

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

Variable Automationsgrade in der UAV-Missionsführung

Dipl.-Ing. Georg Rudnick (MBE)

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.)

angenommenen Dissertation.

Gutachter:

1. Univ.-Prof. Dr.-Ing. Axel Schulte
2. Univ.-Prof. Dr.-Ing. Volker Gollnick

Diese Dissertation wurde am 09.06.2023 bei der Universität der Bundeswehr München eingereicht und durch die Fakultät für Luft- und Raumfahrttechnik am 31.01.2024 angenommen. Die mündliche Prüfung fand am 03.04.2024 statt.

Für meine Familie

Danksagung

Die hier vorgestellte Arbeit ist das Produkt meiner wissenschaftlichen Tätigkeit am Institut für Flugsysteme der Fakultät für Luft- und Raumfahrttechnik an der Universität der Bundeswehr München. Ich möchte mich an dieser Stelle bei all denen bedanken, ohne die ich dieses Werk nicht hätte abschließen können.

Eine herausragende Rolle nimmt dabei mein Doktorvater Herr Univ.-Prof. Dr.-Ing. Axel Schulte ein, für dessen Anleitung, Unterstützung und das Vertrauen ich mich hiermit bedanke! Durch seine Arbeit ist ein Institut entstanden, dessen Möglichkeiten und Freiräume für Doktoranden ich immer genossen habe. Außerdem haben mir die zahllosen Gespräche mit ihm stets geholfen und meine Perspektive erweitert.

Ebenfalls danke ich Herrn Univ.-Prof. Dr.-Ing. Volker Gollnick für die Übernahme des Zweitgutachtens und das große Interesse an den Inhalten meiner Arbeit.

Herrn Univ.-Prof. Dr.-Ing. Peter Stütz danke ich für viele interessante Gespräche, nicht nur fachliche Anregungen und für die Ausübung des Vorsitzes der Prüfungskommission.

Während der gesamten Projektlaufzeit und besonders im anstrengenden Teil der Experimentalkampagne haben sich die Mitglieder des CASIMUS-Teams gegenseitig unterstützt. Wir haben zusammen etwas Großes erreicht. Für die Motivation, die ich daraus ziehen konnte, bin ich sehr dankbar!

Das Werkstatt Team um Alex Gebhardt verdient meinen Dank für die Ideen, kurzfristigen Umbauten und das Einfangen verrücktspielender Agenten in der Luft.

Allen Mitarbeitern des Instituts danke ich für die kollegiale Zusammenarbeit und das angenehme Arbeitsklima. Dabei möchte ich Dr.-Ing. Diana Donath hervorheben, die durch Ihre Erfahrung so manche Woge glätten konnte.

Für die Unterstützung in den Realflugexperimenten und die schöne Zeit im Labor und draußen bedanke ich mich bei Carsten Meyer.

Mein ganz besonderer Dank gilt meiner Frau Alisa, die mich auf dieser Reise von Anfang an begleitet und unterstützt hat.

Georg Rudnick

Oktober 2024

Kurzfassung

Diese Arbeit präsentiert ein neuartiges Systemkonzept zur Multi-UAV-Missionsführung, welches dem Operateur Zugriff auf Funktionen unterschiedlicher Automatisierung erlaubt. Dabei stehen als höchster Automationsgrad die auftragsbasierte Führung und als niedrigster Eingriff die Wegpunkteingabe in das Flugführungssystem der UAVs zur Verfügung. Die Flexibilität, die dieser variabel einstellbare Automationsgrad erlaubt, macht eine effektive Missionsdurchführung in einem realen Szenario erst möglich, was im Laufe der Arbeit genauer begründet wird. Das Konzept erlaubt den Zugriff auf niedrig automatisierte Funktionen jedoch nur, nachdem der Bediener seine Intention in Form eines Auftrags an das System übermittelt hat. Der Zugriff erfolgt dann nicht frei, sondern wird durch einen aus dem Auftrag erstellten hierarchischen Plan geführt. Dies stellt sicher, dass die kognitiven Ressourcen des technischen Systems nicht ausgekoppelt werden und somit die Missionsleistung des Mensch-Maschine-Verbundes optimiert wird.

Das Konzept wurde für den Anwendungsfall militärischer Aufklärungsdrohnen in Form eines kognitiven Agenten implementiert und mithilfe von experimentellen Missionen in Simulation und Realflug untersucht. Dazu fand eine Experimentalkampagne mit einem Hubschraubersimulator und Piloten der Bundeswehr statt, in welcher der Hubschrauber durch drei simulierte UAVs bei der Aufklärung sicherer Flugwege unterstützt wurde. Die UAVs wurden dabei vom Kommandanten des Hubschraubers mithilfe des vorgestellten Systemkonzepts geführt (Manned-Unmanned-Teaming). In einem weiteren Experiment wurde die Eignung des Konzepts zur Führung eines real fliegenden Aufklärungs-UAVs aus einer Bodenkontrollstation untersucht und mit der Möglichkeit frei auf alle Automationsfunktionen zuzugreifen verglichen. Die Ergebnisse zeigen, dass der geführte Zugriff zu einer höheren Missionsleistung beiträgt, was vor allem auf der größeren Flexibilität in der Führung und der Möglichkeit des Systems bei der Fehlervermeidung zu unterstützen basiert.

Abstract

This work presents a novel system concept for multi-UAV mission guidance, which allows the operator access to functions with different levels of automation. The highest level of automation is task-based guidance, and the lowest level is waypoint input into the UAV's flight guidance system. The flexibility that this variably adjustable degree of automation allows makes effective mission execution in a real scenario possible in the first place, which will be explained in more detail in the course of the work. However, the concept only allows access to low-automation functions after the operator has transmitted his intention to the system in the form of a task. Access is then not arbitrary but is guided by a hierarchical plan created from the task. This ensures that the cognitive resources of the technical system are not decoupled, thus optimizing the mission performance of the human-machine cooperation.

The concept was implemented for the use case of military reconnaissance drones in the form of a cognitive agent and investigated with the help of experimental missions in simulation and real flight. To this end, an experimental campaign was conducted with a helicopter simulator and Bundeswehr pilots, in which the helicopter was supported by three simulated UAVs in the reconnaissance of safe flight paths. The UAVs were guided by the helicopter commander using the system concept presented (manned-unmanned teaming). In a further experiment, the suitability of the concept for guiding a real flying reconnaissance UAV from a ground control station was investigated and compared with the possibility of freely accessing all automated functions. The results show that the guided access contributes to a higher mission performance, which is mainly based on the greater flexibility in guidance and the ability of the system to support error avoidance.

Inhaltsverzeichnis

1	EINLEITUNG	1
1.1	PROBLEME BEIM EINSATZ VON AUTOMATION	1
1.2	AUFBAU DER ARBEIT	2
2	HINTERGRUND	4
2.1	PROBLEMDARSTELLUNG	4
2.1.1	<i>Begriffsklärung</i>	4
2.1.2	<i>Fragstellungen beim Einsatz variabler Automationsgrade</i>	9
2.1.3	<i>Gründe für variable Automationsgrade</i>	11
2.1.4	<i>Nachteile variabler Automationsgrade</i>	16
2.1.5	<i>Zusammenfassung</i>	16
2.2	ANWENDUNGSFALL	17
2.3	STAND DER TECHNIK	18
2.3.1	<i>Betrachtungsschwerpunkt</i>	18
2.3.2	<i>Automation in bemannten Luftfahrzeugen</i>	18
2.3.3	<i>Automation in unbemannten Luftfahrzeugen</i>	20
2.3.4	<i>Zusammenfassung</i>	23
3	KONZEPT	24
3.1	ANALYSE DES ARBEITSSYSTEMS	24
3.1.1	<i>Definition der Missionsziele</i>	24
3.1.2	<i>Analyse und Modellierung der umgebenden Arbeitsprozesse</i>	25
3.1.3	<i>Aufgabenanalyse des Arbeitsprozesses</i>	25
3.1.4	<i>Design des Arbeitssystems</i>	26
3.1.5	<i>Aufgabenzuweisung</i>	27
3.1.6	<i>Einbringung Kognitiver Automation</i>	29
3.2	HERLEITUNG EINES SYSTEMKONZEPTS FÜR DEN UMGANG MIT VARIABLEN AUTOMATIONSGRADEN	31
3.2.1	<i>Zugriff auf Automationsfunktionen</i>	32
3.2.2	<i>Pläne und Automationshierarchie</i>	32
3.2.3	<i>Konzept des geführten Zugriffs</i>	33
3.3	DISKUSSION DES KONZEPTS	34
3.3.1	<i>Erwartete Vorteile des geführten Zugriffs</i>	34
3.3.2	<i>Erwartete Schwächen des geführten Zugriffs</i>	35
3.3.3	<i>Mögliche Arten des Zugriffs</i>	36
3.4	ANWENDUNGSFALL UAV	36
3.4.1	<i>Grundlagen</i>	36
3.4.2	<i>Beschreibung der möglichen Zugriffsarten</i>	38
3.5	INTERAKTIONSKONZEPT UND BENUTZERSCHNITTSTELLE	39
3.5.1	<i>Interaktionskonzept der Mensch-Maschine-Schnittstelle</i>	39
3.5.2	<i>Resultierende Benutzerschnittstelle</i>	40
3.6	ANNAHMEN ZUM ANWENDUNGSFALL	40
3.6.1	<i>Umwelt</i>	40
3.6.2	<i>Technische Defekte</i>	41
3.6.3	<i>Funkverbindung</i>	41
4	IMPLEMENTIERUNG	43
4.1	UMSETZUNG DES KOGNITIVEN AGENTEN	43
4.1.1	<i>Anforderungen</i>	43
4.1.2	<i>Sichtung vorhandener Architekturen</i>	43
4.1.3	<i>Implementierung des kognitiven Agenten mit dem Drools-Framework</i>	47
4.1.4	<i>Umsetzung des Konzepts</i>	61
4.1.5	<i>Resultierender Kognitiver Agent</i>	65
4.2	UMSETZUNG DER BEDIENOBERFLÄCHE	65
4.2.1	<i>Kartendisplay</i>	65
4.2.2	<i>Zusammenfassung</i>	70

5	INTEGRATION UND ERPROBUNG.....	71
5.1	INTEGRATION AGENT UND BENUTZERSCHNITTSTELLE.....	71
5.2	EVALUIERUNG GESAMTSYSTEM IM HUBSCHRAUBERSIMULATOR	73
5.2.1	<i>Versuchsdesign</i>	74
5.2.2	<i>Versuchsanordnung</i>	77
5.2.3	<i>Versuchsdurchführung</i>	80
5.2.4	<i>Auswertung</i>	83
5.2.5	<i>Ergebnis</i>	108
5.3	EVALUIERUNG GEFÜHRTER ZUGRIFF IM REALFLUG	109
5.3.1	<i>Versuchsdesign</i>	109
5.3.2	<i>Versuchsanordnung</i>	114
5.3.3	<i>Versuchsdurchführung</i>	123
5.3.4	<i>Auswertung</i>	126
5.3.5	<i>Ergebnis</i>	135
6	ZUSAMMENFASSUNG UND AUSBLICK.....	136
A	LITERATURVERZEICHNIS	138
B	ABKÜRZUNGSVERZEICHNIS.....	143
C	MISSIONSVIGNETTEN.....	145
D	FRAGEBÖGEN	155

1 Einleitung

Durch den Fortschritt bei der Computer- und Informationstechnik sehen wir heutzutage eine breite Verwendung von automatisierten Systemen in allen Bereichen. Während deren Zahl in Verkehr, Industrie und im militärischen Gebrauch ansteigt werden bereits erste höher automatisierte Systeme eingesetzt, die den nächsten Schritt einer Unabhängigkeit der Maschinen vom Menschen darstellen. So findet beispielsweise das kognitive System Watson der Firma IBM Anwendung in der Finanzwirtschaft, im Gesundheitsbereich und im Verkaufswesen (IBM Corporation, 2012). Außerdem gibt es Überlegungen der Bundeswehr, Watson für die Krisenprävention einzusetzen (Tagesspiegel, 2018). Des Weiteren werden auf öffentlichen Straßen so genannte autonome Autos unterschiedlicher Anbieter getestet. Diese sollen in der Lage sein eine Fahrt ohne menschliche Hilfe durchzuführen. Trotz teilweise tödlicher Unfälle (Süddeutsche Zeitung, 2018), werden die Tests vorangetrieben. Auch in der Luft findet ein Trend zu Hochautomation statt. So experimentiert die Deutsche Post und andere Hersteller mit unbemannten Transportflugzeugen zur Auslieferung von Paketen¹.

1.1 Probleme beim Einsatz von Automation

Diese hochautomatisierten Systeme, auch oft als autonome Systeme bezeichnet, werden mit dem Ziel entwickelt, vor allem in den Bereichen Sicherheit und Kosteneffizienz Vorteile zu bringen. Dabei tritt eine Reihe von neuen, teilweise unvorhergesehenen, Problemen auf. Trotz der steten Betonung der "Autonomie" solcher Systeme durch die Entwickler, ist allen Systemen gemein, dass am Anfang der Handlung ein Mensch steht. Sei es die Programmierung eines Auslösers, die Formulierung einer Anfrage oder die Vorgabe des Ziels, stets wird ein hochautomatisiertes System von Menschen eingesetzt. Selbst Hochautomation ist nicht in allen Fällen in der Lage sinnvoll zu handeln. Automationsfehler, nicht vorhergesehene Umstände und fehlendes Wissen können dafür die Ursache sein. Eine Zusammenarbeit mit dem Menschen, die über das bloße Initiieren hinausgeht, kann dabei helfen in solchen Situationen trotzdem handlungsfähig und produktiv zu bleiben. Die Art dieser Zusammenarbeit ist Gegenstand der vorliegenden Arbeit. Einige Beispiele sollen die Problematik erläutern.

Im Jahr 2016 ereignete sich in Belgien ein Flugunfall mit einem unbemannten Luftfahrzeug des Typs Atlantic der spanischen Firma UAV Navigation (Air Accident Investigation Unit (Belgium), 2016). Das vom belgischen Forschungsinstitut VITO (Vlaams Instituut voor Technologisch Onderzoek) betriebene Luftfahrzeug sollte in der Nähe des belgischen Weelde Erprobungsflüge durchführen. Nach dem Start wurde für kurze Zeit die Funkverbindung unterbrochen, was die Aktivierung eines Notfallmodus nach sich zog. Dieser ließ sich auch nach Wiederherstellung des Kontakts nicht abbrechen. Durch eine weitere Fehlfunktion in der Autopilotensoftware steuerte das Luftfahrzeug nicht den eingestellten Notlandepunkt an, sondern flog stattdessen, in Begleitung von Abfangjägern der belgischen und französischen Luftwaffe, ca. 110 nautische Meilen nach Südwesten, wo es auf einem Feld im Norden Frankreichs, aufgrund von Treibstoffmangel, abstürzte. Durch das Unvermögen der Operateure den Autopiloten zu deaktivieren oder zumindest zu beeinflussen, entwickelte sich ein zeitlich begrenzter Kommunikationsfehler zu einem Absturz.

Aus ähnlichen Gründen mahnt ein schon 2004 erschienener Bericht über die Fehlerursachen bei unbemannten Luftfahrzeugen im US-amerikanischen Militär die fehlende Möglichkeit an,

¹ Deutsche Post DHL Group. (2016). DHL Paketkopter 3.0 [Pressemitteilung]. Retrieved from <http://www.dpdhl.com/de/presse/specials/paketkopter.html>

den Autopiloten des Predator MQ-9 schnell zu deaktivieren. Dies ist nur über eine Eingabe im vierten Untermenü der Bedienoberfläche möglich (Tvaryanas, 2004).

Es gibt jedoch auch Fälle, in denen eine einfache Deaktivierungsmöglichkeit fatale Folgen haben kann. 1972 ereignete sich in Florida ein Flugunfall mit mehreren Toten und Verletzten, bei dem ein Linienflugzeug in den Everglade-Sümpfen abstürzte. Bei den Bemühungen der Crew die Ursache für die Fehlfunktion einer defekten Anzeige zu finden, wurde der Autopilot eingeschaltet, um sich dem Problem widmen zu können. Durch eine unbeabsichtigte Berührung des Steuerhorns wurde der Autopilot unbemerkt deaktiviert, was zum Absturz der Maschine führte (National Transportation Safety Board, 1973).

Anstelle eines Systems, das entweder über die volle Kontrolle verfügt, oder komplett abgeschaltet ist, bietet sich ein Mittelweg an. Ein im Hintergrund laufender Autopilot hätte den Missstand erkennen und die Crew rechtzeitig warnen können. Auch ein automatisiertes System, das dem Menschen tiefe Eingriffsmöglichkeiten bietet, wie beispielsweise die Wahl des Notlandepunktes zur Betriebszeit ist denkbar.

Der Eingriff in automatisierte Systeme birgt aber auch Risiken. Die Aufklärungsdrohne Global Hawk RQ-4 verfügt über eine automatisierte Taxifunktion für das Manövrieren auf Flughäfen. 1999 ereignete sich ein Unfall, bei dem das Luftfahrzeug die vorher fälschlich einprogrammierte Rollgeschwindigkeit von 155 Knoten erreichte und von der Bahn abkam (Williams, 2004). Ungeprüfte menschliche Eingaben in ein automatisiertes System eröffnen demnach ein weiteres Risikopotenzial.

Aus den bisher geschilderten Vorfällen geht hervor, dass die Möglichkeit eines menschlichen Eingriffs in einen automatisierten Ablauf notwendig ist. Es reicht jedoch nicht aus, diese nur anzubieten. Die Art der Eingabe situationsunabhängig sinnvoll zu gestalten und die Stärken von Mensch und Maschine konstruktiv zu kombinieren ist essentiell. Diese Problematik soll in der folgenden Arbeit genauer analysiert und für den Anwendungsfall von Aufklärungsdrohnen behandelt werden.

1.2 Aufbau der Arbeit

Kapitel 2 beschreibt den Hintergrund des Problems und teilt sich in die drei Teile Problemdarstellung, Anwendungsfall und Stand der Technik. Im ersten Teil werden der Inhalt der Arbeit durch die Probleme von Hochautomation motiviert und die Grundlagen vorgestellt. Im zweiten Teil erfolgt eine Darstellung des Anwendungsfalls militärischer Aufklärungsdrohnen im Hubschrauberverband sowie im Einzeleinsatz. Der letzte Teil umfasst den momentanen Stand der Technik solcher Systeme.

