron, E., How, J. (2005). Implementation and Flight Test Results of MILP-based UAV Guidance. In *IEEE Aerospace Conference*. Big Sky, MT, USA. doi:10.1109/AERO.2005.1559600
- Schulte, A. (2011). *Flugführung und Automation II*. Vorlesungsskript. Universität der Bundeswehr München.
- Schulte, A., Meitinger, C., Onken, R. (2008). Human factors in the guidance of uninhabited vehicles: oxymoron or tautology? *Cognition, Technology & Work*, 11(1), 71–86. doi:10.1007/s10111-008-0123-2

- Sedlmeier, P., Renkewitz, F. (2013). *Forschungsmethoden und Statistik - Ein Lehrbuch für Psychologen und Sozialwissenschaftler* (2nd ed.). München: Pearson Deutschland GmbH.
- Seeing Machines. (2009). *faceLAB 5 - User Manual*. Canberra, Australia.
- Shah, J., Breazeal, C. (2010). An empirical analysis of team coordination behaviors and action planning with application to human–robot teaming. *Human Factors: The Journal of the Human Factors and Ergonomics Society*, 52(2), 234–245. doi:10.1177/0018720809350882.
- Shannon, C. E. (1948). A mathematical theory of communication. *Bell System Technical Journal*, 27, 379–423.
- Sheridan, T. B. (1992). *Telerobotics, Automation, and Human Supervisory Control*. Cambridge, MA, USA: MIT Press.
- Sheridan, T. B., Verplank, W. L. (1978). *Human and computer control of undersea teleoperators*. Cambridge, MA, USA.
- Špakov, O., Miniotas, D. (2007). Visualization of eye gaze data using heat maps. *Electronics and Electrical Engineering*, 2(74), 55–58.
- Stanton, J. R. (2002). A Users Guide to Spread Version 0.11. Retrieved from <http://www.spread.org/docspread.html>
- Stock, M. (2006). *Can Aerospace Interface Specification for Airborne CAN Applications V 1.7*. Stock Flight Systems.
- Stout, R. J., Cannon-Bowers, J. A., Salas, E., Milanovich, D. M. (1999). Planning, Shared Mental Models, and Coordinated Performance: An Empirical Link Is Established. *Human Factors: The Journal of the Human Factors and Ergonomics Society*, 41(1), 61–71. doi:10.1518/001872099779577273
- Strenzke, R., Uhrmann, J., Benzler, A., Maiwald, F., Rauschert, A., Schulte, A. (2011). Managing Cockpit Crew Excess Task Load in Military Manned-Unmanned Teaming Missions by Dual-Mode Cognitive Automation Approaches. In *AIAA Guidance, Navigation and Control (GNC) Conference*. Portland, Oregon.
- Sundstrom, E., De Meuse, K. P., Futrell, D. (1990). Work Teams: Applications and Effectiveness. *American Psychologist*, 45(2), 120–133.
- Taylor, R. M. (1990). Situational Awareness Rating Technique (SART): The development of a tool for aircrew systems design. *Situational Awareness in Aerospace Operations*, 23–53.
- Teege, G., Eggendorfer, T., Eiseler, V. (2008). *Militärische Kommunikationstechnik*. Norderstedt, Deutschland: Books on Demand GmbH.
- U.S. Department of Defense. (2008). *Common Warfighting Symbolology*. MIL-STD-2525C.
- U.S. Department of Defense. (2011). *Unmanned Systems Integrated Roadmap FY2011-2036*. Reference Number: 11-S-3613.
- U.S. Department of Defense. (2013). *Unmanned System Integrated Roadmap FY2013-2038*. Reference Number: 14-S-0553.
- Uhrmann, J. (2013). *Auftragsbasierte Multi-UAV-Führung aus dem Helikoptercockpit durch kognitive Automation*. Dissertation. Universität der Bundeswehr München.
- Uhrmann, J., Schulte, A. (2011). Task-based Guidance of Multiple UAV Using Cognitive Automation. In *COGNITIVE 2011, The Third International Conference on Advanced Cognitive Technologies and Applications*. Rom, Italien.