In Kapitel 3 wird das zentrale Konzept dieser Arbeit hergeleitet. Dieses besteht darin, den Zugriff auf niedrige Automationsfunktionen zu ermöglichen, um Schwächen der Automation auszugleichen, was aber nur unter Einschränkungen erlaubt wird. Außerdem erfolgt die Diskussion dieses Konzepts.

Kapitel 4 enthält eine Beschreibung der Implementierung des Konzepts für den vorgestellten Anwendungsfall. Dabei wird eine Kombination aus automatisiertem Planer und Situationsanalyse in Form eines Produktionensystems zusammen mit einer geeigneten Bedienschnittstelle eingesetzt.

In Kapitel 5 werden die Integration des Agenten und der Bedienoberfläche mit den anderen Komponenten beschrieben und zwei Testfälle vorgestellt, in denen das Konzept im Experiment erprobt wurde. Dabei handelt es sich um Hubschraubermissionen mit Unterstützung durch UAVs, welche im Simulator von Bundeswehrpersonal durchgeführt wurden und um die

Erprobung des Konzepts mit einem Mini-UAV im Realflug. Das Kapitel enthält Aufbau und Ablauf der Experimente, sowie die Ergebnisse beider Testfälle.

In Kapitel 6 wird die Arbeit zusammengefasst und ein Ausblick auf zukünftige Untersuchungen gegeben.

2 Hintergrund

In diesem Kapitel erfolgt zuerst eine detaillierte Beschreibung des Problems variabler Automationsgrade mit einer Definition der verwendeten Begriffe und einer Diskussion der möglichen Forschungsfragestellungen. Zusätzlich wird der Anwendungsfall von militärischen Aufklärungsdrohnen in diesem Zusammenhang näher beschrieben. Anschließend erfolgt eine Aufstellung und Untersuchung des Standes der Technik im Bereich variabler Automationsgrade und kognitiver Architekturen.

2.1 Problemdarstellung

Bei einer Untersuchung variabler Automationsgrade ist zunächst eine Klärung des Begriffs notwendig. Darauf aufbauend können dann Forschungsfragestellungen erhoben und Vor- und Nachteile diskutiert werden. Beides ist Inhalt dieses Kapitels.

2.1.1 Begriffsklärung

In diesem Abschnitt werden die wichtigsten im weiteren Verlauf verwendeten Begriffe vorgestellt und falls möglich definiert.

2.1.1.1 Automationsgrad

Der Begriff Automationsgrad ist in der Literatur vielfach, jedoch meist unterschiedlich, definiert. Im Folgenden sollen die gängigsten Definitionen aufgeführt und anschließend eine für diese Arbeit zutreffende ausgewählt werden.

Automation ist nach (DIN 19233, 1998) "das Ausrüsten einer Einrichtung, so dass sie ganz oder teilweise ohne Mitwirkung des Menschen bestimmungsgemäß arbeitet". Demnach existieren eine zu erledigende Arbeit und die arbeitenden Akteure Mensch und Maschine. Der Automationsgrad kann nun durch verschiedene Aspekte definiert werden. Dies können die Verteilung Aufgabenbearbeitung und der Unteraufgaben, die Interaktion zwischen Mensch und Maschine oder die Rolle des Menschen oder von Mensch und Maschine sein. Auch mehrdimensionale Definitionen existieren.

Automationsgrad nach Aufgabenverteilung

Nach (Johannsen, 1993) ist der Automationsgrad "der Anteil der vom Automatisierungssystem übernommenen Funktionen und Einwirkungen auf den technischen Prozess". Dies beschreibt lediglich die Zuständigkeit für die anstehenden Aufgaben und nicht die Nutzung des Systems durch den Menschen oder die Interaktion mit der Maschine. Diese Aufteilung kann vordefiniert, also statisch, oder situationsangepasst, also dynamisch sein. Außerdem kann die Aufteilung pro Funktion in zwei Stufen, also Mensch ist zuständig oder Maschine ist zuständig, oder in feinere Abstufungen unterteilt sein. Für die statische Einteilung existiert beispielsweise das MABA-MABA-Prinzip nach (Fitts, 1951). Hierbei werden die anstehenden Aufgaben dem Menschen und der Maschine nach deren Stärken zugeteilt (Men are better at - machines are better at). Zusätzliche Zuteilungskriterien können nach (Meister, 1987) Kosten, Zuverlässigkeit, Wartbarkeit, persönliche Anforderungen oder Sicherheit sein. Statische Aufgabenaufteilungen haben aber Nachteile in bestimmten Situationen. So argumentiert (Rouse, 1977), dass in Situationen mit mehreren parallelen Aufgaben eine dynamische Aufteilung zweckmäßiger ist. Dazu ist eine Instanz nötig, welche die aktuelle Zuteilung vornimmt. Diese Aufgabe kann vom Menschen übernommen werden. In diesem Fall spricht man von einem adaptierbaren System. Stellt sich hingegen die Maschine selbst auf eine Situation ein, wird das System adaptiv genannt. Eine weitere Möglichkeit ist die statische und dynamische Aufteilung zu kombinieren (Greensteins & Lam, 1985). Dabei wird ein Teil der Funktionen vorab einem Akteur zugeordnet, während die übrigen Funktionen dynamisch zugeteilt werden.

Automationsgrad nach Mensch-Maschine-Interaktion

Eine sehr bekannte Einteilung von Automationsgraden wird in (Thomas B. Sheridan & Verplank, 1978) nach der Interaktion der Maschine mit dem Menschen definiert. Die zehnstufige Skala, welche später auf sieben Stufen vereinfacht wurde (vgl. (T. B. Sheridan, 2002)), beschreibt jedoch eher das Verhalten der Maschine und orientiert sich nur lose an der Aufteilung der Aufgaben zwischen den Akteuren. In ähnlicher Weise beschreibt (C. E. Billings, 1991) sieben Kontroll- und Managementmodi mit steigender Autorität der Maschine. Diese sind jedoch als Vorschrift für das Verhalten des Menschen zu sehen und weisen ebenfalls nur einen geringen Zusammenhang mit der Aufgabenzuteilung auf.

Automationsgrad nach Rollen

(Kaber & Endsley, 1997) geben auf ihrer zehnstufigen Automationsgradskala (engl. Levels of Automation) vier Rollen an, die ein Akteur im System übernehmen muss. Diese sind das Generieren von möglichen Aktionen, das Auswählen der geeignetsten Aktion, das Implementieren dieser Aktion und die Überwachung der Ausführung (siehe Abbildung 2-1). Sie bilden damit die Metaaufgaben beim Erreichen eines Arbeitsziels ab.

LEVEL OF AUTOMATION	FUNCTIONS			
	MONITORING	GENERATING	SELECTING	IMPLEMENTING
1. Manual Control	Human	Human	Human	Human
2. Action Support	Human/Computer	Human	Human	Human/Computer
3. Batch Processing	Human/Computer	Human	Human	Computer
4. Shared Control	Human/Computer	Human/Computer	Human	Human/Computer
5. Decision Support	Human/Computer	Human/Computer	Human	Computer
6. Blended Decision Making	Human/Computer	Human/Computer	Human/Computer	Computer
7. Rigid System	Human/Computer	Computer	Human	Computer
8. Automated Decision Making	Human/Computer	Human/Computer	Computer	Computer
9. Supervisory Control	Human/Computer	Computer	Computer	Computer
10. Full Automation	Computer	Computer	Computer	Computer

Abbildung 2-1: Automationsgrade und Funktionen nach (Kaber & Endsley, 1997)

Bei höheren Automationsgraden übernimmt die Maschine einen höheren Anteil dieser Rollen.

(Clough, 2002) intensiviert diese Orientierung nach Rollen noch und schlägt eine Unterteilung nach der Rolle des Menschen in Pilot, Fernsteurer (engl. Remote Operator), Aufseher (engl. Remote Supervisor) und Kunde (engl. Remote Customer) vor. Das US-amerikanische Verteidigungsministerium ordnet komplementär der Maschine die dazu notwendige Rolle in vier sogenannte Autonomiegraden (engl. Levels of Autonomy) zu (Winnefeld & Kendall, 2010). Diese sind „Vom Menschen bedient“ (1 Human operated), „Vom Menschen Beauftragt“ (2 Human delegated), „Vom Menschen überwacht“ (3 Human supervised) und „Vollautonom“ (4 Fully autonomous). Die Autonomie wird hier als Unabhängigkeit vom Menschen definiert. Die ersten beiden Autonomiegrade können der konventionellen Automation zugeordnet werden. Autonomiegrad 3 entspricht einer auftragsbasierten Führung und Vollautonomie wird hier durch das selbständige Verfolgen von vorgegebenen Zielen verstanden. Dies deckt sich sehr stark mit den vorhergehenden Definitionen von Automationsgrad.

Mehrdimensionale Einordnung:

Die bisher behandelten Definitionen des Automationsgrades umfassen nur eine Dimension. Nach (Riley, 1989) eignet sich jedoch auch eine Einordnung entlang mehrerer Dimensionen. Vorgeschlagen wird, das Abstraktionslevel der in die Maschine eingegebenen Daten auf einer Achse (bezeichnet als Intelligenzlevel) und die Rolle der Maschine auf der anderen Achse (bezeichnet als Autonomielevel) aufzutragen.

Im ALFUS-Framework (Autonomy Levels for Unmanned Systems) nach (Huang, 2004) wird ebenfalls ein mehrdimensionaler Ansatz vorgeschlagen. Hier wird die Aufgabenverteilung zwischen Mensch und Maschine entlang einer Achse mit der Unabhängigkeit der Maschine vom Mensch bezeichnet (Human independence). Zusätzlich sind die Missionskomplexität und die Komplexität der Umwelt als Dimensionen des Automationsgrads aufgetragen (siehe Abbildung 2-2).

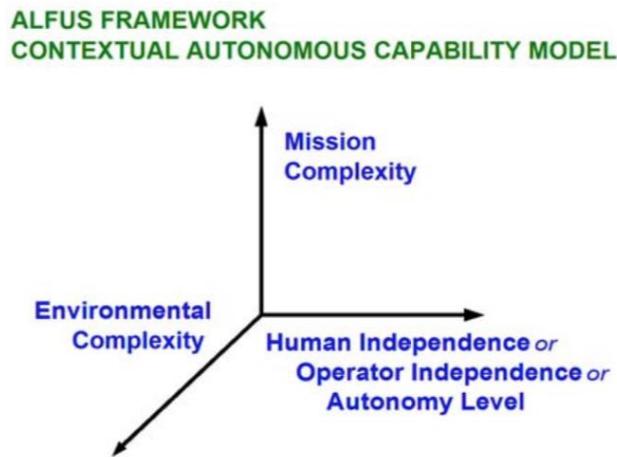


Abbildung 2-2: Dimensionen des Automationsgrads nach (Huang & Messina, 2007)

Die Argumentation ist dabei, dass eine funktionale Aufteilung für eine einfache Mission in einer einfachen Umgebung sicher anders ausfallen kann, als in einer komplexen Umgebung für eine komplexe Mission.

Allen bisherigen Definitionen von Automationsgraden gemein ist die Aufteilung der Aufgaben oder Metaaufgaben, bzw. Rollen, zwischen Mensch und Maschine. Ein System bei der die Maschine mehr Aufgaben übernimmt, ist, bei sonst gleichen Umständen, höher automatisiert als ein System, bei dem die Maschine weniger dieser Aufgaben übernimmt. Dementsprechend soll in dieser Arbeit die anfangs beschriebene Definition nach (Johannsen, 1993) verwendet werden.

2.1.1.2 Automationsfunktionen und höhere Automation

Im Zusammenhang mit den oben ausgeführten Automationsgraden wird für den Rest dieser Arbeit folgendes angenommen. Entsprechend (DIN 19233, 1998) ist Automation “das Ausrüsten einer Einrichtung, so dass sie ganz oder teilweise ohne Mitwirkung des Menschen bestimmungsgemäß arbeitet”. Demnach stellt Automation einen Sammelbegriff für eine oder mehrere Automationsfunktionen dar. Höhere Automationsfunktionen sollen dadurch definiert sein, dass sie andere, weiterhin als niedrige bezeichnete, Automationsfunktionen anwenden, um die eigene Funktionalität zu erreichen. Es gibt also eine Hierarchie von Automationsfunktionen. Diese Annahme ist legitim, da eine Automationsfunktion immer Teil eines Gesamtsystems ist, dessen Funktionalität sich aus der Summe der enthaltenen Funktionalitäten zusammensetzt. Auch der Spezialfall von mehreren unabhängigen Funktionen ist enthalten, da deren Zusammenfassung zu einem System die höhere Automationsfunktionalität dann auf der Gesamtsystemebene darstellt. Ausnahmen wären sehr simple Anwendungen, welche nur aus einer Funktion bestehen, oder sehr komplexe allumfassende Systeme, welche nicht in Teilfunktionen unterteilt werden können. Erstere sollen in dieser Arbeit nicht behandelt werden und letztere sind nach momentanem Stand der Technik nicht umsetzbar. Auch von außen als Ganzes wirkende neuronale Netze folgen dieser

Argumentation. Sie bilden intern aufeinander aufbauende Funktionalität in ihren Schichten ab (Gurney, 1997).

Demnach ist die eigentliche Einordnung einer Automationsfunktion auf der Skala der Automationsgrade für Designentscheidungen und Implementierung eines technischen Systems nicht relevant. Lediglich die Komplexität einer Automationsfunktion im Sinne der darunter vereinten Funktionen gibt einen Hinweis darauf ob es sich um eine höhere oder niedrigere Automationsfunktionen handelt. Aus dieser Überlegung geht ebenfalls hervor, dass die Begriffe hohe und niedrige Automation sich auf ein bestimmtes technisches System beziehen. Die gleiche Funktionalität kann in einem System die höchstmögliche Automation darstellen, während sie in einem anderen System nur eine Hilfsfunktion für noch höhere Automationsfunktionen ist. (Sarter 1997) weist darauf hin, dass mit steigender Komplexität einer Automationsfunktion, das Verständnis über deren Wirkungsweise und Ergebnisermittlung immer schwerer zu erlangen ist.

2.1.1.3 Variabler Automationsgrad

Betrachtet man die Definition des Automationsgrads nach (Johannsen, 1993) ist der Automationsgrad "der Anteil der vom Automatisierungssystem übernommenen Funktionen und Einwirkungen auf den technischen Prozess“. Ist ein System darauf ausgelegt, dass die Aufteilung der notwendigen Funktionen zwischen Mensch und Maschine dynamisch erfolgen kann, so handelt es sich demnach um ein System mit variablem Automationsgrad.

Nach (Endsley, 1996) umfasst die Definition variabler Automationsgrade zwei zusätzliche, möglicherweise orthogonale, Dimensionen. Zu der Aufteilung der Funktionen zwischen Mensch und Maschine kommt nun der Automationsgrad der einzelnen Funktion hinzu. Außerdem wird die Entscheidung, wann welcher Automationsgrad eingesetzt wird, also die zeitliche Verteilung, als eigene Dimension festgelegt. Dies gilt für jede anstehende Aufgabe und wird in dem dreidimensionalen Raum an Möglichkeiten in Abbildung 2-3 dargestellt.

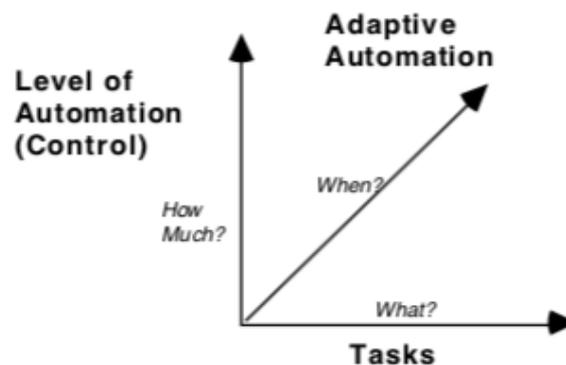


Abbildung 2-3: Dimensionen des Automationsgrads nach (Endsley, 1996)

Diese Aufteilung erlaubt zwar eine genauere Analyse der einzelnen Komponenten variabler Automationsgrade, jedoch ist sie nicht unbedingt notwendig. Die zeitliche Einteilung der Aufgabenverteilung entlang der Achse "When?" zwischen Mensch und Maschine, welche eine Art Scheduling darstellt, ist ebenso eine Funktionalität wie die anderen Aufgaben. Sie kann dynamisch zur Laufzeit erfolgen und sogar von der Maschine übernommen werden, was einen wichtigen Ansatzpunkt aktueller Assistenzsysteme darstellt (vgl. (Honecker & Schulte, 2017) und (Brand & Schulte, 2018)). Wie weiter oben dargelegt, bestehen fast alle Aufgaben aus Unteraufgaben bzw. aus untergeordneten Funktionen. Umgekehrt kann für alle Aufgaben eine übergeordnete Aufgabe, beispielsweise die Erfüllung des Missionsziels o.ä. gefunden werden. Die Unterscheidung zwischen Aufgaben entlang der Achse "What?" und dem Automationsgrad

einzelner Funktionen entlang der Achse “How Much?” ist demnach unscharf bzw. überflüssig und kann durch eine einzelne Achse ersetzt werden. Variable Automationsgrade lassen sich demnach linear darstellen.

Die zeitliche Einteilung der Aufgabenverteilung soll hier noch einmal genauer betrachtet werden. Ist die Maschine ausschließlich in der Rolle einer Entscheidungshilfe, welche Vorschläge präsentiert, die der Mensch anschließend akzeptiert oder ablehnt, spricht man nach (Debernard, Vanderhaegen, & Millot, 1992) von vertikaler Kooperation. Kann die Maschine Entscheidungen selbständig treffen und damit direkt auf das Arbeitsziel hinarbeiten, so spricht man von horizontaler Kooperation. In diesem Fall ist eine Instanz notwendig, welche die Verteilung der Funktionen, oder entsprechender Entscheidungen, auf Mensch und Maschine übernimmt. Diese Instanz kann, wie oben beschrieben, sowohl der Mensch als auch die Maschine sein. Auch eine Kombination, beispielsweise nach Funktionsbereich unterteilt, ist vorstellbar.

Es kann also festgehalten werden, dass ein System, in dem der Mensch die Möglichkeit hat über die Verteilung der Funktionen auf Mensch und Maschine zu entscheiden, variable Automationsgrade besitzt. Dies kann explizit geschehen, was einer direkten Einstellung des Automationsgrads entspricht, oder implizit, wenn der Mensch die Funktion einfach übernimmt. Diese Erkenntnis lässt sich auf die vorher angesprochene Automationshierarchie übertragen, in der ein Zugriff auf höherer Ebene mehr Automationsfunktionen nutzt, als auf niedrigerer Ebene. Dementsprechend soll im weiteren Verlauf dieser Arbeit die folgende Aussage für Systeme mit variablen Automationsgraden verwendet werden, welche sich mit den bisher dargestellten deckt:

Ist dem Operateur der Zugriff auf mehreren Ebenen der Automationshierarchie möglich, so handelt es sich um ein System mit variablen Automationsgraden.

Das bedeutet, dass lediglich das Design der Benutzerschnittstelle festlegt, ob es sich um ein System mit variablen Automationsgraden handelt. Da nach der vorhergehenden Definition jede höhere Automationsfunktion auf niedrigere zurückgreift, um die eigene Funktionalität sicherzustellen, ist diese Möglichkeit in allen hochautomatisierten Systemen vorhanden. Bei einem System mit festem Automationsgrad kann lediglich auf eine Ebene der Automationshierarchie zugegriffen werden. Dabei ist es unerheblich, ob diese die höchste verfügbare Ebene darstellt, was üblicherweise der Fall ist.

Ein Beispiel für den Zugriff auf eine Ebene, die nicht der höchsten verfügbaren Automationsfunktionen entspricht, sind Spurhalteassistentenfunktionen über das Lenkrad im Auto. Das Spurhalten kann theoretisch durch die vorhandene Funktion der Spurerkennung und die Kontrolle des Lenkraddrehwinkels über einen Servomechanismus vollautomatisch erfolgen. Anstelle einer höheren Automationsfunktion, dem vollautomatischen Spurhalten, wird jedoch der Fahrer bei Abweichung von der Spur durch einen Widerstand entgegen dem momentanen Lenkwinkel darauf hingewiesen. Demnach ist die einzige Eingriffsmöglichkeit für den Menschen in das hochautomatisierte System die niedrig automatisierte Eingriffsebene Lenkrad.

2.1.1.4 Verdeckung niedrigerer Automationsfunktionen

Beim Einsatz variabler Automationsgrade stellt sich die Frage, in wie weit niedrigere Automationsfunktionen durch höhere verdeckt werden sollen. Ein einfaches Beispiel ist der momentan weit verbreitete Saugroboter. Einige Modelle, besonders aus der frühen Generation, können durch Magnetstreifen daran gehindert werden, bestimmte Bereiche zu befahren. Sie wählen für die anderen Bereiche einen chaotischen Reinigungskurs. Neuere Modelle erfassen den Raum mit spezieller Sensorik und erstellen eine Karte. Diese verzichten meistens auf eine

Möglichkeit des Benutzers bestimmte Raumteile zu sperren. Die automatische Kartierung des Raumes hat also die manuelle Eingabemöglichkeit abgelöst. Die Funktion bestimmte Bereiche zu meiden ist aber weiterhin im Roboter vorhanden und wird auch genutzt, jedoch nun nur intern, zum Meiden von auf der Karte erfassten Hindernissen. Das Phänomen, dass ein hoch automatisiertes System selbst Automationsfunktionen nutzt, jedoch dem Benutzer keine Möglichkeit gibt, diese direkt anzusteuern, soll im Weiteren Verdeckung genannt werden. Abbildung 2-4 zeigt eine Automationshierarchie durch die Maske einer Benutzerschnittstelle, die jedoch nicht Zugriff auf alle Funktionen bietet.

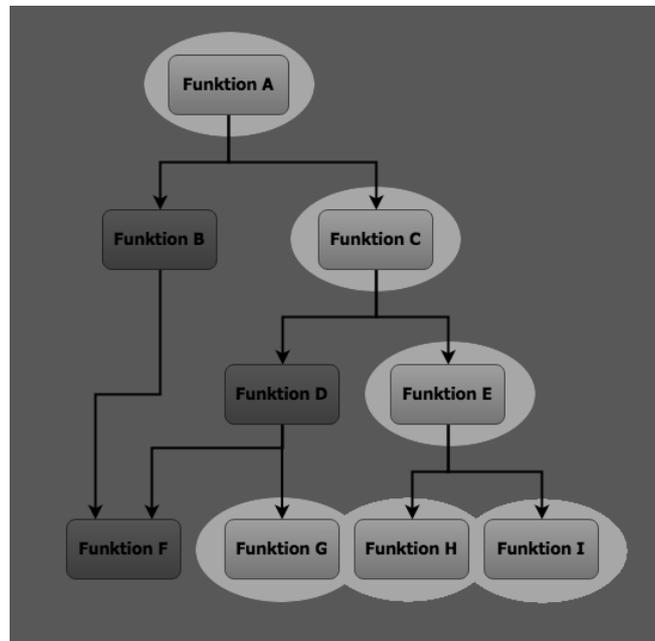


Abbildung 2-4: Automationshierarchie mit Verdeckung

Die Schnittstelle bietet dem Nutzer Zugriff auf die Funktionen A, C, E, G, H und I, erlaubt aber keinen Zugriff auf die Funktionen B, D und F. Diese sind demnach verdeckt, werden aber dennoch von anderen Automationsfunktionen verwendet.

Verdeckung ist dabei weder positiv noch negativ zu sehen. Sie kann genutzt werden, um die Benutzerschnittstelle und damit die Bedienung zu vereinfachen. Sie kann auch für Sicherheitszwecke genutzt werden, um falsche Nutzung der niedrigeren Automationsfunktion zu verhindern. Verdeckung schränkt jedoch immer das möglichen Einsatzspektrum ein, wie weiter unten gezeigt werden soll. Des Weiteren basiert die manchmal unbewusste Designentscheidung, Verdeckung einzusetzen, auf einem hohen Vertrauen in die Zuverlässigkeit der höheren Automationsfunktion, im Sinne einer korrekten Anwendung der ihr untergeordneten Funktionen, und ihrer Anwendbarkeit in allen vorgesehenen Szenarien.

2.1.2 Fragestellungen beim Einsatz variabler Automationsgrade

In diesem Abschnitt sollen die Fragestellungen aufgezeigt werden, die für das Design eines Systems mit variablem Automationsgrad relevant sind.

2.1.2.1 Einsatz von Verdeckung: Welche Funktionen anbieten?

Die oben definierte Verdeckung spielt beim Design eines Systems mit variablen Automationsgraden eine große Rolle. Es stellt sich die Frage, wie stark und in welchen Teilfunktionen Verdeckung eingesetzt werden soll. Dabei kann Verdeckung zur gezielten Reduktion des Funktionsumfangs eingesetzt werden, um beispielsweise die Variabilität in der Anwendung des Systems einzuschränken. Dies stellt jedoch einen Kompromiss zwischen

Planbarkeit der Nutzung und Flexibilität dar. Verdeckung muss deshalb immer auf den gewünschten Anwendungsfall bezogen werden. Auch eine Schrittweise Reduktion der Verdeckung mit wachsender Fertigkeit im Umgang mit dem System ist denkbar. So kann in einer militärischen Nutzung sowohl eine einfache Schulbarkeit als auch ein hoher Grad an Flexibilität für erfahrenere Operateure erreicht werden.

2.1.2.2 Zugriff auf niedrigere Automationsfunktionen: Wie Zugriff priorisieren?

Wird auf Verdeckung vollständig oder teilweise verzichtet, stellt sich die Frage, wie der Zugriff auf niedrigere Automationsfunktionen gestaltet werden soll. Ohne geeignete Benutzerschnittstelle ist eine Funktionalität nicht nutzbar. Existiert eine Benutzerschnittstelle und besteht eine Hierarchie der Automationsfunktionen, so kann es zu Konflikten in der Nutzung niedrigerer Funktionen zwischen dem Benutzer und höheren Automationsfunktionen kommen. Im Folgenden werden die möglichen Konstellationen beschrieben.

Isolierte Bedienung: Eine Automationsfunktion ist unabhängig von anderen nutzbar. Dies ist für Einzelfunktionen der Fall. Es treten keine Konflikte auf, weshalb hierbei kein besonderes Zugriffs-konzept nötig ist. Dieser Sonderfall ist in komplexen Systemen, die in dieser Arbeit behandelt werden sollen, nicht relevant.

Höhere Automation vor niedrigerer Automation: Wird eine Automationsfunktion aus einer höheren Hierarchieebene genutzt, so werden darunter liegende, gleichzeitig durch den Operateur genutzte, Funktionen pausiert und die höhere Automationsfunktion kann frei über die unterstellten Funktionalitäten verfügen. Die niedrigeren Funktionen bleiben für den Operateur gesperrt, bis die höhere Automationsfunktion beendet ist.

Diese Zugriffspriorisierung kann für den Operateur zu unerwartetem und hinderlichem Verhalten des Systems führen. Möchte er seinen Zugriff durchsetzen, so müsste er erst erfassen welche Funktionalität ihn daran hindert und anschließend prüfen, ob er diese pausieren kann. In den hier behandelten komplexen Systemen kann dies ohne zusätzliche Hilfe eine große Herausforderung darstellen.

Niedrigere Automation vor höherer Automation: Wird eine Automationsfunktion aus einer niedrigeren Hierarchieebene genutzt, so werden darüber liegende gleichzeitig durch den Operateur verwendete Funktionen pausiert. Der Operateur kann frei über die niedrigeren Funktionalitäten verfügen. Sobald die Benutzung abgeschlossen ist, kann die ursprüngliche höhere Automationsfunktion ihre Tätigkeit fortsetzen.

Ebenso wie der vorherige Fall ist hier ein unerwartetes Verhalten des Systems möglich. Im Gegensatz zu vorher ist jedoch diese Priorisierung in den meisten Fällen problematischer, wenn davon ausgegangen wird, dass höhere Automationsfunktionen wichtigere Aufgaben wie Kollisionsvermeidung oder andere sicherheitsrelevante Funktionen umsetzen. Ein Pausieren kann demnach zu riskanten Situationen führen. Dabei ist dem Operateur im Gegensatz zum vorherigen Fall eventuell nicht einmal bewusst, dass im Augenblick eine andere Funktion außer Kraft gesetzt wurde, was die Situation zusätzlich verschärfen kann.

Eingriff in höhere Automation: Beim Zugriff eines Benutzers auf eine von höherer Automation genutzte niedrige Funktionalität passt sich die höhere an und berücksichtigt die Eingaben, bzw. die Veränderung der Ergebnisse der niedrigeren Automationsfunktion, durch den Menschen. Dies ist, je nach Aufbau des Systems, nicht immer möglich und kann zu weiteren Problemen führen (Gegensteuern, Nichtdurchführbarkeit, etc.).

Im Gegensatz zu den bisher vorgestellten Konstellationen bietet der Eingriff in höhere Automationsfunktionen sowohl die Möglichkeit jederzeit und in jeder Ebene der Automationshierarchie einzugreifen als auch gleichzeitig Konflikte zu erkennen. Diese können

dann entweder direkt von der Automation gelöst werden, oder zumindest an den Menschen herangetragen werden.

2.1.2.3 Benutzeroberfläche: Wie Funktionen darstellen?

Unbestritten ist, dass eine ungeeignete Benutzeroberfläche ein System unbedienbar machen kann. Es stellt sich also die Frage wie die komplexe Vielfalt an Automationsfunktionen mit ihren Parametern und Ergebnissen und deren Beziehungen untereinander dargestellt werden können.

Es bieten sich drei Möglichkeiten, die im Folgenden diskutiert werden sollen. Zum einen ist es möglich alle Funktionen isoliert zu betrachten. Für jede Art von Automation existieren bereits gute Lösungen für Ein- und Ausgabe. Werden diese getrennt dargestellt, so ist zumindest gesichert, dass der Operateur jede Funktion bedienen kann und dabei optimal informiert ist. Hierbei fehlt jedoch die Darstellung der Wechselwirkungen untereinander. Außerdem wird, bei zunehmender Anzahl an Automationsfunktionen, ein Überblick über den aktuellen Zustand aller umso schwerer. Am anderen Ende des Spektrums steht die voll integrierte Benutzeroberfläche, welche den Gesamtzustand des Systems, der einzelnen Funktionen und deren momentane und zukünftige Wechselwirkungen darstellt. Dieser Ansatz ist jedoch aufgrund der begrenzten Aufnahmefähigkeit des Menschen sehr schwer umzusetzen. Es können nicht alle Informationen über die einzelnen Funktionen detailliert dargestellt werden. Als dritte Möglichkeit bietet sich ein Mittelweg zwischen den beiden anderen an. Je nach Bedarf werden Informationen zu einzelnen Automationsfunktionen detailliert oder integriert dargestellt. Eventuell unterstützen Assistenzsysteme bei der Auswahl der Darstellung und bei der Abschätzung von möglichen Wechselwirkungen unter den Funktionen. Eine gute Balance zu finden ist nicht einfach und muss für jedes System und jeden Anwendungsfall neu entwickelt werden.

2.1.3 Gründe für variable Automationsgrade

In diesem Abschnitt sollen die Vorteile, und damit die Beweggründe für einen Einsatz, von variablen Automationsgraden herausgestellt werden.

2.1.3.1 Hohe Kontrolle durch den Menschen

Durch die Möglichkeit das System auf einem niedrigen Automationsgrad zu führen, steigt die Kontrolle, die der Operateur über das System hat. Die nachfolgenden Vorteile basieren auf dieser besseren Kontrollmöglichkeit. Eine höhere Kontrolle hat jedoch auch eine höhere Beanspruchung zur Folge, was beispielsweise durch den erhöhten Aufwand bei der Eingabe der gewünschten Aktionen im System verursacht wird. Im Standardfall ist diese höhere Kontrolle jedoch optional, weshalb die Beanspruchung nicht wesentlich steigt.

2.1.3.2 Einbringen von Operateurwissen

Wie oben angesprochen können taktische Verhaltensweisen in das System eingegeben werden, die so vorher nicht vorhanden waren. Demnach kann durch variable Automation Wissen des Operateurs, welches der Maschine nicht explizit mitgeteilt werden kann, sog. implizites Wissen (engl. tacit knowledge) nach (Polanyi, 1985), die Planung und Durchführung einer Mission verbessern.

Nach (Rauner, 2006) gibt es vier Arten von implizitem Wissen.

- In actu implizit oder intuitives Wissen wird durch unbewusste Handlung ohne das sich Bewusstmachen von Handlungsanweisungen charakterisiert. Im Nachhinein kann der

Handelnde aber die Anweisungen beschreiben. Ein Beispiel aus der Luftfahrt wäre das Stabilisieren der Flugzeuglage während des Fluges.

- Nicht verbalisierbares Wissen ist ebenfalls durch das Handeln ohne Anweisungen definiert, jedoch ist der Handelnde hierbei im Nachhinein nicht in der Lage diese anzugeben. Ein Beobachter oder Experte auf diesem Gebiet könnte jedoch eine Handlungsanweisung ableiten und angeben. Wird als Empfänger einer solchen Verbalisierung ein Softwareagent angesehen, so sind auch an sich verbalisierbare Informationen eventuell nicht für den Agenten verständlich verbalisierbar. Beispiele hiervon sind vor allem kurzfristig verfügbare Informationen, wie z.B. Inhalte von Funksprüchen und ethische Abschätzungen, wie sie z.B. durch Kriegsrecht oder Rules of Engagement vorgeben werden (Verhältnismäßigkeit, etc.). Auch durch die sogenannte semantische Lücke zwischen den Verständnissen für Begriffe von Mensch und Maschine könne diese Art von Übertragungsschwierigkeiten laut (Dorai & Venkatesh, 2003) auftreten.
- Nicht formalisierbares Wissen wiederum kann auch von Experten nicht in Handlungsanweisungen umgesetzt werden. Darunter können bestimmte Anteile von taktischem und strategischem Wissen fallen, beispielsweise das "Gefühl" für die Lage oder Ahnungen über die nächsten Aktionen des Gegners
- Erfahrungsgebundenes Wissen lässt sich nur durch Erfahrungen erwerben. Dies kann beispielsweise für eine Risikoabschätzung, eine Gefährdungseinstufung oder andere Lagebeurteilungen der Fall sein.

Durch die Eigenschaft eines Systems mit variablen Automationsgraden durch direkte Eingabe des Operateurs dessen implizites Wissen zu nutzen, kann es in Situationen eingesetzt werden, in denen hochautomatisierte Systeme versagen würden. Dadurch werden die Grenzen des Einsatzraumes erweitert und gegebenenfalls die Missionsleistung des Gesamtsystems durch das zusätzliche Wissen gesteigert.

2.1.3.2.1 Umgang mit unvorhergesehenen Problemen

Bei komplexen Automationsfunktionen besteht eine Wahrscheinlichkeit, dass diese in einer Umgebung eingesetzt werden sollen, die den dafür spezifizierten Designhorizont überschreiten. Diese Eigenschaft wird von (C. E. (Charles E. . Billings, 1997) als Brüchigkeit (engl. Brittleness) von Automation definiert. Die in der Einleitung zu dieser Arbeit dargestellten Vorfälle sind Beispiele für die Brüchigkeit automatisierter Systeme.

Aus den beiden vorherigen Punkten geht hervor, dass mit variablen Automationsgraden die Wahrscheinlichkeit steigt, diese, meist überraschend auftretenden, Probleme durch einen Eingriff des Operateurs lösen zu können.

2.1.3.2.2 Ausgleich von Automationsfehlern

Wie oben gezeigt kann die zusätzliche Überwachungsfähigkeit des Menschen, zusammen mit seiner Problemlösefähigkeit und der Möglichkeit auf jeder Ebene in das System einzugreifen, Automationsfehler oder schlechte Leistung der Automation ausgleichen.

In einer Automationshierarchie sind höhere Ebenen von der korrekten Funktionsweise darunter liegender Schichten abhängig. Je nach Umsetzung haben Automationsfunktionen die Möglichkeit ihre eigene Fehlfunktion oder die Fehler niedrigerer Einheiten zu erkennen. Falls es innerhalb der Implementierung der entsprechenden Automationsfunktion möglich ist, können Fehler korrigiert oder umgangen werden. Bei der Fehlerdetektion wird jedoch zwangsweise eine begrenzte Wahrnehmung auf die tatsächliche Welt angewendet. Dies ist

beispielsweise durch die Eigenschaften der angewendeten Sensoren zu begründen. Es kann also zu einer falschen Fehlerdetektion kommen, die im schlimmsten Fall alle von dieser Automationsfunktion abhängigen Elemente beeinträchtigt oder sogar unbenutzbar macht. Falls die Fehlerdetektion korrekt ist, kann es sich jedoch um einen Fehler handeln, den das System nach seiner Implementierung nicht in der Lage ist zu lösen, was ebenfalls zum Ausfall führt.