- Uhrmann, J., Strenzke, R., Schulte, A. (2010). Human Supervisory Control of Multiple UAVs by use of Task Based Guidance. In *Second International Conference on Humans operating unmanned systems HUMOUS*. Toulouse, France.
- Urban, J. M., Weaver, J. L., Bowers, C. A., Rhodenizer, L. (1996). Effects of workload and structure on team processes and performance: Implications for complex team decision making. *Human Factors: The Journal of the Human Factors and Ergonomics Society*, 32(2), 300–310. doi:10.1177/001872089606380210
- Utt, J., McCalmont, J., Deschenes, M. (2005). Development of a Sense and Avoid System. In *AIAA Infotech@Aerospace 2005 Conference*. Arlington, Virginia, USA.
- Valenti, M., Schouwenaars, T. (2004). Implementation of a manned vehicle-UAV mission system. In *AIAA Guidance, Navigation and Control Conference and Exhibit*. Providence, RI, USA.
- Vohla, M. (2010). *Implementierung von Aufklärungspatterns für unbemannte Rotor- und Flächenflugzeuge in der Simulation*. Bachelorarbeit. Universität der Bundeswehr München.
- Voßkühler, A. (2009). *Ogama Beschreibung (Stand für Version 2.5) - Software zur Aufzeichnung, Analyse und Visualisierung von Blick- und Mausbewegungen*. Freie Universität Berlin, Fachbereich Physik.
- Wang, X., Yadav, V., Balakrishnan, S. N. (2007). Cooperative UAV Formation Flying with Obstacle/Collision Avoidance. *IEEE Transactions on Control Systems Technology*, 15(4), 672–679.
- Watanabe, Y., Calise, A., Johnson, E. (2007). Vision-based obstacle avoidance for UAVs. In *AIAA Guidance, Navigation and Control Conference and Exhibit*. Hilton Head, South Carolina, USA.
- Waydo, S., Hauser, J., Bailey, R., Klavins, E., Murray, R. M. (2007). UAV as a Reliable Wingman: A Flight Demonstration. *IEEE Transactions on Control Systems Technology*, 15(4), 680–688. doi:10.1109/TCST.2007.899172
- Wickens, C. D. (1992). *Engineering Psychology and Human Performance* (2nd ed.). New York, USA: Harper Collins Publishers.
- Wickens, C. D. (2002). Multiple resources and performance prediction. *Theoretical Issues in Ergonomics Science*, 3(2), 159–177.
- Wickens, C. D. (2005). Attentional tunneling and task management. In *Proceedings of the 13th International Symposium on Aviation Psychology* (pp. 600–625).
- Wickens, C. D., Lee, J., Liu, Y., Becker, S. G. (2004). *An Introduction to Human Factors Engineering* (2nd ed.). Upper Saddle River, New Jersey, USA: Pearson Education.
- Wiener, E. L. (1989). *Human Factors of Advanced Technology ("Glass Cockpit") Transport Aircraft*. NASA Ames Research Center. Moffett Field, California, USA.
- Williams, K. W. (2004). *A Summary of Unmanned Aircraft Accident/Incident Data: Human Factors Implications*. FAA Report DOT/FAA/AM-04/24. Oklahoma City, OK, USA.
- Wise, K. (2003). X-45 program overview and flight test status. In *Proceedings of the 2nd AIAA Unmanned Systems, Technologies, and Operations*. San Diego, CA, USA.
- Wohler, M., Schulte, A. (2013). On Board Assistant System for UAS Integration into Civil Airspace. In *AIAA Infotech@Aerospace 2013 Conference*. Boston, MA, USA.
- Wohler, M., Schulte, A. (2014). Mensch-Maschine-Interaktion bei einem dislozierten kognitiven Assistenzsystem zur Flugführung unter Zertifizierungsbedingungen. In 3.

Interdisziplinärer Workshop - Kognitive Systeme: Mensch, Teams, Systeme und Automaten. Magdeburg, Deutschland.

Wohlers, K., Blohm, C. (2007). *Führungskonzept der KZO Drohne Autonomie und Verantwortlichkeiten.* Workshop der DGLR Fachausschüsse. Neubiberg, Deutschland.

Wooldridge, M. (2002). *An Introduction to Multiagent Systems.* Chichester, England, UK: John Wiley & Sons.

Zalesny, M. D., Salas, E., Prince, C. (1995). Conceptual and measurement issues in coordination: Implications for team behavior and performance. In G. R. Ferris (Ed.), *Research in Personnel and Human Resources Management* (pp. 81–115). Bingley, UK: Emerald Group Publishing Limited.

Zühlke, D. (2012). *Nutzergerechte Entwicklung von Mensch-Maschine-Systemen: Useware-Engineering für technische Systeme* (2nd ed.). Berlin, Heidelberg: Springer-Verlag. doi:10.1007/978-3-642-22074-6

B. Abkürzungsverzeichnis

ACC	Area Control Center
ACU	Artificial Cognitive Unit
AMUST	Airborne Manned/Unmanned System Technology
AP	Autopilot
ASC	Agent Supervisory Control
ATC	Air Traffic Control
AV	Abhängige Variable
AWACS	Airborne Warning and Control System
A2C2S	Army Airborne Command and Control System
BDA	Battle Damage Assessment
BKS	Bodenkontrollstation
CAMA	Crew Assistant Military Aircraft
CAMU	Communication and Audio Management Unit
CAN	Controller Area Network
CAP	Combat Air Patrol
CASM	Command, Authorisation and Situation Manager
CASSY	Cockpit Assistant System
CGF	Computer Generated Forces
COSA	Cognitive System Architecture
DARPA	Advanced Research Projects Agency
DASS	Defensive Aids Sub System
DVI	Direct Voice Input
EFIS	Electronic Flight Instrument System
FCS	Flight Control System
FLOT	Forward Line of Own Troops
FMS	Flight Management System
FO	First Officer
FW	Fixed Wing
GF	Grundforderung
GPWS	Ground Proximity Warning System
HARM	High-Speed-Anti-Radiation Missile
HEMS	Helicopter Emergency Medical Services
HOTAS	Hands On Throttle-And-Stick
HSKT	Hunter Standoff Killer Team
HUD	Head-Up Display
HUP	Head-Up Panel
ICAO	International Civil Aviation Organization
IDS	Interdiction Strike
IFF	Introduction to Fighter Fundamentals
IPC	Inter-Process Communication
JCDB	Joint Common Data Base