Ein außenstehender Operateur besitzt jedoch eine andere Sicht auf die Umwelt. Diese wird je nach Implementierung und Wissensstand andere Informationen beinhalten. Dabei kann es vorkommen, dass die Automation Wissen besitzt, das dem Operateur nicht zugänglich ist und umgekehrt.

Daher lässt sich die Umweltwahrnehmung des Benutzers mit der Automationssicht ergänzen und führt eventuell zu einer besseren Lageeinschätzung. Dieses, als Shared Awareness bezeichnete Konzept (Friedell, 1967) spielt auch bei der Kooperation von menschlichen Teams eine Rolle. Eine hohe Shared Awareness ist hierbei laut (Kingston & Martell, 2004) für eine hohe Leistung essentiell.

Es existieren nun zwei Möglichkeiten zur Fehlerbehebung. Ist das System in der Lage seine Fehlerdetektion durch den Operateur überschreiben zu lassen, so können falsche Fehlerdetektionen ausgeglichen werden. Ist das nicht vorgesehen, so kann der Mensch eventuell durch Zugriff auf niedrigere Automationsfunktionen den Fehlerzustand beseitigen, indem er entweder einen existierenden Fehler mit eigenen Mitteln umgeht oder das System in einen Zustand bringt, in dem das System den falschen Fehler nicht mehr wahrnimmt. Es ist anzunehmen, dass mit steigender Systemkomplexität die Wahrscheinlichkeit für Fehldetektionen, also Nichtdetektion von Fehlern und falsche Fehlerdetektion, steigt. Systeme mit höherer Automation sind als komplexe Systeme genau diesem Dilemma unterworfen.

2.1.3.3 Adaptierbare Workload

Als weiterer Vorteil erweist sich die Möglichkeit die Workload zu adaptieren. Es existiert keine einheitliche Definition von Workload. Laut (Knowles, 1963) ist Workload die Inanspruchnahme von freier Kapazität eines Menschen für weitere Aufgaben. Nach (Wickens, 1981) fehlt hier die Multidimensionalität der Kapazität. Für den weiteren Verlauf dieser Arbeit bildet diese Definition ein ausreichendes Modell, um beurteilen zu können, ob ein System besser oder schlechter im Sinne von mehr oder weniger freier Kapazität bei gleicher Aufgabebearbeitung ist.

In Situationen mit hoher Beanspruchung kann das System mit höherer Automation geführt werden, wobei die angesprochenen Unzulänglichkeiten in Kauf genommen werden. Dabei erfüllt es je nach Anwendungsfall den Auftrag zufriedenstellend oder in Extremfällen überhaupt nicht. Bei niedriger Beanspruchung kann die Qualität der Lösung im Sinne des Operateurs auf Kosten höherer Workload gesteigert werden. Zusätzlich ist es so möglich das Situationsbewusstsein des Operateurs zu erhalten, da für die Bedienung auf niedrigerer Ebene ein tieferes Verständnis für die Lage bestehen muss. Nach (Kaber & Endsley, 2004) steigt das Situationsbewusstsein in einigen Situationen mit sinkendem Automationsgrad bis zu einem Maximum bei mittlerem Automationslevel. Dabei spielt vor allem die mit niedrigerem Automationsgrad steigende Integration des Menschen in den Arbeitsablauf eine Rolle. Sehr niedrige Automationsgrade haben dann wieder ein niedriges Situationsbewusstsein. Dies ist anscheinend auf die hohe Arbeitsbelastung und dem damit verbundenen Fehlen von kognitiven Ressourcen bei sehr niedrigen Automationsgraden zurückzuführen.

2.1.3.4 Höhere Akzeptanz

Einhergehend mit der Möglichkeit zur höheren Kontrolle steigt die Akzeptanz durch den Operateur. Es ist davon auszugehen, dass ein System mit der Möglichkeit strikter den Bedienanweisungen zu folgen mindestens genauso gut akzeptiert wird, wie ein System, das abstrakte Anweisung auf eigene Art umsetzt und keine Möglichkeit für einen tiefen Eingriff bietet. Je nach Qualität der Umsetzung und Erwartung des Operateurs sinkt die Akzeptanz des letzteren Systems, womit in den meisten Fällen das erstere System besser akzeptiert wird. Auf die für die Akzeptanz wichtigen Faktoren Vertrauen und Transparenz haben variable Automationsgrade an sich zuerst einmal keinen Einfluss. Diese müssen über andere Maßnahmen, wie beispielsweise eine Selbsterklärung nach (Lettl & Schulte, 2013) erzielt werden.

2.1.3.5 Vorteile beim Einsatz im militärischen Bereich

Neben den genannten Vorteilen variabler Automationsgrade, die für einen militärischen Einsatz ebenfalls relevant sind, sollen in diesem Abschnitt einige weitere dargestellt werden.

2.1.3.5.1 Erweiterung des Einsatzbereichs

Im militärischen Gebrauch gelten einige besondere Umstände. Zunächst kann sich höhere Automation, als Technologiestand, strategisch als Vorteil erweisen. Jedoch ist anzunehmen, dass ein möglicher militärischer Gegner früher oder später den gleichen Technologiestand erreicht, den die eigene Seite besitzt. Im schlechtesten Fall ist ein Gegner technologisch überlegen. Hier gilt jedoch umgekehrt, dass die eigene Seite früher oder später den gleichen Stand erreicht. Demnach ist das Vorhandensein von höherer Automation noch kein langfristiger Garant für einen Vorteil auf dem Gefechtsfeld. Es ist anzunehmen, dass ein Vorteil nur erreicht wird, wenn die eigene Ausrüstung am Rande ihrer technischen Möglichkeiten betrieben wird. Auch auf der Einsatzebene sind Situationen denkbar, in denen der Betrieb eines Systems am Limit notwendig ist, um ein Missionsziel zu erreichen. Demnach muss der maximale Einsatzbereich der automatisierten Systeme nutzbar sein, was aufgrund der oben genannten Einschränkungen durch Verdeckung ohne variable Automationsgrade nicht möglich ist. Dies lässt sich wie folgt begründen. Hat eine Automationsfunktion einen Einsatzraum A, in dem der Betrieb überhaupt möglich ist, dann teilt sich dieser in den Bereich B ohne Gefährdung von Material, Mission oder Menschen und in den Bereich C mit Gefährdung ein. Ein verantwortungsbewusster Systemdesigner wird nun den Einsatzbereich auf B beschränken.

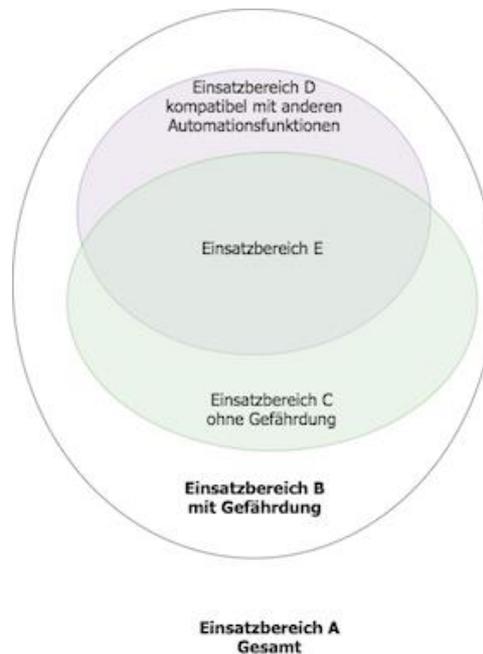


Abbildung 2-5: Einsatzbereich

Dabei spielen sowohl die Einschränkung der Funktionalität zur Vermeidung von Gefährdung, als auch zum Erhalt der Kompatibilität mit höheren Automationsfunktionen eine Rolle. Bei komplexeren Systemen mit höheren Automationsfunktionen ist es nicht mehr möglich das Zusammenspiel in allen Kombinationen ausführlich zu testen, weshalb aus Sicherheitsgründen meist ihr Einsatzraum eingeschränkt wird. Beim Design einer Hierarchie von Automationsfunktionen kann es notwendig sein den Einsatzraum von untergeordneten Funktionen noch weiter einzuschränken, da übergeordnete Automationsfunktionen eventuell nicht mit den Handlungen, den Ergebnissen, oder den dafür zu bestimmenden Parametern umgehen können. Systeme ohne variable Automationsgrade haben prinzipbedingt eine hohe Verdeckung. In einem System mit variablen Automationsgraden kann der Operateur diese Einschränkung ignorieren, wenn er einen direkten Zugriff auf die Automationsfunktion hat, und somit den Einsatzbereich des Gesamtsystems erweitern.

2.1.3.5.2 Taktik

Als wichtiger Punkt und ergänzend zum vorherigen, ist die im militärischen Einsatz entscheidende Taktik zu nennen. Es kann taktisch notwendig sein ein System entgegen des ursprünglich Einsatzzwecks zu verwenden. Dies ist vor allem auf den militärischen Gegner zurückzuführen, der die eigenen Einsatzmittel natürlich auf Schwächen analysiert, um diese auszunutzen. Als einfachster Grund für die Nutzung entgegen des Einsatzzwecks ist demnach die Täuschung zu nennen. In (BMVg, 1998) werden nicht notwendige Bewegungen, den Einsatz von Lichtern und Geräuschen oder den Einsatz von Fernmeldemitteln zur Verwirrung des Feindes empfohlen. Auf ein UAV angewendet ist der Flug mit hoher Motordrehzahl oder der Einsatz von Positionslichtern denkbar. Jedoch kann auch in kritischen Situationen beispielsweise der Absturz eines unbemannten Fluggerätes aufgrund von Treibstoffmangel für einen bestimmten Missionserfolg in Kauf genommen werden. Verhindern Sicherungsfunktionen das System am Limit zu betreiben und lösen beispielsweise eine automatische Rückkehr aus so ist der Nutzen des Systems ohne direkten Zugriff auf die Flugregelung in diesem Szenario gering.

2.1.3.6 Zusammenfassung

Es bietet sich demnach an variable Automationsgrade für jedes automatisierte militärische System zur Verfügung zu stellen. Generell ist es notwendig auf niedrigere Automationsfunktionen zugreifen zu können, um als Benutzer das volle Einsatzspektrum eines automatisierten Systems erreichen zu können. Einzelne Funktionalitäten können dabei mehr oder weniger zur Einschränkung beitragen. Es ist demnach wieder eine Designentscheidung, welche niedrigeren Automationsfunktionen verwendbar gemacht werden sollen. Der Zugriffsgrad hängt dabei von vielen Faktoren wie beispielsweise Sicherheit und Entwicklungsaufwand ab. Je nach Anwendungsbereich kann auch auf den Einsatz von variablen Automationsgraden verzichtet werden. Im weiteren Verlauf dieser Arbeit wird aber von einem militärischen Einsatzzweck ausgegangen.

2.1.4 Nachteile variabler Automationsgrade

Neben den Vorteilen existiert auch eine Reihe von Nachteilen, die im Folgenden beschrieben werden.

Öffnung für Gefährdung: Wie in Kapitel 2.1.1.4 beschrieben, kann durch Einschränkung des Einsatzbereichs mit Hilfe von Verdeckung das Risiko für eine falsche Nutzung einer Funktion oder für das suboptimale Zusammenwirken mehrerer Automationsfunktionen reduziert werden. Durch variable Automationsgrade wird diese Einschränkung aufgehoben, was eine Gefährdung wieder ermöglicht.

Implementierungsaufwand: Der größte Nachteil auf der Designseite ist der zusätzliche Aufwand Eingriffe auf niedrigerer Ebene zu ermöglichen. Dazu gehören, neben dem Zugriffskonzept, die Benutzerschnittstelle, die Implementierung und die zusätzlich erforderlichen Tests.

Zugriffsdesign: Ein weiteres wesentliches Problem ist die Art des Zugriffs. Wie in Kapitel 2.1.2.2 angesprochen existieren vier Möglichkeiten mit diversen Nachteilen.

Notwendigkeit einer zumindest zeitweise vorhandenen Funkverbindung: Der Zugriff auf niedrigere Automation erfordert bei abgesetzten Systemen eine Funkverbindung. Für sehr niedrige Eingriffe muss die Verbindung permanent bestehen, für höhere kann sie auch nur zeitweise notwendig sein. Manuell eingegebene Wegpunkte können vorab übermittelt werden, während kommandierte Steigraten permanent überwacht werden müssen.

Wechsel des Automationsgrades bei Verlust der Funkverbindung: Besonders gravierend wirkt sich ein Funkkontaktverlust auf die Bedienung von niedrigen Automationsfunktionen aus. Wird beispielsweise über Richtungskommandos geführt, so ist eine permanente Kontrolle notwendig. Beim Ausbleiben der Funkverbindung würde, je nach Implementierung, das System weiterhin die zuletzt kommandierte Richtung beibehalten.

2.1.5 Zusammenfassung

Variable Automationsgrade versprechen gerade im militärischen Bereich, neben anderen Vorteilen, eine Erweiterung des Einsatzspektrums. Jedoch müssen vor einem breiten Einsatz die entstehenden Nachteile beseitigt oder wenigstens reduziert werden. Um es mit Rasmussens Worten zu sagen:

“The operator’s job is to make up for holes in designers’ work.” (Woods & Hollnagel, 2006)

Dazu müssen dem Operateur allerdings auch die entsprechenden Eingriffsmöglichkeiten zur Verfügung stehen. Dies wird durch den Einsatz von variablen Automationsgraden ermöglicht. Das Ziel dieser Arbeit ist die Erarbeitung und Erprobung eines Systemkonzepts, welches die

Vorteile von variablen Automationsgraden ermöglicht ohne durch die Nachteile zu stark eingeschränkt zu werden.

2.2 Anwendungsfall

Diese Arbeit hat die Erstellung und Erprobung eines Systemkonzepts für variable Automationsgrade in der UAV-Führung in zwei konkreten Anwendungsfällen als Ziel. Beide vereint die Vorgabe, dass unbemannte Fluggeräte für Aufklärungszwecke eingesetzt werden sollen. Der Unterschied besteht in der Anzahl der Fluggeräte und im Arbeitsplatz, der für die Steuerung zur Verfügung steht.

Im ersten Anwendungsfall soll ein unbewaffneter bemannter Transporthubschrauber gemeinsam mit unbemannten fliegenden Einheiten (MUM-T, manned-unmanned-teaming) eingesetzt werden, um dessen Einsatzfähigkeiten wesentlich zu steigern. Dazu zählen einerseits die Voraufklärung von Routen und Gebieten, so dass ein Einsatz in Fällen mit kurzer Vorlaufzeit ohne Voraufklärung möglich ist. Andererseits sind das Finden und Überprüfen von geeigneten Landemöglichkeiten und die Überwachung der eigenen Boden- und Landeoperationen aus der Luft Teil des gewünschten Funktionsumfangs. Das Konzept ist in Abbildung 2-6 dargestellt.

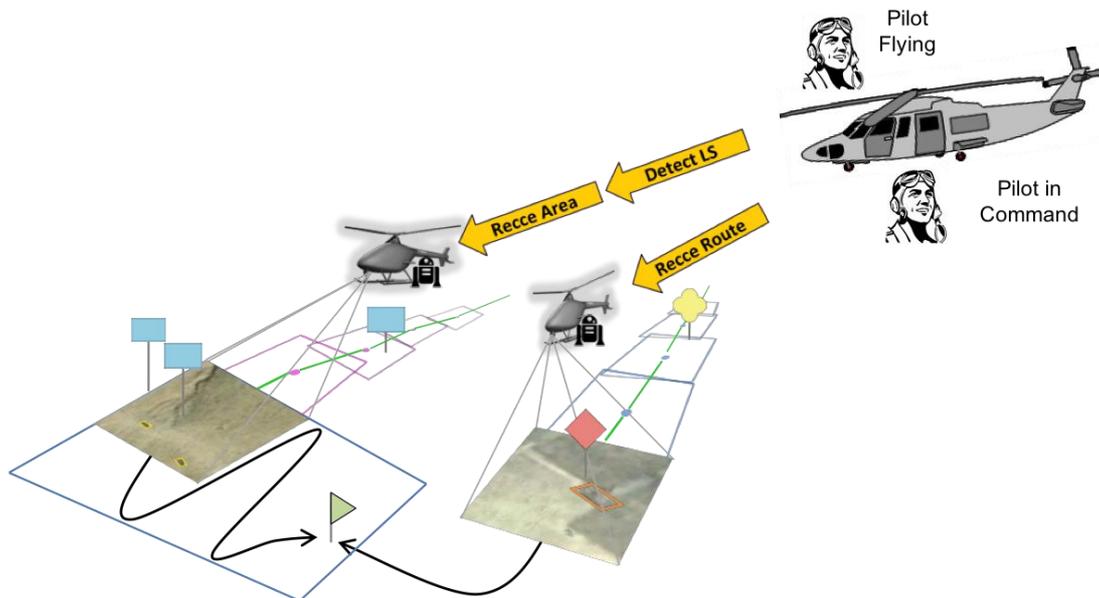


Abbildung 2-6: Übersicht MUM-T Konzept

Der zweite Anwendungsfall sieht die Steuerung eines einzelnen UAVs von einer Bodenkontrollstation (BKS) vor. Sowohl die Reduzierung der UAV Anzahl, als auch die entfallenden Pilotentätigkeiten tragen zu einer Verringerung der Arbeitsbelastung bei. Jedoch soll auch hier der Bedienungsaufwand geringgehalten werden, um dem Bediener die Möglichkeit für andere Tätigkeiten zu geben. Dieser Anwendungsfall steht stellvertretend für die Benutzung durch Infanterie oder Konvoifahrzeuge, bei der ein eigener Arbeitsplatz nur für die Führung von UAVs meist nicht möglich ist. Die Konstellation ist in Abbildung 2-7 dargestellt.



Abbildung 2-7: Übersicht Einsatz mit BKS

In beiden Fällen werden übliche Aufklärungsdrohnen eingesetzt, die mit schwenkbaren Kameragimbals ausgestattet sind und in ihrer Standardkonfiguration in der Lage sind festgelegten Wegpunkten zu folgen. Für eine Erhöhung des Automationsgrads der Flugführung und für die Sensorsteuerung wird zusätzlich ein Bordcomputer mit eingerichtet. Auf diesem laufen Softwareagenten, welche auftragsbasiert geführt werden können. Der Bediener ist demnach in der Lage der Drohne über einen Datenlink Befehle zu geben und die Aufklärungsergebnisse zu empfangen.

2.3 Stand der Technik

In diesem Kapitel soll der Stand der Technik zu variablen Automationsgraden in Luftfahrzeugen vorgestellt werden.

2.3.1 Betrachtungsschwerpunkt

Bei den Anwendungsfällen handelt es sich um Mensch-Maschine-Systeme, in denen der Nutzer automatisierte Systeme im Anwendungsbereich unbemannter Luftfahrt einsetzt. Dabei sind entweder alle Parteien fliegend oder nur die unbemannte Komponente. Es soll also in diesem Kapitel der existierende Stand der Technik im Bereich Luftfahrt im Hinblick auf variable Automationsgrade in der Missionsautomation betrachtet werden. Dabei ist vor allem interessant, wie variable Automationsgrade umgesetzt werden oder werden könnten, wie die Einbindung des Menschen stattfindet und welche Defizite bei den aktuellen Implementierungen bestehen.

2.3.2 Automation in bemannten Luftfahrzeugen

In der bemannten Luftfahrt werden zur Flug- und Missionsführung Automationsfunktionen eingesetzt, die eine hohe Komplexität und Ausfallsicherheit aufweisen. Die Funktionalität der Missionsautomation ist jedoch meist auf das Flugmanagementsystems oder einen Autopiloten beschränkt. In diesem Abschnitt soll anhand eines der modernsten Luftfahrzeuge, des Airbus A380, ein Überblick über den Stand der Automation in der bemannten Luftfahrt gegeben werden.

Die Systeme des A380 umfassen zum automatisierten Flug (engl. Auto Flight System, AFS) die zwei Funktionalitäten Flugführung (engl. Flight Guidance, FG) und Flugmanagementsystem (engl. Flight Management Systems, FMS). Ersteres ist für den kurzfristigen lateralen und vertikalen Flug zuständig und letzteres für Flugplanung,

Positionsbestimmung und langfristigen Flug. Die Systeme könne einzeln oder kombiniert betrieben werden. Airbus bezeichnet den direkten Betrieb der Flugführung durch den Piloten als Selected Guidance und den Betrieb der Flugführung durch das FMS als Managed Guidance. Dies ist in Abbildung 2-8 dargestellt.

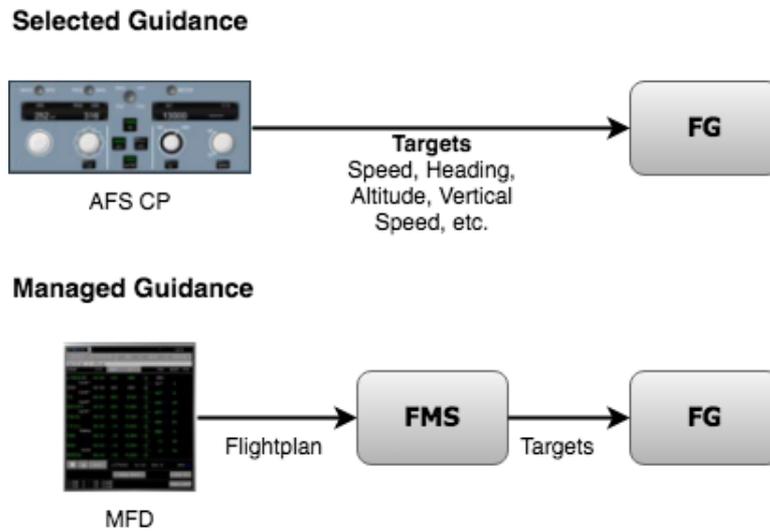


Abbildung 2-8: Direkter und hierarchischer Betrieb des AFS im Airbus A380

Über das AFS Control Panel (AFS CP) kann die Flugführung direkt angesprochen werden und auf die entsprechenden Zielwerte eingestellt werden. Über das Multifunktionsdisplay (MFD) wird hingegen ein Flugplan eingegeben, welches wiederum durch das FMS in Zielwerte für die Flugführung heruntergebrochen wird.

Die Flugführung besteht intern aus den Automationsfunktionen Autopilot (AP), zuständig für die Berechnung und Umsetzung der Steuerbefehle für die drei Rotationsachsen, Flight Director (FD), zuständig für die Darstellung der berechneten Werte in den Cockpitanzeigen und Autothrust, zuständig für Berechnung, Umsetzung und Anzeige der Steuerbefehle für die Triebwerke. Das FMS besteht aus einem Flightmanagementcomputer (FMC). Die Systeme sind redundant ausgelegt und können interne Fehler erkennen. Zusätzlich kann der Pilot auswählen, welches System verwendet werden soll. Abbildung 2-9 zeigt eine Übersicht über die Beziehungen der Systeme untereinander und über die Eingriffsmöglichkeiten der Piloten.

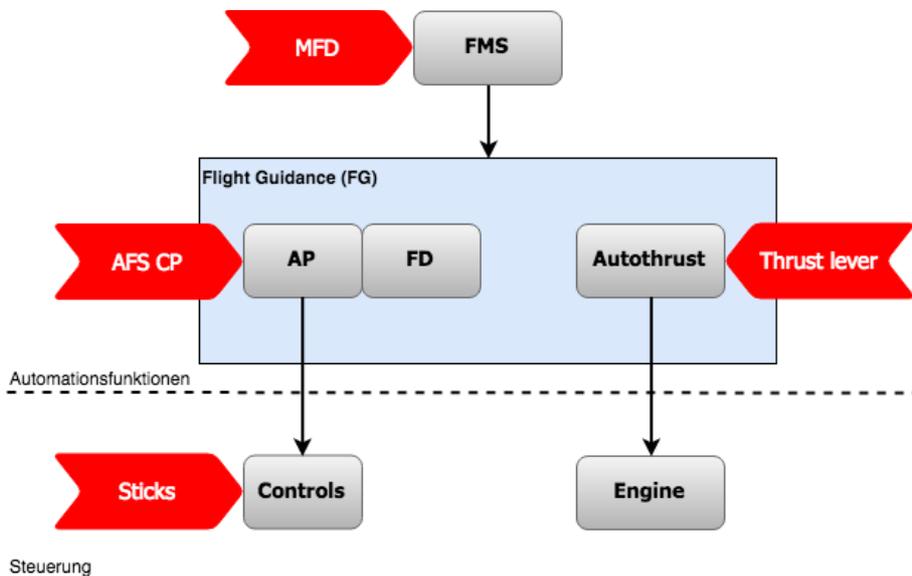


Abbildung 2-9: Eingriffsmöglichkeiten in die Flugführungsautomation im Airbus A380

Hieraus geht hervor, dass es der Crew möglich ist auf unterschiedlichen Ebenen der Automationshierarchie einzugreifen. Das Konzept variabler Automationsgrade befindet sich demnach bereits im Praxiseinsatz.

2.3.3 Automation in unbemannten Luftfahrzeugen

Im Gegensatz zu den bemannten Systemen ist bei Drohnen die räumliche Trennung zwischen Operateur und Luftfahrzeug vorhanden. Deshalb sind andere Aspekte bei der Interaktion mit dem System zu beachten. Dies betrifft vor allem Situationsbewusstsein und Eingriffsmöglichkeiten. Beides ist in fast allen Fällen von einer Funkverbindung abhängig. Hauptursachen der hier diskutierten Problemfälle sind ein Ausfall oder eine unzuverlässige Übertragung der Funkverbindung. Deshalb sind unbemannte Luftfahrzeuge meist höher automatisiert, um nicht auf kontinuierliche Eingaben angewiesen zu sein.

2.3.3.1 Konventionelle Automation

Unter der konventionellen Automation sollen hier Automationsfunktionen ohne höhere kognitive Fähigkeiten, wie Missionsplanung oder Situationsverständnis, bezeichnet werden. Dabei kann es sich um Flugführungssysteme oder Missionsautomation handeln.

2.3.3.1.1 Beschreibung

Aktuell erhältliche Systeme im Hobbybereich und für die gewerbliche Nutzung bieten in diesen Grenzen bereits variable Automationsgrade an. Meistens wird jedoch die manuelle Steuerung vom Autopiloten durch Funktionen wie das Halten der aktuellen Höhe oder durch die Einschränkung auf das manuelle Kommandieren von Raten, wie Dreh- oder Steigrate, unterstützt. Einige Systeme erlauben auch eine automatische Planung der Wegpunkte, z.B. durch die Vorgabe eines Zielgebiets für den Sensoreinsatz. Der anschließende Flug ist jedoch weiterhin wegpunktbasiert und kann dementsprechend nicht auf Änderungen reagieren. Die Variabilität des Automationsgrads wird im Flug meist durch eine direkte Eingriffsmöglichkeit des Bedieners auf die manuelle Steuerung, beispielsweise des Sensors oder des Luftfahrzeugs, erzielt. Auch während des Wegpunktfluges werden dann manuelle Steuereingaben direkt angewendet, was beispielsweise ein Ausweichen oder eine Korrektur der Flugbahn ermöglicht. Bei einigen Starrflügelsystemen, die sich im permanenten Vorwärtsflug befinden müssen, erfolgt die Rückkehr zur Wegpunktführung sobald die manuellen Steuerkommandos ausbleiben². Dies ermöglicht dem Bediener einen schnellen Wechsel, was vor allem bei Verlust des Sichtkontakts oder einer Ablenkung hilfreich ist. Zusätzlich ist der Fall des Funkverbindungsverlusts abgedeckt, da hier die manuellen Steuersignale ebenfalls ausbleiben. Bei schwebefähigen Systemen ist oft eine explizite Anweisung des Bedieners zur Rückkehr in den Wegpunktmodus erforderlich³. Dies ermöglicht eine komfortablere Steuerung des Schwebens, da hier meist nur wenige Korrekturingriffe nötig sind. Gleichzeitig ist aber der Weg zurück in höhere Automationsgrade bei Zwischenfällen nicht offen, bzw. muss vor Missionsbeginn beispielsweise über ein Zeitlimit festgelegt werden. Dies kann je nach Situation zu den weiter oben beschriebenen Problemen führen.

In den meisten militärischen Systemen existieren ebenfalls variable Automationsgrade nach der Definition in Kapitel 2.1.1.3. Diese sind teilweise historischen Entwicklungen geschuldet, da eine anfangs manuelle Steuerung durch einen Autopiloten und später durch eine Wegpunktführung unterstützt wurde. Meist sind die niedrigeren Automationsgrade weiterhin

² Quantum-Systems GmbH. NO COMPROMISE. JUST FLY. 2016. 12 p.

³ PARROT Drones SAS. ÜBERSICHT ÜBER IHRE PARROT DISCO. In: PARROT DISCO MANUAL. 2015. 100 p.

im System verfügbar, also nicht nach der Einführung der höheren Automationsgrade aus der Benutzerschnittstelle entfernt worden. Dies ist beispielsweise bei der US-amerikanischen MQ-9 Predator B/Reaper der Fall (Williams, 2004). Hier kann durch eine Auswahl im Bedienmenü der aktuelle Automationsgrad von Wegpunktsteuerung auf manuellem Flug geändert werden. Höhere Automationsfunktionen gehen über das Spektrum der bisher gezeigten Automation hinaus. Ein aktuelles Beispiel ist die Flugführung eines unbemannten Luftfahrzeugs durch Steuerung der Missionssensorik. Dabei wird beispielsweise im Heron von IAI der momentane Flugweg automatisch so angepasst, dass das aktuelle Objekt im Sensorfokus optimal eingesehen werden kann (Chemla, 2003). Bewegt der Operateur den Sensor, so passt sich auch der Flugweg an. Dadurch kann der Sensoroperateur das Luftfahrzeug allein steuern. Diese Automationsfunktion bedient sich dabei untergeordneter Funktionen, wie festgelegten Flugfiguren im Autopiloten und Wegpunktflug. Da der Mensch auf diese ebenfalls Zugriff hat, handelt es sich auch hier um ein System mit variablen Automationsgraden.

2.3.3.1.2 Diskussion

Bei den hier dargestellten Formen variabler Automation handelt es sich meist um klar hierarchisch strukturierte Systeme. Die Aufgaben werden nach dem Trading Modell von (T. B. Sheridan, 1992) entweder durch den Nutzer oder die Automation ausgeführt. Der Nutzer wählt eine Eingriffsebene und weist damit automatisch alle darunter liegenden Aufgaben der Maschine zu. Anschließend ist der Automationsgrad Mensch und Maschine bekannt, was im Hinblick auf die Transparenz des Systemverhaltens hilfreich ist. Dies ist vor allem deshalb möglich, da die Anzahl der Automationsgrade begrenzt ist und die Systemkomplexität in diesem Aspekt bei den vorgestellten Systemen nicht besonders hoch ausfällt. Wird das System komplexer so kann auch hier Mode Confusion auftreten, wie im anfangs beschriebenen Vorfall mit einem MQ-9 Predator dargestellt wurde. Insgesamt eignen sich die Umsetzungen nicht für Systeme mit höheren Automationsgraden, da dies meist mit einer deutlich höheren Systemkomplexität einhergeht.

2.3.3.2 *Missionsautomation mit höheren kognitiven Fähigkeiten*

In (Uhrmann & Schulte, 2012) wurde das Konzept der auftragsbasierten Führung zur Kommandierung von kognitiven Agenten entwickelt. Die Fähigkeit der Agenten Aufträge zu verstehen und im Rahmen der Lage sinnvoll auszuführen führte zu einer erheblichen Reduktion der Belastung des Operateurs und dadurch zu der Möglichkeit bis zu drei UAVs durch eine Person steuern zu lassen. Ein wichtiger Untersuchungsschwerpunkt war die nach Uhrmann definierte Stringenz. Hierbei handelt es sich um die Autorität, die ein Agent bei der Planung und Ausführung eines Auftrags hat. Beispielsweise kann eine Anweisung an das UAV nur aus einem Auftrag ein Ziel aufzuklären bestehen oder aus einer Reihe von Vorgaben wie dieses Ziel anzufliegen und aufzuklären ist. Uhrmann beschränkt sich bei seiner Definition auf die auszuführenden Aufgaben und deren Vorgabe durch den Menschen. Parameteränderung an der Umsetzungsart oder ein Eingriff auf niedrigere Automationsgrade sind dabei nicht möglich. Nach der getroffenen Definition kann Stringenz daher als variabler Automationsgrad im auftragsbasierten, also hochautomatisierten, Teil der Automationshierarchie angesehen werden. Komplexere Aufträge sind in diesem Fall aus einfacheren Teilaufträgen zusammengestellt. Letztere könne auch vom Menschen direkt erteilt werden. Es findet somit ein Zugriff auf unterschiedlichen Ebenen der Automationshierarchie statt. Damit handelt es sich um eines der ersten kognitiven Systeme mit variablem Automationsgrad.

(Clauß & Schulte, 2014) setzte das COSA2-Framework für die Erstellung eines Agenten zur Steuerung eines Aufklärungs-UAVs ein und wies dessen Funktionsfähigkeit in Flugexperimenten nach. Dabei erweiterte er das auftragsbasierte Führungskonzept um Eingriffe des Operateurs auf niedrigerer Ebene, um beispielsweise die menschlichen Fähigkeiten zur

Handhabung der Sensorik einzusetzen. Dazu entwickelte er das Konzept der Etikette zwischen Mensch und kognitivem Agent und den Begriff der leitenden Kontrolle eines Agenten (engl. Agent-Supervisory-Control). Im Forschungsdemonstrator Sagitta wurde diese kognitive Missionsautomation auf Basis von COSA2 eingesetzt⁴. Die manuelle Steuerung ist hier nur für Start- und Landung und für Notfälle vorgesehen und wird von dafür vorgesehenem Personal durchgeführt. Die Missionssteuerung erlaubt als niedrigste Eingriffsebene die Wegpunktführung. Die Bedienung erstreckt sich jedoch bis in die auftragsbasierte Führung. Das von (Clauß & Schulte, 2014) erarbeitete Konzept der Agent-Supervisory-Control sieht den Eingriff des Operateurs in die Planausführung vor, falls einzelne Aufgaben existieren die der Agent an Bord nicht erfüllen kann. Diese sogenannten virtuellen Fähigkeiten werden vom Menschen bereitgestellt. Hierzu zählen zum Beispiel die Führung des Sensors und die Auswertung der Sensorbilder. Damit handelt es sich ebenfalls um ein System mit variablen Automationsgraden. Das Besondere ist jedoch, dass der Mensch nicht entscheiden kann auf welcher Ebene er eingreifen möchte. Bei den virtuellen Fähigkeiten besteht jedoch eine sehr breite Eingriffsmöglichkeit.

Der Playbook-Ansatz nach (Miller, Goldman, & Funk, 2004) kombiniert eine Planungskomponente, eine Ausführungskomponente und eine gemeinsame Sprachdefinition zwischen Benutzer und System, die sogenannten Plays. Diese sind ähnlich zu Spielzügen wie sie in Sportarten, beispielsweise dem amerikanischen Football, vorkommen. Der Teamführer und die Mannschaft trainieren die Handlungsweisen jedes einzelnen bei einem entsprechenden Play. Wird der Spielzug dann im Spiel durch den Teamführer angesagt, wissen alle Beteiligten um ihre Rolle und welches Verhalten sie von den Mitspielern erwarten können. Dies ermöglicht die Kodierung von komplexem Verhalten in wenigen Worten und damit ein gemeinsames Verständnis für alle Beteiligten. Dieser Ansatz wurde von (Miller et al., 2004) auf die Führung von mehreren UAVs angewendet. Der Bediener als Teamführer kommandiert einen Spielzug und kann dadurch schnell komplexes aber gleichzeitig vorhersehbares Verhalten bei den UAVs erzeugen. Im Unterschied zu den bisher vorgestellten zielebasierten Architekturen finden die Handlungen der UAVs nach einem Ablaufskript statt und können sich entsprechend nicht gut an neue Situationen anpassen. Es obliegt dem Bediener in solchen Situationen die Plays so abzurufen, dass das erwünschte Ergebnis eintritt. Dazu ist es möglich die unterschiedlichen Stufen der Automatisierung von Plays zu nutzen und beispielsweise einige UAVs detaillierter zu führen. Das System IMPACT (Intelligent Multi-UxV Planner with Adaptive Collaborative/Control Technologies, (Behymer et al., 2017)) implementiert das Playbook Konzept, um einem Operateur die Führung von bis zu 15 unbemannten Fahrzeugen zu ermöglichen. Diese bestehen aus je 5 Luft-, Boden- und Wasserfahrzeugen und werden zur Sicherung einer Militärbasis eingesetzt. Diese hohe Anzahl an zu kontrollierenden Elementen birgt einige Herausforderungen. Dazu verwendet IMPACT ein integriertes System aus hohem Automationsgrad für die unbemannten Fahrzeuge, eine geeignete Benutzeroberfläche und ein Assistenzsystem zur Unterstützung bei Aufgaben wie Patrouille im Gebiet oder entlang von Strecken, Verfolgung von sich bewegenden Objekten und das Überwachen von Positionen. Variable Automationsgrade sind in diesem System auf zwei Arten implementiert. Die Auswahl der Plays, welche sich von einfachen Bewegungen eines Fahrzeugs bis hin zu komplexen Schwarmalgorithmen erstreckt, entscheidet anfangs über den gewählten Automationsgrad. Im Anschluss können die Parameter der meisten Plays angepasst werden. Dies erlaubt eine detailliertere Kontrolle und stellt einen Eingriff des Operateurs in die Automationshierarchie dar. Je nach Play ist die Auswahl der einstellbaren Parameter eingeschränkt, um die Komplexität nicht zu stark zu erhöhen, was einen bewussten Einsatz von Verdeckung darstellt. Außerdem ist die Auswahl der Plays atomar, das heißt obwohl die Automation im Hintergrund eine Hierarchie von Funktionen einsetzt, ist dem Operateur nur die oberste Ebene des

⁴ Airbus Defence and Space. (2017). *Successful first flight for UAV demonstrator SAGITTA*. München

jeweiligen Plays zugänglich. Die Verfügbarkeit von variablen Automationsgraden ist somit stark limitiert.