J-UCAS	Joint Unmanned Combat Air Systems
KCV	Knowledge Configured Vehicle
KIM	Koordinationsinformationsmanager
KP	Kognitiver Prozess
LOA	Level of Automation
LOI	Level of Interoperability
MAS	Mensch-Agenten-Schnittstelle
MASS	Master Armament Safety Switch
MAW	Missile Approach Warner
MCA	Mobile Commander's Associate
MHDD	Multifunctional Head Down Display
MIDS	Multifunctional Information Distribution System
MMS	Mensch-Maschine-Schnittstelle
MUM-T	Manned-Unmanned-Teaming
NL	Natural Language
OCU	Operating Cognitive Unit
OF	Operating Force
OSM	Operation Supporting Means
PACT	Pilot Authorisation and Control of Tasks
PIC	Pilot in Command
RECCE	Reconnaissance
RoE	Rules of Engagement
RPAS	Remotely Piloted Aircraft System
RWR	Radar Warning Receiver
SAGAT	Situation Awareness Global Assessment Technique
SAM	Surface-to-Air Missile
SART	Situation Awareness Rating Technique
SCU	Supporting Cognitive Unit
SEAD	Suppression of Enemy Air Defenses
SEC	Software Enabled Control
SEK	Selbsterklärungs-komponente
TBG	Task Based Guidance
TCAS	Traffic Alert and Collision Avoidance System
TKM	Teamkoordinationsmodul
TLX	Task Load Index
UAV	Unmanned Aerial Vehicle
UAS	Unmanned Aircraft System
UCAR	Unmanned Combat Armed Rotorcraft
UCAV	Unmanned Combat Aerial Vehicle
UV	Unabhängige Variable
VK	Versuchskonfiguration
VP	Versuchsperson
WA	Warfighter's Associate
WSO	Waffensystemoffizier
ZertAP	Zertifizierbarer Autopilot

C. Experimentelle Messdaten

C.1 Leistungsmaße

C.1.1 Missionsparameter

Mission	VP 1	VP 2	VP 3	VP 4	VP 5	VP 6
A	x	x	x	x	x	x
B	x	x	x	x	-	x
C	-	x	x	x	x	-
D	x	x	x	-	x	x
E	x	x	x	x	x	x

Tabelle C.1: Erzielte Missionserfolge

Mission	VP 1		VP 2		VP 3		VP 4		VP 5		VP 6	
	a	i	a	i	a	i	a	i	a	i	a	i
A	39,6	591,6	118,2	479,1	32,1	497,4	124,3	391,2	28,0	571,5	24,6	575,4
B	0	615,3	0	609	0	566,8	0	624,0	0	706,1	0	590
C	118,1	695,3	131,3	528,8	51,5	524,6	121,3	694,6	69,2	642,9	0	0
D	0	571,6	0	693,2	0	593,3	0	0	0	580,4	0	607,6
E	130,5	200,4	255,2	36,8	100,7	0	112,9	0	122,6	9,1	68,4	86,8
Mission	Unbemanntes Team											
	a	i	a	i	a	i	a	i	a	i	a	i
A	456	2626	1108	2432	547	2329	1321	2257	414	2716	466	2544
B	982	3043	405	3220	317	3733	435	3536	575	1939	1291	3989
C	1024	2205	1101	4281	661	3049	883	5805	1406	4015	1312	2085
D	2618	6252	807	3927	1056	3761	850	1533	806	3519	925	3610
E	390	821	104	159	319	451	102	20	437	474	260	663

Tabelle C.2: Verweildauer des bemannten Kampfflugzeuges und des unbemannten Teams in aktiven (a) und inaktiven (i) Bedrohungen in Sekunden

C.1.2 Unbemannte Teammitglieder

Mission	VP 1		VP 2		VP 3		VP 4		VP 5		VP 6	
	Z	W	Z	W	Z	W	Z	W	Z	W	Z	W
A	166,4	5	151,1	3,9	268,7	0,2	132,4	12,2	358,6	16,2	193,3	7,5
B	162,4	5,2	200,9	12,6	275,7	6,4	95,8	4,8	753,5	-	185,6	14,2
C	150,3	-	144,3	15,8	377,8	6,3	276,7	3,6	62	6,7	214,7	-
D	102,3	5,1	125,9	4,9	450,9	3,1	80,8	-	260,2	11,2	376,8	23,3
E	210,8	-	319,5	-	355,7	-	361,6	-	350,1	-	372,4	-

Tabelle C.3: Verfügbarkeit der Bilder zur Zielverifizierung (Z) vor dem Abwurf der Bombe sowie der Bilder zur Wirkungsaufnahme (W) nach dem Waffeneinschlag in Sekunden

Mission	VP 1			VP 2			VP 3			VP 4			VP 5			VP 6		
	b	u	H	b	u	H	b	u	H	b	u	H	b	u	H	b	u	H
A	2	1	4	2	0	2	2	0	2	3	0	3	2	1	3	2	1	4
B	3	-	3	3	-	3	3	-	3	3	-	3	3	-	3	3	-	4
C	3	1	4	4	0	4	4	0	4	4	0	4	4	0	4	3	0	3
D	4	-	4	3	-	3	3	-	3	2	-	2	3	-	3	3	-	3
E	2	0	2	2	0	2	2	0	2	2	0	2	2	0	2	2	1	3

Tabelle C.4: Anzahl der unterdrückten bekannten (b) und unbekannt (u) Bedrohungen sowie die dafür eingesetzten HARMs (H)

C.1.3 Abweichungen

Mission	VP 1				VP 2				VP 3			
	A	B	C	D	A	B	C	D	A	B	C	D
A	7	5	23	3	4	30	7	9	12	3	9	6
B	1	4	34	6	3	28	29	0	1	4	2	3
C	75	85	68	-	5	179	88	3	29	209	90	1
D	1	7	12	3	6	8	11	1	8	0	61	217
E	1	9	0	-	16	12	0	-	5	15	0	-

Mission	VP 4				VP 5				VP 6			
	A	B	C	D	A	B	C	D	A	B	C	D
A	13	13	22	6	27	0	43	20	24	40	39	15
B	6	1	8	3	44	22	0	-	29	41	22	8
C	20	110	245	316	30	725	608	7	67	72	59	-
D	8	8	0	-	9	49	40	4	17	73	110	10
E	8	6	0	-	16	1	0	-	2	10	0	-

Tabelle C.5: Mittlere zeitliche Abweichungen zwischen der Ist- und Soll-Position des bemannten Kampfflugzeuges in den Missionsphasen (A)-(D) in Sekunden

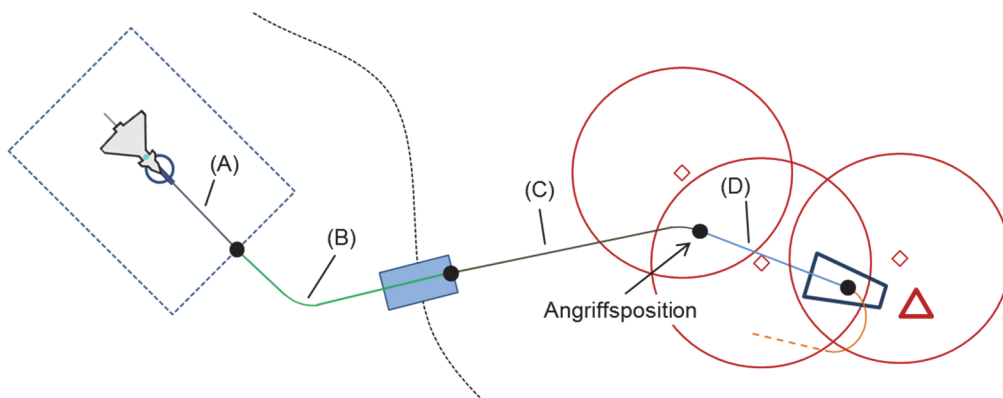


Abbildung C.1: Missionsphasen (A bis D) im Hinflug

C.2 Verhaltensmaße

C.2.1 Qualität der aufgezeichneten Blickdaten zur Aufmerksamkeitsbestimmung

Mission	VP 1		VP 2		VP 3		VP 4		VP 5		VP 6	
	d	n	d	n	d	n	d	n	d	n	d	n
A	93731	88,6	93678	81,8	102279	55,3	97332	68,0	98017	83,9	83543	69,9
B	88520	83,1	83931	75,5	92253	72,5	102109	89,4	114245	85,7	120104	72,2
C	128912	80,4	140927	69,0	147950	68,0	163253	73,9	168480	75,4	131590	52,9
D	124320	75,8	101866	75,8	103112	66,1	94033	68,5	97533	80,0	94408	53,5
E	102605	87,7	102586	74,9	90191	49,1	122618	70,3	96844	71,7	95317	61,7

Tabelle C.6: Anzahl der aufgenommenen (d) und die davon nutzbaren (n) Blickbewegungsdatensätze in Prozent