2.3.4 Zusammenfassung

Wie gezeigt sind Systeme mit variablem Automationsgrad bereits im Einsatz. Dabei handelt es sich meist um Systeme mit konventioneller Automation und damit geringer Komplexität beim Wechsel des Automationsgrads. Jedoch stehen auch Systeme mit kognitiven Automationsfunktionen aus der Forschung an der Schwelle zum Praxiseinsatz. Dies ist vor allem im Bereich der unbemannten Luftfahrzeuge der Fall. Die bisher gezeigten Ansätze variabler Automationsgrade mit kognitiven Automationsfunktionen weisen jedoch einige Schwächen auf. Dabei wird entweder der Zugriff auf niedrigere Automationsfunktionen erst gar nicht ermöglicht oder ein Zugriff deaktiviert höhere Automationsfunktionen, ähnlich den Umsetzungen konventioneller Automation. Beides stellt, wie im vorherigen Kapitel gezeigt wurde, eine Einschränkung des Einsatzraumes dar und ist demnach nicht optimal.

3 Konzept

In diesem Kapitel soll ein Systemkonzept zum Umgang mit variablen Automationsgraden im genannten Anwendungsfall hergeleitet werden. Dazu findet erst eine Analyse des Problemfelds in Hinsicht auf Verhalten und Interaktionen der handelnden Entitäten statt. Anhand der Erkenntnisse wird dann ein Konzept zum Umgang mit variablen Automationsgraden abgeleitet und im Detail vorgestellt.

3.1 Analyse des Arbeitssystems

Im vorliegenden Fall der Führung von UAVs aus dem Hubschraubercockpit oder vom Boden ist es notwendig ein Verständnis des Gesamtsystems zu erlangen, um gezielt ein Konzept für den Umgang mit variablen Automationsgraden erstellen zu können. Da hierbei der Fokus auf der Zusammenarbeit zwischen Mensch und Maschine liegen soll, bietet es sich an ein passendes konzeptionelles Werkzeug einzusetzen. (Onken & Schulte, 2012) schlagen vor, solche Interaktionen als Arbeitssystem zu modellieren. Es beschreibt die Komponenten eines automatisierten Mensch-Maschine Systems und deren Zusammenwirken im Hinblick auf die Durchführung eines definierten Arbeitsprozesses. Dieser hat ein Missionsziel als Vorgabe und wird von außen durch Umweltbedingungen, unterstützende Arbeitsprozesse und Informationen beeinflusst. Der Arbeitsprozess ist in Abbildung 3-1 dargestellt.

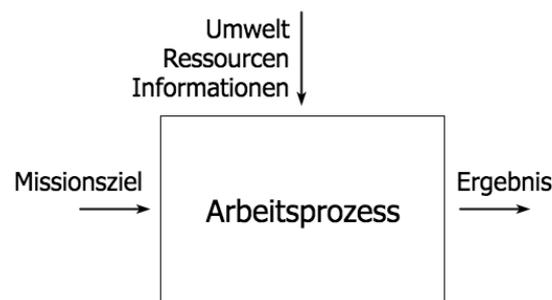


Abbildung 3-1: Arbeitsprozess nach (Schulte, Donath, & Lange, 2016)

Diese Herangehensweise unterstützt die Spezifizierung des Systemverhaltens auf einer übergeordneten Ebene. Anschließend kann das Verhalten der einzelnen Komponenten spezifiziert werden. Außerdem wird durch die Nutzung definierter Begriffe die Kommunikation über das System erleichtert. In (Schulte et al., 2016) wird ein Designprozess für Mensch-Maschine-Systeme mit kognitiven Agenten vorgestellt, der sich am Arbeitsprozess orientiert und im Folgenden angewendet werden soll.

3.1.1 Definition der Missionsziele

Dem Designprozess folgend, sollen zuerst die Missionsziele für beide Anwendungsfälle festgelegt werden.

Das Missionsziel des Arbeitsprozesses für den Hubschrauber ist die sichere und schnelle Durchführung von unterschiedlichen Transportaufgaben.

Das Missionsziel des Arbeitsprozesses in der Bodenkontrollstation ist die sichere, schnelle und zuverlässige Aufklärung von unterschiedlichen Bodenzielen.

In beiden Fällen ist das Hauptziel der UAV-Führung Aufklärungsergebnisse zu generieren. Im Fall des Hubschraubers sollen diese vor allem für die Flugroute erstellt werden und direkt für die eigene Mission zur Verfügung gestellt werden. Demnach muss die Aufklärung nahezu in Echtzeit erfolgen. Im Fall der Bodenkontrollstation sind unterschiedliche Zieltypen aufzuklären. Dies in Echtzeit zu ermöglichen ist ebenfalls wünschenswert, um beispielsweise

das UAV vor Bedrohungen zu schützen. Außerdem sollen die UAVs den Hubschrauber in anderen Tätigkeiten unterstützen. Dazu gehört die Landezonenaufklärung und die Erweiterung Situationsbewusstseins über die taktische Lage, beispielsweise durch Aufklärung von Punktzielen oder Bereichen.

3.1.2 Analyse und Modellierung der umgebenden Arbeitsprozesse

Aus Vereinfachungsgründen wird hier die Analyse auf den Arbeitsprozess des Hubschraubers und der Bodenkontrollstation beschränkt und der Input von anderen Arbeitsprozessen vernachlässigt. Im Anwendungsfall Hubschrauber ist dies legitim, wenn auch im militärischen Kontext nicht sehr realistisch, da der MUM-T Verband isoliert von anderen handeln kann. Das gleiche gilt für den Arbeitsprozess der Bodenkontrollstation. In beiden Anwendungsfällen ändert sich die Vorgehensweise der Handelnden nicht sehr stark.

3.1.3 Aufgabenanalyse des Arbeitsprozesses

Nach dem Designprozess und für ein genaueres Verständnis des Systemverhaltens ist es notwendig die anstehenden Aufgaben des Arbeitsprozesses zu sammeln. Die Analyse soll hier auf die UAV-Führung beschränkt werden. Die Aufgabenanalyse der Hubschrauberführung wird ausführlich in (Honecker & Schulte, 2017) und (Brand & Schulte, 2018) behandelt. Es sollen beide Anwendungsfälle gemeinsam behandelt werden, was aufgrund der Ähnlichkeit der Missionsziele und der Mittel zur Durchführung möglich ist. Als Aufgabe soll hier die Definition nach (Johannsen, 1993) verwendet werden. Im Folgenden werden die hier relevanten Aufgaben in zusammengehörigen Paketen betrachtet. Außerdem sind Aufgaben bei deren Umsetzung höhere kognitive Fähigkeiten wie Planung und Situationsanalyse notwendig sind mit (HKF) gekennzeichnet.

Missionsaufgaben: Da es sich um ein taktisches Aufklärungs-UAS handelt, können Missionsaufgaben durch den Vergleich mit existierenden Systemen ermittelt werden. Basisaufgaben sind die Bewegung innerhalb des kontrollierten Luftraums und die Bewegung im feindlichen Gebiet. Zu den Aufklärungsaufgaben eines solchen Systems gehören beispielsweise laut (US Army, 2011) die Routenaufklärung, die Gebietsaufklärung und die Gebietsüberwachung. Der Anwendungsfall beinhaltet den Einsatz der UAVs vom Hubschrauber aus, woraus weitere spezifische Aufgaben resultieren. Diese sind das Aufklären von Landezonen und das Überwachen von Bodenoperationen des Hubschraubers aus der Luft.

- Bewegung innerhalb des kontrollierten Luftraums
- Bewegung im feindlichen Gebiet
- Routenaufklärung (HKF)
- Gebietsaufklärung (HKF)
- Überwachen von Gebieten (HKF)
- Landezonenaufklärung (HKF)
- Überwachen von Bodenoperationen (HKF)

Planungsaufgaben: Zu den Hauptaufgaben eines militärischen Systems gehört die Umsetzung des Missionsziels in Missionsaufgaben. Deren Reihenfolge und Umsetzung wird in der Missionsplanung am Anfang der Mission bestimmt. Diese Anfangsplanung ist sehr kritisch für den weiteren Verlauf der Mission. Sie beinhaltet die Flugplanung und die Sensoreinsatzplanung. Sie muss unter Beachtung von Luftraumregelungen und taktischer Gegebenheiten erfolgen. Bei Änderungen im weiteren Verlauf der Mission müssen Flug- und Sensoreinsatzplanung stets überprüft und angepasst werden.

- Umsetzung des Missionsziels in Missionsaufgaben (HKF)

- Flugplanung (HKF)
- Sensoreinsatzplanung (HKF)

Koordinierungsaufgaben: Der militärische Einsatz eines Systems verlangt die Koordinierung mit anderen Akteuren auf dem Gefechtsfeld. Nach außen können dies andere Teilnehmer an der eigenen Mission sein, eigene Truppen mit anderem Auftrag oder dritte. Für fliegende oder andere den Luftraum nutzende Systeme, wie beispielsweise Artillerie, ist zusätzlich eine Koordination mit den anderen Luftraumteilnehmern zwingend. Nach innen sind dies die Luftfahrzeuge des eigenen Verbands. Bei MUM-T Systemen ist zusätzlich die Koordinierung zwischen Mensch und Maschine notwendig.

- Koordinierung mit anderen Luftraumteilnehmern (Turm, AWACS, etc.) (HKF)
- Koordinierung mit anderen Missionsteilnehmern (Missionskontrolle, Flugzeuge, Bodentruppen, etc.) (HKF)
- Koordinierung mit dem eigenen Verband (HKF)
- Koordinierung zwischen Mensch und Automation (HKF)
- Koordinierung der UAVs untereinander (HKF)

Regelungsaufgaben: Neben der Flugregelung ist das bei Aufklärungsdrohnen vor allem die Stabilisierung des Sensors.

- Flugregelung
- Sensorstabilisierung
- Tracking

Diese Aufgaben sind teilweise untereinander hierarchisch verknüpft und können durch eine hierarchische Aufgabenanalyse nach (Annett, 2003) eingeordnet werden. Außerdem erfordern die meisten Aufgaben höhere kognitive Fähigkeiten.

3.1.4 Design des Arbeitssystems

Innerhalb des Arbeitsprozesses müssen nach (Schulte et al., 2016) die Rollen „Worker“ (Arbeiter) und „Tools“ (Arbeitsmittel) wahrgenommen werden. Für die Führung mehrerer UAVs aus dem Hubschraubercockpit ist das Arbeitssystem in Abbildung 3-2 dargestellt.

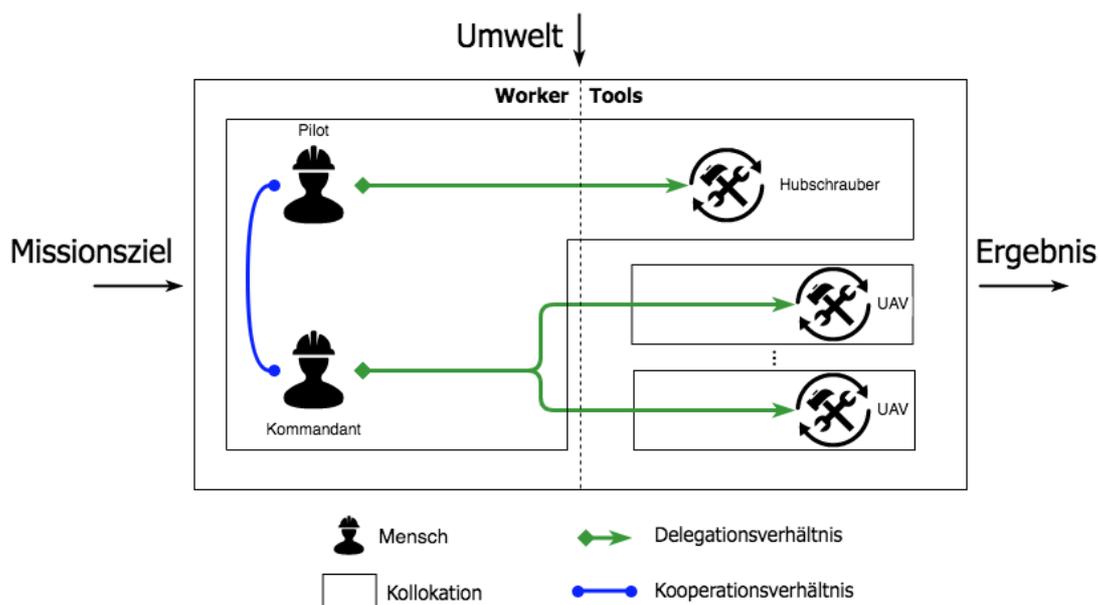


Abbildung 3-2: Arbeitssystem Hubschrauber

Die zwei Mitglieder der Hubschraubercrew nehmen die Rolle des „Worker“ wahr. Ihnen stehen ein moderner Transporthubschrauber und mehrere unbemannte Luftfahrzeuge zur Verfügung. Diese sollen direkt aus dem Cockpit gesteuert werden. Dieses hierarchische Verhältnis zwischen Worker und Tool wird durch grüne gerichtete Pfeile dargestellt. Da es sich bei den Werkzeugen um Systeme mit Sensoren, Aktuatoren und Rechnern handelt, lässt sich deren Bedienung unter der leitenden Kontrolle (engl. Supervisory Control) nach (Thomas B. Sheridan & Verplank, 1978) einordnen. Das bedeutet, zur Steuerung der Systeme erteilen die Piloten dem System Handlungsanweisungen und überwachen anschließend deren Ausführung. Gleichzeitig stehen beide Piloten als Arbeiter in einem Kooperationsverhältnis, das im Arbeitssystem durch eine beidseitig abgerundete blaue Linie symbolisiert wird.

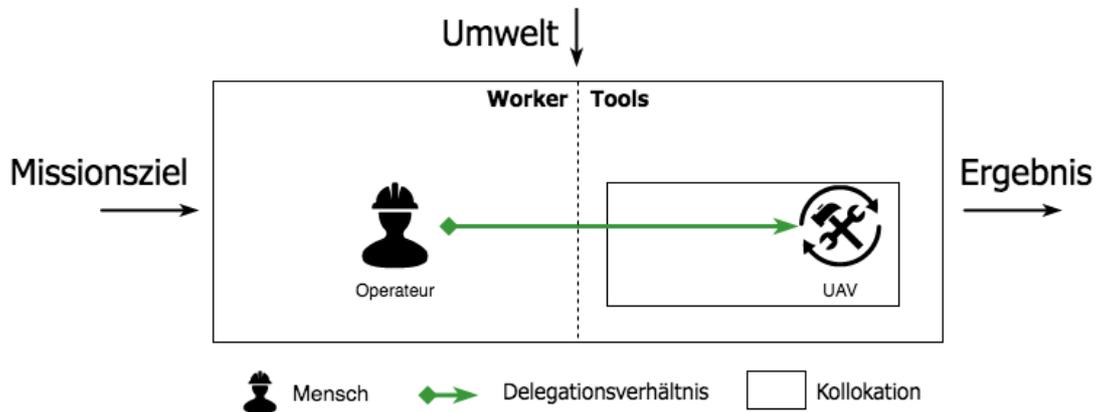


Abbildung 3-3: Arbeitssystem BKS

Abbildung 3-3 zeigt die Führung eines einzelnen UAV aus einer Bodenkontrollstation durch einen einzelnen Operateur. Dieser befindet sich ebenfalls auf der Arbeiterseite und steuert das hochautomatisierte unbemannte Luftfahrzeug im Delegationsverhältnis.

3.1.5 Aufgabenzuweisung

(Greensteins & Lam, 1985) schlagen vor eindeutig zuweisbare Aufgaben bereits beim Entwurf statisch anhand der Fähigkeiten von Mensch und Maschine zu verteilen. Dazu werden die Kriterien Kosten, Zuverlässigkeit und Sicherheit nach (Meister, 1987) herangezogen. Entsprechend der Einordnung im Arbeitssystem auf der Arbeiterseite soll der Mensch für die Umsetzung des Missionsziels in Aufträge an die Automation zuständig sein.

Für die Koordinierung zwischen Nutzer und Automation soll aus Implementierungsgründen der Nutzer selbst zuständig sein. Zu dieser Aufgabe gehört es die Intention des Operateurs zu kennen und zu verstehen. Diese Fähigkeit in der Maschine abzubilden existiert zwar in Ansätzen in der Literatur, beispielsweise in (Suck & Fortmann, 2016) oder (Rao & Murray, 1994), jedoch existiert noch keine zuverlässige technische Lösung.

Aus ähnlichen Gründen soll auch die Koordinierung mit den anderen Luftraumteilnehmern und Missionsteilnehmern durch den Menschen erfolgen. Hierbei ist vor allem die Annahme zugrundeliegend, dass die anderen Teilnehmer entweder selbst Menschen sind oder von diesen geführt werden. Die momentanen technischen Mittel zur Kommunikation mit beliebigen Dritten sind aber noch nicht so weit ausgereift, dass eine fehlerfreie Koordinierung möglich wäre.

- Umsetzung des Missionsziels in Missionsaufgaben
- Koordinierung zwischen Mensch und Automation
- Koordinierung mit anderen Luftraumteilnehmern
- Koordinierung mit anderen Missionsteilnehmern

Stabilisierungsaufgaben auf sensorischer Ebene sollten der Maschine überlassen werden, um den Menschen entsprechend zu entlasten. Auch die mit einem Sensoreinsatz verbundenen Stabilisierungs- und Nachführungsaufgaben sollen der Automation als Aufgabe übertragen werden.