C.2.2 Betrachtung der Head-Down und Head-Up Zeiten

Mission	VP 1				VP 2				VP 3			
	Hinflug		Rückflug		Hinflug		Rückflug		Hinflug		Rückflug	
	d	u	d	u	d	u	d	u	d	u	d	u
A	880	67	430	84	861	161	253	156	890	124	446	53
B	969	255	322	89	1015	151	340	46	1104	145	313	76
C	1179	292	423	101	1445	211	388	182	1103	305	369	338
D	1312	264	271	68	1026	155	252	167	1014	121	235	60
E	895	170	365	148	825	201	389	202	646	189	286	73
Mission	VP 4				VP 5				VP 6			
	Hinflug		Rückflug		Hinflug		Rückflug		Hinflug		Rückflug	
	d	u	d	u	d	u	d	u	d	u	d	u
A	1072	91	272	97	1027	88	377	37	788	78	331	43
B	994	211	367	59	1689	100	341	8	1363	86	385	16
C	1876	163	490	114	1897	121	554	42	1508	79	280	7
D	1106	118	245	10	1013	106	320	41	924	106	303	30
E	776	124	625	337	921	72	330	62	933	50	343	157

Tabelle C.7: Erfasste Head-Up (u) und Head-Down (d) Zeiten in Sekunden

C.2.3 Aufmerksamkeitsverteilung im Cockpit

Mission	VP 1			VP 2			VP 3		
	TL	T	M	TL	T	M	TL	T	M
A	18,3	9,3	56,8	24,4	15,8	55,4	20,9	4,5	68,0
B	6,1	10,4	74,7	22,8	9,8	64,4	26,9	8,0	59,7
C	-	22,7	66,6	-	14,0	83,5	-	8,1	81,3
D	16,8	19,3	56,2	38,2	13,8	42,8	26,0	9,8	53,7
E	19,5	8,2	57,4	16,7	13,8	64,3	28,9	15,6	47,7

Tabelle C.8: Aufmerksamkeitsverteilung im Cockpit für die MHDD-Seiten Timeline-Page (TL), Team-Page (T) und Kartendisplay (M) im Hinflug in Prozent (VP 1 bis VP 3)

Mission	VP 4			VP 5			VP 6		
	TL	T	M	TL	T	M	TL	T	M
A	17,5	11,6	65,6	20,1	4,4	65,7	9,1	14,3	68,5
B	18,2	8,2	69,6	15,8	8,9	62,5	9,7	4,8	71,9
C	-	14,7	74,5	-	17,9	76,6	-	11,9	83,9
D	18,0	26,0	54,1	33,6	6,6	49,1	12,8	8,4	66,3
E	18,7	17,1	62,3	18,4	4,6	70,7	10,2	7,2	75,4

Tabelle C.9: Aufmerksamkeitsverteilung im Cockpit für die MHDD-Seiten Timeline-Page (TL), Team-Page (T) und Kartendisplay (M) im Hinflug in Prozent (VP 4 bis VP 6)

Mission	VP 1			VP 2			VP 3		
	TL	T	M	TL	T	M	TL	T	M
A	7,3	5,9	64,7	20,1	10,5	58,0	7,7	1,2	82,9
B	11,3	5,2	71,9	0,0	6,0	67,8	25,1	0,0	69,6
C	-	12,2	75,0	-	6,5	83,1	-	7,3	75,1
D	15,5	17,3	53,2	12,6	12,2	69,3	13,1	8,1	61,0
E	5,8	22,1	60,5	2,3	32,8	64,8	20,4	12,3	63,6
Mission	VP 4			VP 5			VP 6		
	TL	T	M	TL	T	M	TL	T	M
A	4,2	4,9	84,4	6,2	2,5	74,8	5,0	6,9	78,8
B	4,5	16,6	68,0	5,4	23,3	70,8	6,5	5,2	75,8
C	-	10,9	83,1	-	5,5	85,0	-	20,5	61,7
D	3,2	15,9	78,9	8,7	3,7	70,0	10,1	12,7	51,4
E	4,4	10,4	79,8	0,0	7,8	74,4	14,5	11,0	70,0

Tabelle C.10: Aufmerksamkeitsverteilung im Cockpit für die MHDD-Seiten Timeline-Page (TL), Team-Page (T) und Kartendisplay (M) im Rückflug in Prozent

C.2.4 Flugführung und Missionsmanagement

Mission	VP 1		VP 2		VP 3		VP 4		VP 5		VP 6	
	H	R	H	R	H	R	H	R	H	R	H	R
A	62,1	60,7	77,0	72,1	62,9	59,3	47,1	41,7	52,8	50,0	63,7	60,1
B	77,6	69,0	55,5	54,1	72,8	71,3	72,0	66,2	53,0	52,9	41,6	37,9
C	87,0	85,2	63,2	56,4	86,1	81,0	60,8	55,9	58,2	56,4	56,8	55,4
D	58,4	55,3	47,4	48,7	76,0	76,5	44,8	45,4	60,6	55,3	58,0	56,0
E	61,2	57,3	71,2	65,0	74,8	78,3	58,7	71,0	54,8	49,4	60,4	57,7

Tabelle C.11: Anteilige Aufmerksamkeit für das Missionsmanagement auf dem Kartendisplay im Hinflug (H) und Rückflug (R) in Prozent