Der Automation sollen demnach folgende Aufgaben fest zugeordnet sein:

- Flugregelung
- Sensorstabilisierung

Für alle weiteren Aufgaben bietet es sich an diese je nach Situation durch die Automation oder den Menschen ausführen zu lassen. Sie sind demnach dynamisch entweder der Automation oder dem Nutzer zugeordnet. Tabelle 3-1 enthält die resultierenden Aufgaben und ihre Zuweisung zum Menschen oder der Maschine.

Tabelle 3-1: Resultierende Aufgaben

Aufgabe	Zuweisung
Umsetzung des Missionsziels in Missionsaufgaben	Mensch
Flugplanung	dynamisch
Sensoreinsatzplanung	dynamisch
Bewegung im Luftraum	dynamisch
Routenaufklärung	dynamisch
Gebietsaufklärung	dynamisch
Landezonenaufklärung	dynamisch
Überwachung von Gebieten	dynamisch
Überwachung von Bodenoperationen	dynamisch
Koordinierung mit anderen Luftraumteilnehmern	Mensch
Koordinierung mit anderen Missionsteilnehmern	Mensch
Koordinierung mit dem eigenen Verband	dynamisch
Koordinierung zwischen Mensch und Automation	Mensch
Koordinierung zwischen den UAVs	dynamisch
Flugregelung	Maschine
Sensorstabilisierung	Maschine
Tracking	dynamisch

Zusätzlich zu den genannten Aufgaben entsteht nun die neue Aufgabe der dynamischen Zuteilung der anderen Aufgaben je nach Situation. Laut (Debernard et al., 1992) kann die Zuteilung auf zwei Arten erfolgen. Die erste ist die vertikale Zuteilung, wonach der Mensch die Zuteilungsentscheidung übernimmt und jede Aktion des Agenten prüft, bevor er sie erlaubt. Der Agent ist dann lediglich in der Rolle einer Entscheidungshilfe oder generiert Vorschläge, wie es in Abbildung 3-4 dargestellt ist.

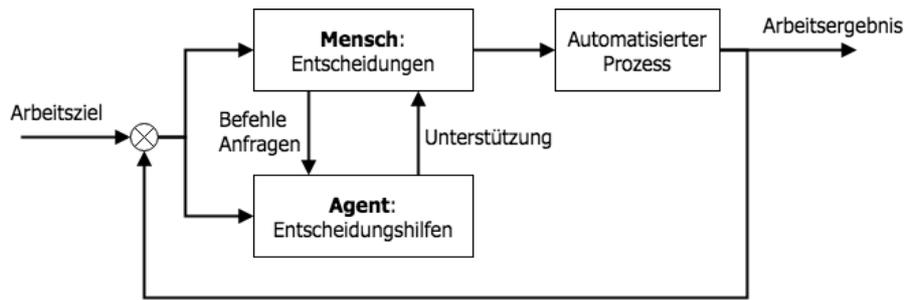


Abbildung 3-4: Aufgabenzuteilungsentscheidung vertikal nach (Debernard et al., 1992)

Ein wesentlicher Nachteil dieser Konstellation ist, dass der Mensch für jede Entscheidung zuständig ist. Dies schließt die Nutzung in einem System mit leitender Kontrolle aufgrund der Arbeitsbelastung im praktischen Einsatz aus. Die Zuteilungsentscheidung kann aber auch horizontal erfolgen. In diesem Fall sind die Entscheidungen des Agenten dann mit den Entscheidungen des Menschen gleichgestellt. Eine dritte, noch zu bestimmende, Instanz übernimmt dann die Zuteilung, wie in Abbildung 3-5 dargestellt.

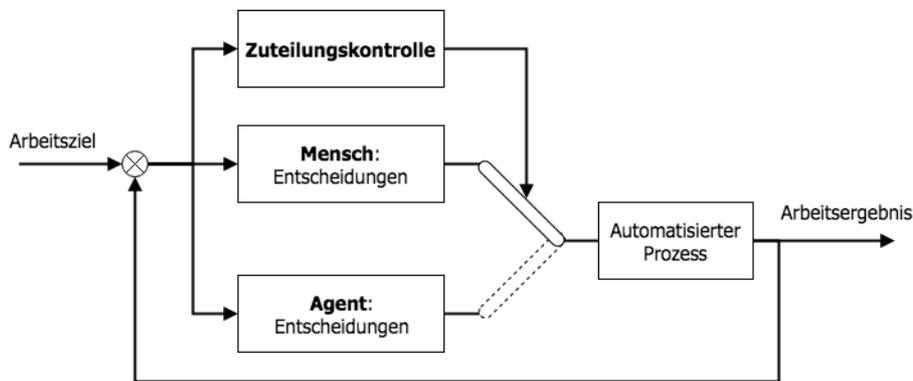


Abbildung 3-5: Aufgabenzuteilungsentscheidung horizontal nach (Debernard et al., 1992)

Es ist sinnvoll, anzunehmen, dass eine für einen bestimmten Einsatz konzipierte Automationsfunktion in der Mehrheit der Fälle gut oder ausreichend funktioniert und nur in Ausnahmesituationen durch den Menschen unterstützt werden muss. Deshalb sollte die Zuteilungskontrolle im Standardfall der Maschine die Aufgabe zuteilen. In den oben genannten Ausnahmefällen sollte der Mensch die Aufgabe übernehmen oder die Maschine unterstützen.

Nun stellt sich die Frage, wer die Rolle der Zuteilungskontrolle ausfüllen kann. Dazu ist ein ausreichendes Verständnis der aktuellen Intention des Menschen notwendig, da nur mit diesem Wissen eine unerwünschte Entscheidung der Maschine erkannt werden kann. Aus diesem Grund sollte zunächst der Mensch diese Aufgabe der Zuteilungskontrolle übernehmen. Dabei sollte er nach Möglichkeit durch die Maschine unterstützt werden, insbesondere dann, wenn die Maschine Missstände in der Entscheidung des Menschen zweifelsfrei erkennen kann. In diesen Fällen wäre es zweckmäßig, wenn die Maschine den Menschen durch entsprechende Warnungen über Fehler informiert.

3.1.6 Einbringung Kognitiver Automation

Für die Aufgaben mit höheren kognitiven Fähigkeiten sieht der Entwurfsprozess nun die Einführung von kognitiven Agenten vor. Dies reduziert nach (Onken & Schulte, 2012) Probleme mit konventionell automatisierten Systeme wie Brüchigkeit, Intransparenz oder Überforderung. In (Uhrmann & Schulte, 2011) wurden kognitive Agenten erfolgreich

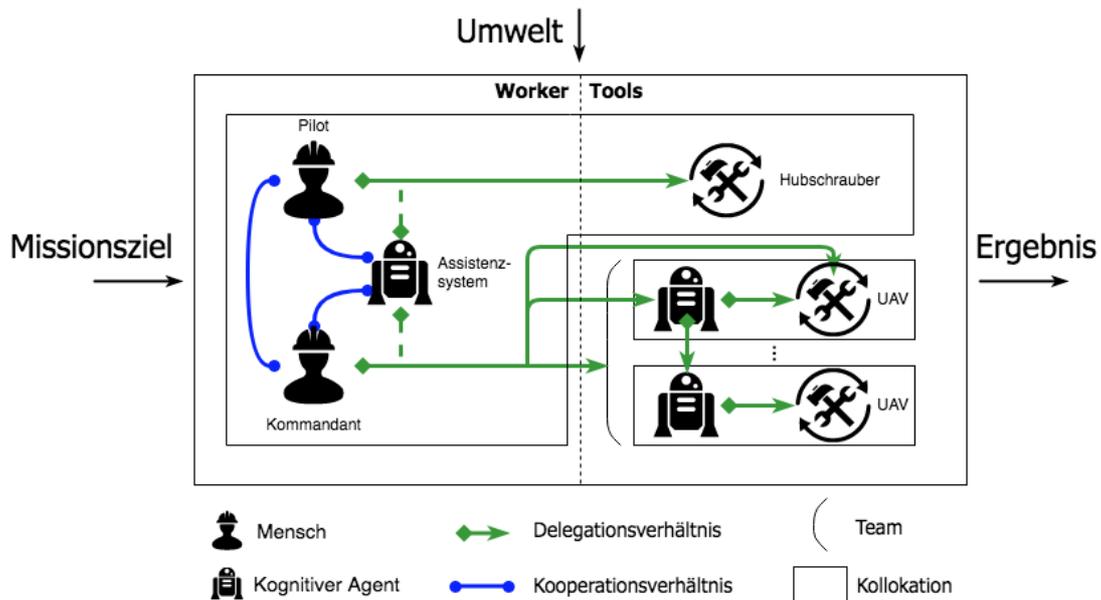


Abbildung 3-7: Arbeitssystem HC mit kognitiver Automation

Die wesentliche Neuerung der hier vorgestellten Anordnung ist die UAVs auf unterschiedlichen Automationsebenen zu führen. Der Arbeiter kann zwischen einer Führung auf Teamebene, einer auftragsbasierten Führung oder einem direkten Eingriff in die konventionelle Automation wählen. Dadurch ist der Automationsgrad nicht mehr festgelegt, sondern nach Situation und Bedarf adaptierbar und adaptiv (variable Automation).

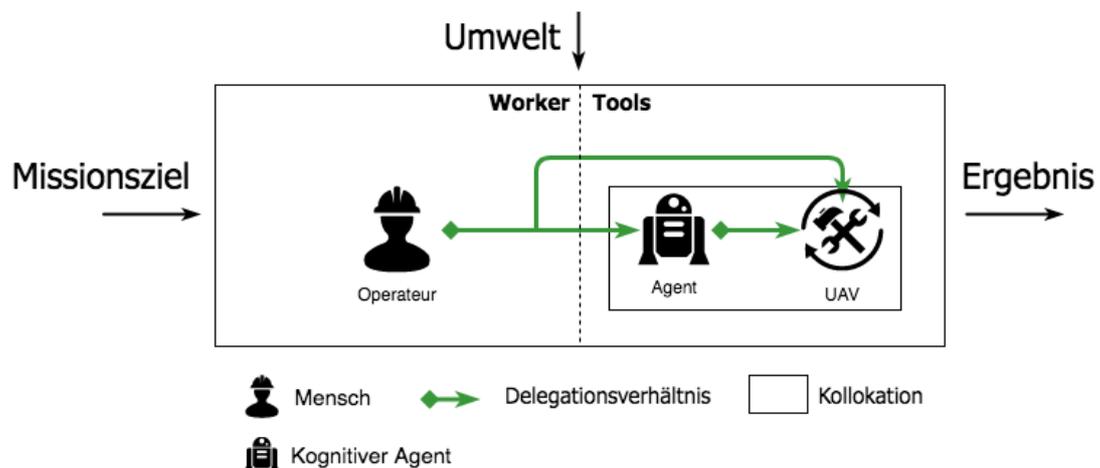


Abbildung 3-8: Arbeitssystem BKS mit kognitiver Automation

Im Arbeitssystem des einzelnen Bedieners ist ein identischer Agent auf der Werkzeugeite eingesetzt worden, der jedoch anwendungsfallbezogen leicht andere Fähigkeiten aufweist. Auf die Einführung kognitiver Automation auf der Arbeiterseite wurde in dieser Arbeit verzichtet. Sie ist jedoch Gegenstand aktueller Forschung wie in (Wohler & Schulte, 2013) und (Theißing & Schulte, 2016) zu sehen ist.

3.2 Herleitung eines Systemkonzepts für den Umgang mit variablen Automationsgraden

In diesem Kapitel soll nun die Entwicklung eines Systemkonzepts für variable Automationsgrade erfolgen. Durch das Design des Arbeitssystems soll mithilfe von kognitiven Agenten erreicht werden, dass bei der Durchführung von Missionen die Belastung der Crew

durch die notwendige Kommandierung der UAVs nicht wesentlich gesteigert werden. Dafür ist eine auftragsbasierte Führung einzeln und im Team vorgesehen. Dabei darf der Agent, durch seine Rolle als Werkzeug, nur im Rahmen der Erfüllung seines Auftrags eigeninitiativ handeln. Dies bedeutet, dass lediglich bei der Ausführung einer Aufgabe nicht spezifizierte Randbedingungen vom Agenten angepasst und optimiert werden können.

3.2.1 Zugriff auf Automationsfunktionen

Für die Umsetzung einer variablen Automation für die Agenten soll zusätzlich die Möglichkeit von direkten Eingriffen existieren. Dadurch sollen auch Eingriffe auf niedrigerem Automationsgrad, wie beispielsweise der Wegpunktplanung zur Flugroutenbestimmung, durch den Operateur ermöglicht werden.

Der freie Zugriff auf Automationsfunktionen ermöglicht es dem Nutzer jederzeit in alle Funktionen der Automationshierarchie einzugreifen, die nicht aus praktischen oder sicherheitstechnischen Gründen unzugänglich sind, und Veränderungen vorzunehmen. Dabei besteht jedoch die Möglichkeit, dass höher automatisierte Funktionen umgangen werden und der auftragsbasierten Ebene dadurch die Intention des Nutzers verborgen bleibt. Dies kann zu einem unterschiedlichen mentalen Bild des gegebenen Auftrags zwischen Nutzer und kognitivem Agenten führen wodurch dieser seine Fähigkeiten nicht mehr oder sogar entgegen den Zielen des Nutzers einsetzt. Das unterschiedliche mentale Bild kann zu unerklärbarem Verhalten der Maschine führen (vgl. (C. E. Billings, 1991)) und damit zu unangenehme Überraschungen des Nutzers, wie in (Woods & Hollnagel, 2006) beschrieben.

Es existieren mehrere Möglichkeiten diesen Problemen zu begegnen und das mentale Bild zwischen Agenten und Nutzer zu synchronisieren. Zum einen kann der Agent versuchen sein mentales Bild dem Nutzer transparent darzustellen, so dass dieser Abweichungen erkennen und beheben kann, wie es beispielsweise in (Denk, Clauß, Borchers, Werner, & Schulte, 2015) erfolgt ist. Dieser Ansatz wird als nicht praktikabel für die permanente Synchronisierung des mentalen Bildes eingeschätzt, da er eine zusätzliche Arbeitsbelastung für den Nutzer darstellt. Eine andere Möglichkeit ist die automatische Erkennung der Intention des Menschen durch den Agenten. Wie oben beschrieben sind die technischen Möglichkeiten in diesem Bereich noch zu eingeschränkt für eine umsetzbare Anwendung. Ein weiterer Ansatz ist die Einschränkung des Zugriffs auf Automationsfunktionen durch den Nutzer. Wird der Zugriff auf bestimmte Funktionen beschränkt und durch ein Kommunikationsmittel geführt, welches die Intention des Nutzers transportiert, so kann das mentale Bild des Auftrags im Agenten synchron gehalten werden. Als Kommunikationsmittel soll der Plan zum Einsatz der Automationsfunktionen verwendet werden.

3.2.2 Pläne und Automationshierarchie

Aus den vorherigen Kapiteln ist hervorgegangen, dass in fast jedem komplexeren automatisierten System eine Automationshierarchie existiert. Niedriger automatisierte Funktionen werden dabei von höheren Automationsfunktionen entsprechend einer Handlungsanweisung oder Plans eingesetzt. Automation mit höheren kognitiven Fähigkeiten ist in der Lage Situationen zu analysieren, zu planen oder Pläne zur Laufzeit entsprechend anzupassen. Dabei bedient sie sich ebenfalls niedriger automatisierter Funktionen, um den Plan zu erstellen oder die Handlungen auszuführen. Pläne sind nach (Russell & Norvig, 1996) definiert als Handlungsketten, also eine Aneinanderreihung von Aktionen in der richtigen Reihenfolge, um ein bestimmtes Ziel zu erreichen. Sie können in zwei Arten eingeteilt werden. Es existieren Pläne mit fester Reihenfolge und Pläne mit teilweise fester Reihenfolge. Außerdem kann ein Plan in linearer und in hierarchischer Form vorliegen. Bei der linearen Form existieren nur ausführbare Aktionen, welche sich auf einer Ebene befinden. Die hierarchische Form hat mehrere Ebenen, wobei die Ebenenanzahl bei jeder Aktion variieren

kann, die unterste Ebene eines vollständigen Plans eine ausführbare Aktion darstellt und die darüber liegenden Ebenen nicht ausführbare Aktionen enthalten.

Bei Plänen für den Einsatz von Automationsfunktionen ist jede ausführbare Aktion einer Automationsfunktion zugeordnet, da diese ja die Anweisung zum Einsatz der Automationshierarchie darstellt. Handelt es sich hierbei um hierarchische Pläne, so können auch die übergeordneten Aufgaben einer Funktion innerhalb der Automationshierarchie zugeordnet werden. Ein hierarchischer Plan bildet also die Automationshierarchie ab, wobei bestimmte Einschränkungen und Sonderfälle existieren können. Diese Eigenschaft soll im weiteren Verlauf ausgenutzt werden. Ein Plan bietet sich als Schnittstelle zur Kommunikation vom Agenten zum Nutzer an, da dieser als Kontrollinstanz über die anstehenden Aktionen des Systems informiert sein muss. Hierarchische Pläne bieten dabei den Vorteil eines schnellen Überblicks und die Möglichkeit bei Bedarf auf Details zuzugreifen.

Dem Benutzer sind die Automationshierarchie und deshalb der Einsatz der Automationsfunktionen untereinander nicht unbedingt bekannt. Bei komplexeren Systemen kann dies schnell die Grenze des Übersichtlichen überschreiten, da eine Vielzahl von Kombinationsmöglichkeiten existiert. Bei der Darstellung dieser Hierarchie als Plan wird diese Anzahl auf den aktuellen Anwendungsfall reduziert und anstelle der eingesetzten Funktionalität die gewünschte Handlung dargestellt. Beide Punkte können zu einer einfacheren Verständlichkeit in der Kommunikation mit dem Operateur beitragen.

3.2.3 Konzept des geführten Zugriffs

Der Ablauf bei der Bedienung mit durch den Plan geführten Zugriff sieht nun vor, dass der Mensch zu Beginn der Mission das Missionsziel in Teilaufgaben herunterbricht und diese dem Agenten als Aufträge erteilt. Der Agent formuliert daraus einen Plan und meldet diesen an den Operateur zurück. Der Mensch fungiert nun als Zuteilungskontrolle (vgl. Abbildung 3-5) und kann beliebige Teile des resultierenden Plans verändern. Dies entspricht einer Übernahme der jeweiligen Funktion und einer Zuteilung an den Menschen. Die nicht veränderten Planabschnitte werden implizit der Maschine zugeteilt.