Mission	VP 1		VP 2		VP 3		VP 4		VP 5		VP 6	
	H	R	H	R	H	R	H	R	H	R	H	R
A	58,4	42,5	69,8	39,8	59,7	46,9	55,3	23,2	54,5	37,5	61,1	46,6
B	59,0	42,9	59,5	36,0	69,3	41,8	63,1	46,9	54,6	64,3	41,7	34,7
C	64,6	29,6	58,2	29,6	61,2	26,1	55,2	41,7	58,8	46,6	56,6	48,9
D	57,4	45,8	62,8	36,0	68,4	54,4	61,6	53,8	63,3	42,0	53,5	45,3
E	52,8	40,3	61,3	44,1	62,0	48,7	62,4	33,3	57,3	31,4	59,7	43,1

Tabelle C.12: Anteilige Aufmerksamkeit für das Missionsmanagement im Cockpit im Hinflug (H) und Rückflug (R) in Prozent

C.2.5 Assistenzsystemmeldungen

10,2	2,6	2,8	4,0	4,2	3,2	3,8	1,8	1,6	1,8	2,6	2,8	2,6	2,2	6,0
3,0	3,0	10,0	3,0	2,3	2,4	3,2	1,2	2,6	2,0	2,8	4,7	2,8	2,1	5,0
4,2	2,6	3,8	1,8	5,6	2,4	3,4	4,6	3,8	9,3	1,6	5,2	2,6	9,2	10,2
1,6	2,2	2,6	1,8	4,2	2,8	2,4	5,0	5,4	3,2	2,4	2,2	4,6	2,6	2,6
2,8	2,2	2,2	2,2	2,2	3,0	2,4	3,0	2,0	2,0	3,6	3,4	7,8	1,7	3,2
3,2	2,7	11,8	3,4	7,8	2,4	10,2	2,4	1,8	4,3	2,2	8,6	4,0	2,0	1,7
2,4	2,4	1,6	2,0	2,2	10,0	6,6	2,6	3,8	1,8	7,8	1,8	5,2	3,6	2,4
1,8	4,8	1,8	2,6	3,0	8,1	2,2	4,4	10,2	10,1	8,2	5,4	8,4	3,7	-

Tabelle C. 13: Zeitdauer von der Anzeige einer Assistenzsystemmeldung bis zur Durchführung einer Maßnahme zur Behebung des Missstandes in Sekunden

C.2.6 Auswertung von Bildmaterial

Mission	VP 1		VP 2		VP 3		VP 4		VP 5		VP 6	
	Z	S	Z	S	Z	S	Z	S	Z	S	Z	S
A	4,4	5,7	18,0	8,9	1,9	8,5	8,6	10,3	2,3	10,8	2,9	2,0
B	3,7	2,5	7,2	5,2	4,2	2,7	2,7	5,7	3,9	-	10,2	4,2
C	3,4	-	6,3	7,0	9,3	11,5	20,6	5,3	12,2	3,4	-	-
D	7,4	3,9	13,6	1,7	15,3	2,0	6,8	-	7,9	4,4	6,8	-
E	26,5	-	23,5	-	19,9	-	29,8	-	65,4	-	28,9	-

Tabelle C. 14: Dauer der Zielverifizierung (Z) und Schadensbeurteilung (S) in Sekunden

C.3 Subjektive Maße

C.3.1 NASA-TLX

	A-1	A-2	A-3	B-1	B-2	B-3	C-1	C-2	C-3	D-1	D-2	D-3	E-1	E-2	E-3
VP 1	15,0	13,3	11,3	17,0	15,3	17,3	17,0	23,0	-	23,3	23,0	19,3	13,7	18,0	14,0
VP 2	19,0	22,0	21,0	18,7	21,7	18,0	23,7	29,0	23,7	17,0	14,0	16,7	10,7	12,3	12,3
VP 3	46,7	63,3	64,0	49,0	47,7	44,3	51,3	38,7	45,7	58,7	49,3	53,3	39,3	24,0	30,0
VP 4	57,7	59,0	58,3	44,0	54,0	54,3	64,7	69,0	62,0	45,7	-	-	45,0	44,0	42,7
VP 5	34,0	30,3	31,3	33,3	41,0	-	43,7	53,0	41,7	23,3	22,7	21,7	28,3	22,3	23,3
VP 6	30,0	34,7	46,3	29,7	42,7	41,3	21,0	-	-	44,7	31,7	37,7	24,3	27,0	23,7

Tabelle C.15: Erhobene NASA-TLX Werte in Prozent

Dimension	VP 1														
	A-1	A-2	A-3	B-1	B-2	B-3	C-1	C-2	C-3	D-1	D-2	D-3	E-1	E-2	E-3
Geistige A.	26,7	30,0	35,3	31,4	26,1	34,6	23,5	21,7	-	11,4	26,1	31,0	22,0	27,8	28,6
Körperliche A.	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	-	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
Zeitliche A.	40,0	22,5	26,5	23,5	43,5	30,8	31,4	34,8	-	28,6	34,8	13,8	39,0	29,6	28,6
Leistung	33,3	37,5	29,4	29,4	21,7	19,2	29,4	29,0	-	42,9	21,7	34,5	24,4	27,8	35,7
Anstrengung	0,0	10,0	8,8	15,7	8,7	15,4	15,7	14,5	-	17,1	17,4	20,7	14,6	14,8	7,1
Frustration	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	-	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0

Dimension	VP 2														
	A-1	A-2	A-3	B-1	B-2	B-3	C-1	C-2	C-3	D-1	D-2	D-3	E-1	E-2	E-3
Geistige A.	43,9	45,5	39,7	53,6	53,8	55,6	45,1	51,7	42,3	49,0	59,5	60,0	46,9	54,1	54,1
Körperliche A.	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
Zeitliche A.	28,1	30,3	31,7	21,4	24,6	22,2	35,2	27,6	33,8	39,2	28,6	24,0	37,5	32,4	32,4
Leistung	21,1	18,2	19,0	21,4	13,8	16,7	16,9	17,2	16,9	5,9	7,1	12,0	9,4	8,1	8,1
Anstrengung	7,0	6,1	9,5	3,6	6,2	3,7	2,8	2,3	5,6	3,9	4,8	4,0	6,3	5,4	5,4
Frustration	0,0	0,0	0,0	0,0	1,5	1,9	0,0	1,1	1,4	2,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0

Dimension	VP 3														
	A-1	A-2	A-3	B-1	B-2	B-3	C-1	C-2	C-3	D-1	D-2	D-3	E-1	E-2	E-3
Geistige A.	21,4	25,3	29,2	32,7	25,2	30,1	19,5	44,8	19,0	29,5	43,9	15,0	42,4	33,3	44,4
Körperliche A.	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
Zeitliche A.	35,7	14,7	20,3	24,5	25,2	22,6	13,0	12,1	30,7	23,9	12,2	43,8	15,3	13,9	11,1
Leistung	28,6	13,7	10,4	27,2	22,4	37,6	18,2	25,9	25,5	11,4	16,2	13,1	16,9	34,7	31,1
Anstrengung	14,3	27,4	36,5	13,6	25,2	9,0	3,9	15,5	23,4	34,1	27,0	25,0	23,7	16,7	13,3
Frustration	0,0	18,9	3,6	2,0	2,1	0,8	45,5	1,7	1,5	1,1	0,7	3,1	1,7	1,4	0,0

Tabelle C.16: Zusammensetzung der subjektiven Beanspruchung in Prozent (VP 1 bis VP 3)

Experimentelle Messdaten

Dimension	VP 4														
	A-1	A-2	A-3	B-1	B-2	B-3	C-1	C-2	C-3	D-1	D-2	D-3	E-1	E-2	E-3
Geistige A.	32,4	23,7	24,0	36,4	18,5	25,8	23,2	30,9	27,4	26,3	-	-	32,6	30,3	25,0
Körperliche A.	1,7	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	-	-	0,0	0,0	0,0
Zeitliche A.	30,1	29,4	24,0	33,3	34,6	23,9	18,6	10,6	5,4	40,9	-	-	26,7	19,7	9,4
Leistung	5,8	10,2	13,7	9,1	9,3	12,3	8,2	4,3	24,2	8,8	-	-	6,7	4,5	14,1
Anstrengung	30,1	33,9	34,3	16,7	34,0	34,4	38,7	41,1	32,3	21,9	-	-	32,6	41,7	37,5
Frustration	0,0	2,8	4,0	4,5	3,7	3,7	11,3	13,0	10,8	2,2	-	-	1,5	3,8	14,1

Dimension	VP 5														
	A-1	A-2	A-3	B-1	B-2	B-3	C-1	C-2	C-3	D-1	D-2	D-3	E-1	E-2	E-3
Geistige A.	49,0	54,9	53,2	50,0	52,8	-	38,2	31,4	28,0	50,0	51,5	53,8	58,8	52,2	50,0
Körperliche A.	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	-	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
Zeitliche A.	39,2	44,0	42,6	40,0	42,3	-	30,5	25,2	22,4	40,0	41,2	43,1	32,9	41,8	40,0
Leistung	2,9	1,1	1,1	4,0	3,3	-	5,3	4,4	1,6	10,0	2,9	3,1	8,2	6,0	10,0
Anstrengung	8,8	0,0	3,2	6,0	0,0	-	3,1	1,3	0,0	0,0	4,4	0,0	0,0	0,0	0,0
Frustration	0,0	0,0	0,0	0,0	1,6	-	22,9	37,7	48,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0

Dimension	VP 6														
	A-1	A-2	A-3	B-1	B-2	B-3	C-1	C-2	C-3	D-1	D-2	D-3	E-1	E-2	E-3
Geistige A.	31,1	33,7	36,0	31,5	28,1	24,2	33,3	-	-	11,9	31,6	31,0	27,4	14,8	16,9
Körperliche A.	0,0	0,0	2,2	1,1	0,0	2,4	4,8	-	-	0,0	2,1	1,8	1,4	1,2	1,4
Zeitliche A.	22,2	23,1	8,6	22,5	21,1	29,0	19,0	-	-	20,1	15,8	24,8	21,9	24,7	22,5
Leistung	33,3	28,8	31,7	33,7	31,3	32,3	19,0	-	-	19,4	42,1	31,9	41,1	49,4	50,7
Anstrengung	13,3	13,5	21,6	11,2	16,4	12,1	23,8	-	-	22,4	8,4	10,6	8,2	9,9	8,5
Frustration	0,0	1,0	0,0	0,0	3,1	0,0	0,0	-	-	26,1	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0

Tabelle C.17: Zusammensetzung der subjektiven Beanspruchung in Prozent (VP 4 bis VP 6)

C.4 Situationsbewusstsein

C.4.1 Situational Awareness Rating Technique (SART)

Dimension	VP 1					VP 2					VP 3					VP 4					VP 5					VP 6				
	A	B	C	D	E	A	B	C	D	E	A	B	C	D	E	A	B	C	D	E	A	B	C	D	E	A	B	C	D	E
F01	4	7	7	7	7	3	4	4	3	3	5	4	5	3	2	6	3	6	4	2	2	2	2	5	5	3	2	3	4	3
F02	7	7	6	5	6	4	2	5	3	5	4	2	5	2	3	5	3	5	5	3	5	2	6	5	5	2	1	3	3	3
F03	7	2	4	5	5	4	2	6	2	5	4	2	4	2	5	5	3	2	6	4	4	2	6	3	5	2	1	5	2	4
F04	7	6	7	7	7	5	5	5	5	5	6	6	6	5	6	5	4	6	4	5	6	6	6	5	6	7	6	6	5	6
F05	5	6	6	7	6	5	2	5	5	6	6	5	6	6	4	4	4	6	7	5	6	6	6	6	6	2	6	6	5	4
F06	3	6	5	5	5	6	6	6	7	6	2	4	3	3	5	4	3	2	5	5	6	6	6	6	6	5	6	3	4	3
F07	7	6	7	7	6	6	6	5	6	6	6	6	5	5	4	5	4	6	5	5	5	6	6	5	6	6	7	5	4	6
F08	7	6	7	5	6	4	4	6	5	6	2	5	6	5	6	5	5	2	4	4	5	6	6	6	6	5	7	6	6	7
F09	7	6	6	5	6	6	2	5	5	6	6	6	5	5	6	6	5	4	5	5	5	6	4	5	6	7	6	5	3	6
F10	1	6	6	5	6	5	5	5	6	6	2	5	4	5	6	6	5	5	4	4	4	5	6	5	6	6	6	5	6	4

Tabelle C.18: Subjektive Bewertungen des Situationsbewusstseins (10D-Methode)

C.4.2 Situation Awareness Global Assessment Technique (SAGAT)

	A-1	A-2	A-3	B-1	B-2	B-3	C-1	C-2	C-3	D-1	D-2	D-3	E-1	E-2	E-3
VP 1	57,1	41,7	28,6	83,3	50,0	58,3	38,9	60,0	-	92,9	50,0	58,3	60,0	50,0	57,1
VP 2	92,9	64,3	64,3	50,0	30,0	33,3	38,9	66,7	33,3	78,6	50,0	70,0	40,0	50,0	21,4
VP 3	64,3	64,3	57,1	30,0	10,0	16,7	66,7	50,0	100	92,9	60,0	83,3	30,0	50,0	28,6
VP 4	78,6	64,3	50,0	66,7	70,0	41,7	77,8	66,7	100	90,0	-	-	12,5	16,7	50,0
VP 5	83,3	71,4	92,9	91,7	83,3	-	72,2	71,4	66,7	92,9	25,0	100	90,0	90,0	64,3
VP 6	42,9	57,1	42,9	83,3	40,0	83,3	61,1	-	-	85,7	60,0	66,7	90,0	66,7	50,0

Tabelle C.19: Ergebnisse der Positionsbestimmung in Prozent – SAGAT Teil 1

	A-1	A-2	A-3	B-1	B-2	B-3	C-1	C-2	C-3	D-1	D-2	D-3	E-1	E-2	E-3
VP 1	78,6	85,7	71,4	85,7	78,6	57,1	28,6	71,4	-	50,0	42,9	64,3	71,4	78,6	50,0
VP 2	64,3	92,9	64,3	78,6	71,4	85,7	28,6	85,7	78,6	50,0	100	50,0	71,4	64,3	57,1
VP 3	71,4	92,9	50,0	64,3	92,9	78,6	28,6	92,9	78,6	64,3	64,3	57,1	64,3	78,6	28,6
VP 4	85,7	78,6	42,9	57,1	78,6	71,4	7,1	92,9	57,1	85,7	-	-	57,1	92,9	78,6
VP 5	78,6	100	57,1	64,3	50,0	-	14,3	42,9	50,0	64,3	71,4	50,0	50,0	85,7	50,0
VP 6	42,9	71,4	57,1	85,7	85,7	57,1	14,3	-	-	50,0	57,1	57,1	50,0	50,0	42,9

Tabelle C.20: Ergebnisse des Frageteils in Prozent – SAGAT Teil 2