Der Kern des Konzepts ist es, den Operateur zur Mitteilung seiner Absicht zu bringen indem zu Beginn der Zugriff auf niedrige Automationsgrade zunächst gesperrt ist. Lediglich das Erteilen von Aufträgen nach der auftragsbasierten Führung ist zu Beginn für den Operateur möglich. Da die Aufträge ja die Absicht des Nutzers widerspiegeln, erfährt der Agent diese bei der Auftragserteilung. Anschließend erstellt der Agent einen Plan zur Erfüllung der Aufträge und zeigt diese dem Bediener an. Dieses Vorgehen garantiert, dass im System das momentane Ziel bekannt ist und in weitere Berechnungen einfließen kann. Ist nun ein hierarchischer Plan als Darstellung der Automationshierarchie vorhanden, bietet es sich an, diesen ebenfalls als Schnittstelle vom Menschen zur Maschine also für Eingriffe in die Automation zu verwenden. Deshalb sieht das Konzept vor, die Eingriffe auf niedrige Automationsgrade nur über den jetzt vorhandenen hierarchischen Plan zuzulassen. Der Agent hat damit konzeptionell die Möglichkeit, den Eingriff zuzuordnen und die restliche Planung anzupassen. Durch die Darstellung der Funktion als Aktion bieten sich dem Bediener zwei Möglichkeiten des Eingriffes. Zum einen können Parameter verändert werden, welche die zur Aktion gehörende Automationsfunktion beeinflussen. Zum anderen kann das Ergebnis der Automationsfunktion durch den Menschen entweder verändert oder komplett vorgegeben werden. Die Darstellung als Aktion mit einem erwarteten Ergebnis unterstützt den Bediener wiederum beim Verständnis. Auf Funktionen mit niedrigerem Automationsgrad wird demnach nicht mehr direkt zugegriffen, sondern über die Struktur eines schon vorhandenen Plans. Soll beispielsweise eine Flugroute angepasst werden, so greift der Bediener indirekt über den Auftrag an eine bestimmte Position zu fliegen über die Unteraufgabe einer Route zu folgen auf

die tatsächliche Route zu und verändert diese, beispielsweise durch direkte Manipulation der Wegpunkte auf einer Karte.

3.3 Diskussion des Konzepts

Der wesentliche Unterschied zwischen freiem und geführtem Zugriff besteht in der Einschränkung des Zugriffs auf niedrigere Automationsfunktionen. Dies bringt weitere Unterschiede, beispielsweise in der Bedienung, hervor. Grundsätzlich muss die Nutzung eines hohen Automationsgrades in Form eines Auftrages erfolgen, bevor überhaupt auf niedrigere Ebenen zugegriffen werden kann. Des Weiteren soll jeder Eingriff einem Auftrag oder Unterauftrag zugeordnet werden können. Um dies zu gewährleisten kann die dafür erforderliche Benutzerschnittstelle für niedrigere Funktionen nicht einfach direkt angezeigt werden, sondern muss dynamisch verfügbar sein. Beispielsweise ist es nicht sinnvoll, eine grafische Oberfläche für ein FMS direkt zu übernehmen und zu bestimmten Zeiten ein- oder auszublenden. Ein neues Benutzerschnittstellendesign ist notwendig, das die einzustellenden Parameter oder die manuelle Eingabemöglichkeit in die Oberfläche zur auftragsbasierten Steuerung integriert.

3.3.1 Erwartete Vorteile des geführten Zugriffs

Die generellen Vorteile von variablen Automationsgraden bleiben mit dem Konzept des geführten Zugriffs weitgehend erhalten.

- Hohe Kontrolle durch den Nutzer: Da niedrige Automationsgrade genauso wie beim freien Zugriff zur Verfügung stehen, hat der Bediener falls gewünscht die gleiche hohe Kontrolle über das System.
- Möglichkeit zum Ausgleich von Automationsfehlern: Dies wird durch die im letzten Punkt genannte hohe Kontrolle ermöglicht.
- Höhere Akzeptanz: Diese ist ebenfalls auf die höhere Kontrolle durch den Bediener zurückzuführen. Der Faktor Vertrauen kann eventuell leicht verbessert werden, wenn die Maschine den Menschen bei dessen Vorgehen unterstützt, was nur mit Wissen über die Intention möglich ist, die der Maschine durch das Konzept vermittelt wird.
- Möglichkeit zum Einbringen von implizitem Bedienerwissen: Durch die feinere Kontrolle ist der Bediener in der Lage, sein Wissen in die Planung einfließen zu lassen.
- Möglichkeit der Behandlung von neuartigen Problemen: Durch die Fähigkeit weiterhin auf niedriger Ebene einzugreifen hat der Menschen die Möglichkeit auf neuartige Situationen zu reagieren.
- Möglichkeit zur Einstellbarkeit der Workload: Der Bediener kann entscheiden, welchen Anteil seiner Zeit er für die Bedienung einsetzen möchte und kann dadurch eine situationsangepasste Balance zwischen Kontrolle und Workload schaffen.

Daneben besteht bei der Nutzung des geführten Zugriffs die Möglichkeit auf weitere positive Effekte.

Im Gegensatz zum freien Zugriff erhält der Agent anfangs einen Auftrag, bevor der Bediener mit Eingriffen auf niedrigem Automationsgrad beginnen kann. Dadurch ist der Agent stets über die eigentliche Absicht informiert und kann entsprechend unterstützen. Diese Unterstützung kann beispielsweise in Form von Warnungen oder Vorschlägen erfolgen. Der geführte Zugriff ermöglicht deshalb auch eine bessere Warnung vor Gefährdungen, die durch unbedachte Bedienung der niedrigeren Automationsgrade auftreten können. Im Gegensatz zum freien Zugriff, bei dem generelle Gefährdungen ebenfalls erkennbar sind, besteht jetzt die Möglichkeit Auswirkungen, die den eigentlichen Auftrag, also die Intention des Bedieners gefährden zu

erkennen und entsprechend zu handeln. Für eine solche Erkennung ist eine gute Situationsanalyse notwendig, die der kognitive Agent bieten soll.

Ein weiterer Unterschied ist die lokale Begrenztheit des Eingriffs. Da die Änderungen auf einem Teilbaum des ursprünglichen Plans ausgeführt werden, muss in den meisten Fällen auch nur dieser Teilbaum angepasst oder neu geplant werden. Diese Begrenzung kann die benötigte Rechenleistung vor allem in großen Planungsräumen reduzieren.

Zusätzlich besteht beim geführten Zugriff die Möglichkeit mit weniger Eingaben durch den Nutzer, d.h. weniger Interaktionen mit dem System auszukommen, da der Großteil der Aufgaben über wenige Aufträge und nur die gewünschten Änderungen gezielt durch manuelle Eingriffe an Ort und Stelle vorgenommen werden.

Des Weiteren werden folgende Nachteile von variabler Automation mit freiem Zugriff durch das Konzept adressiert.

Funkverbindung Die Abhängigkeit des Systems von der Funkverbindung wird durch den geführten Zugriff etwas reduziert. Da der Agent über die Intention des Bedieners informiert ist, können temporäre Unterbrechungen oder Verschlechterungen der Funkverbindung vom Agenten ausgeglichen werden, indem der Agent in dieser Zeit im Sinne des Auftrags handelt, oder zumindest grobe Abweichungen vom Auftrag verhindert.

Wechsel des Automationsgrads bei Kontaktverlust Die Eskalation des vorher genannten Problemfalls wäre der Funkverlust über lange Zeit. Der geführte Zugriff verspricht hier seinen größten Vorteil. Während der regulären Ausführung eines Auftrags handelt der Agent bis zum Abschluss des Auftrags. Diesen Vorteil bietet die auftragsbasierte Führung mit ihrem hohen Automationsgrad. Tritt der Kontaktverlust während einer vom Nutzer vorgegebenen Handlung ein, so kann der Eingriff ohne Zutun des Bedieners weiter ausgeführt werden. Lediglich beim Auftreten von Problemen, die vom Agenten durch Erreichen eines Zustandes, der den ursprünglichen Auftrag nicht mehr ausführbar macht, erkannt werden, hat eine Abkehr vom manuellen Eingriff zu erfolgen. Besteht immer noch kein Funkkontakt, so kann der Agent den ursprünglichen Auftrag auf höherem Automationsgrad fortführen. Dies neutralisiert zwar den Vorteil des manuellen Eingriffs wieder, kann jedoch eine ausreichende Qualität der Ausführung möglich machen. Zumindest stellt dies eine wesentliche Verbesserung zum blinden Abarbeiten der manuellen Eingriffe dar.

3.3.2 Erwartete Schwächen des geführten Zugriffs

Der geführte Zugriff birgt jedoch auch konzeptionelle Schwächen, die im Folgenden beschrieben werden.

Darstellung der Funktionen

Ein genereller Nachteil von variablen Automationsgraden ist der Bedarf einer Mensch-Maschine-Schnittstelle zu der jeweiligen Automationsfunktion. Dies wird durch das Konzept des geführten Zugriffs bis auf eine Möglichkeit der Darstellung im hierarchischen Plan nicht wesentlich verändert. Soll beispielsweise ein Zugriff auf die Parameter des Autopiloten möglich sein, so muss eine geeignete Schnittstelle zur Eingabe durch den Nutzer existieren. Dies ist unabhängig davon, ob der Zugriff jederzeit oder nur nach Erteilung eines Auftrags möglich ist.

Voraussetzung einer Auftragseingabe

Ein weiterer Nachteil des Konzepts durch die Voraussetzung zur Auftragseingabe gegeben. Existiert in einer Situation kein passender Auftrag, so ist es nicht möglich die Intention des

Bedieners zu übermitteln. Dieser wird dann dazu genötigt einen für diese Situation unpassenden Auftrag einzugeben, um entsprechende Eingriffe auf niedrigem Level umzusetzen. Dieses Vorgehen widerspricht jedoch der Grundidee des Konzepts. Ebenfalls problematisch ist eine Fehlbedienung mit einem falschen Auftrag. Der Agent versucht nun aktiv bei der Ausführung dieses Auftrags zu unterstützen, welcher jedoch gar nicht die Absicht des Bedieners widerspiegelt. Dies lässt sich mit dem vorgeschlagenen Konzept prinzipbedingt nicht lösen. Hier wäre eine Unterstützung auf einer höheren Ebene, beispielsweise in Form eines Assistenzsystems mit Absichtserkennung notwendig, welches den Missstand erkennt und einen zur Absicht passenden Auftrag vorschlägt. Solche Ansätze werden beispielsweise in (Suck & Fortmann, 2016) oder (Rao & Murray, 1994) verfolgt.

3.3.3 Mögliche Arten des Zugriffs

Nach der Festlegung des Zugriffskonzepts soll nun eine Diskussion der möglichen Zugriffsarten erfolgen. Im Wesentlichen existieren zwei Möglichkeiten, Einfluss auf eine Automationsfunktion zu nehmen. Zum einen können die Parameter, wie beispielsweise die Flughöhe für eine Routenplanung, und zum anderen das Ergebnis einer Automationsfunktion, wie beispielsweise die resultierende Flugroute, manipuliert werden.

Die Parametermanipulation ist technisch sehr einfach. Jedoch sind bei komplexeren Funktionen die Auswirkungen einer Veränderung durch den Nutzer schlecht abschätzbar. Deswegen bietet sich hier die Festlegung von Limits oder Richtwerten im Gegensatz zu Optimierungsparametern mit weniger intuitiver Erfassbarkeit an.

Die Ergebnismanipulation reicht von kleinen Veränderungen bis zum vollständigen Ersetzen des Ergebnisses durch eine manuelle Lösung. In diesem Fall sind Auswirkungen eines Eingriffs direkt ersichtlich. Außerdem bietet er den größtmöglichen Einfluss auf die Automationsfunktion.

In der Auswahl der Zugriffsart besteht eine weitere Designentscheidung, die für jede einzelne angebotene Funktion sorgfältig abgewogen werden muss. Dabei ist es sicher hilfreich sich an Aspekten der Mensch-Maschine-Kommunikation wie intuitiver Nutzbarkeit oder Bedienoberflächenrichtlinien zu orientieren. Für viele Automationsfunktionen ist bereits eine optimale Bedienerschnittstelle bekannt und erprobt.

3.4 Anwendungsfall UAV

Die Anwendung des Konzepts des geführten Zugriffs ist in vielen Bereichen denkbar. So könnte beim Betrieb eines "autonomen" Autos erst das Fahrtziel genannt werden und kleinere Korrekturen, wie beispielsweise das Abbiegen auf die bevorzugte, aber weniger optimale Route, im Nachhinein angeordnet werden. Gleiches gilt für den Betrieb automatisierter Schiffe. Auch bei der automatisierten Fertigung eines Werkstücks kann der Zielzustand vorgegeben werden und bei einzelnen Fertigungsschritten ein manueller Eingriff erfolgen. In allen Fällen hat die Automation dann die Möglichkeit vor Änderungen, die ein Erreichen des Ziels unmöglich machen oder stark einschränken zu warnen. Für den Rest der Arbeit wird der Anwendungsfall auf den einer Aufklärungsdrohne beschränkt. In diesem Abschnitt sollen die Besonderheiten des Konzepts für diesen Anwendungsfall genauer beschrieben werden.

3.4.1 Grundlagen

Wie weiter oben beschrieben stellt der Einsatz von kognitiven Agenten die höchste Stufe der hier untersuchten Automationsgrade dar. Diese werden durch einen Softwareagenten mit kognitiven Fähigkeiten, wie Planung und Situationsbeurteilung, auf dem Bordcomputer ermöglicht. Der Agent soll in die Lage versetzt werden, Aufträge des Bedieners zu verstehen und entsprechend zu verarbeiten. Er kann demnach auftragsbasiert geführt werden. Um das

Konzept zu demonstrieren, soll nun ein Spektrum von hohen bis niedrigen Automationsgraden ermöglicht werden, welche durch den Eingriff in die genutzte Automationshierarchie umgesetzt werden. In Abbildung 3-9 ist eine mögliche Automationshierarchie für den Anwendungsfall abgebildet.

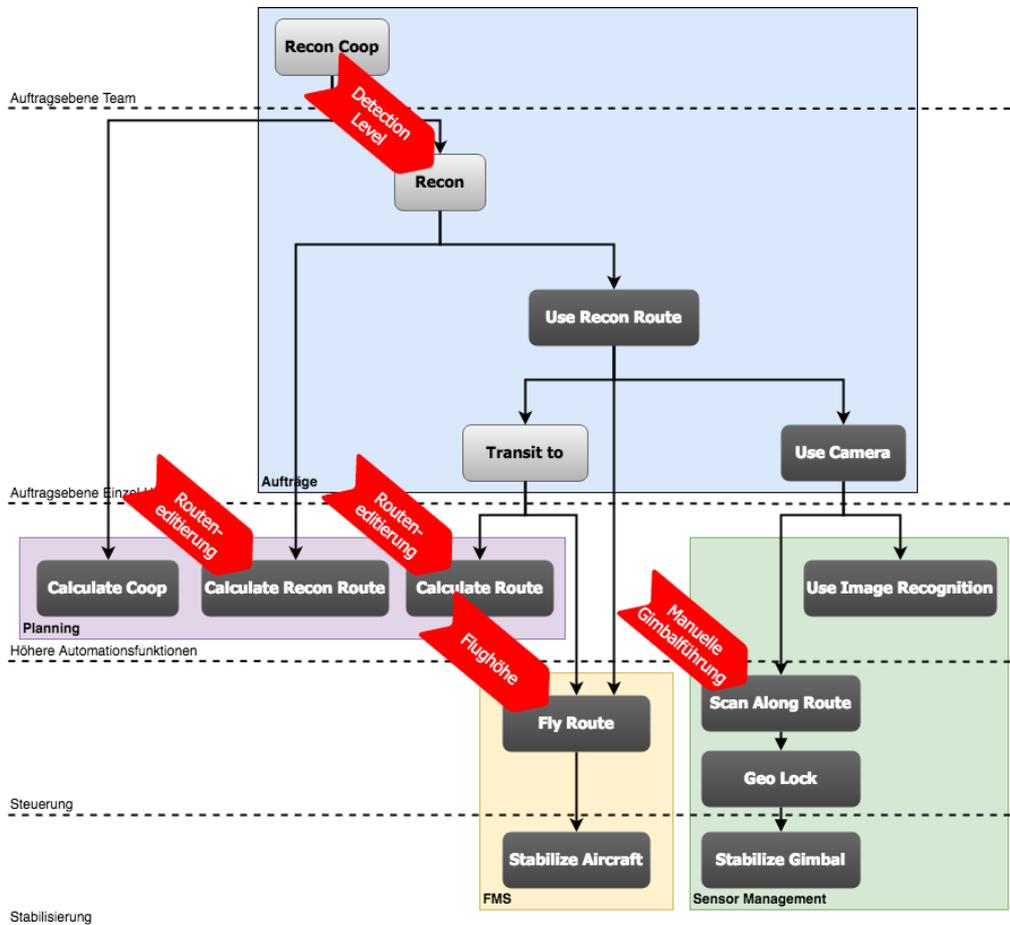


Abbildung 3-9: Funktionsbaum von UAV-Automationsfunktionen mit möglichen Eingriffen

Die höchsten Elemente stellen auftragsbasierte Führung auf Team- oder Einzelfluggeräteebene dar. Hier sind die Aufträge Transit und Recon (Aufklärung) zu sehen (hellgraue Kästen), andere Aufträge sind jedoch denkbar. Beide stehen auch untereinander in einem hierarchischen Verhältnis und basieren auf höheren Automationsfunktionen wie Routenplanung, Flugwegsteuerung und Sensormanagement. Diese wiederum nutzen niedriger automatisierte Funktionen wie Lageregelung und Kamerastabilisierung. Zur Demonstration des Konzepts sollen nun tiefere Eingriffe in die Automationsfunktionen ermöglicht werden. Um die verschiedenen Möglichkeiten jeweils exemplarisch und für den Bediener sinnvoll darzustellen, wurden die dargestellten Eingriffsmöglichkeiten gewählt (rote Pfeile).

Die Eingriffsarten befinden sich auf verschiedenen Ebenen der Automationshierarchie. Dies ermöglicht die Untersuchung der jeweiligen Auswirkungen. Die Anzahl der Eingriffsmöglichkeiten wurde im Hinblick auf Übersichtlichkeit, Trainingsdauer der Probanden und Implementierungsaufwand beschränkt. Tabelle 3-2 stellt die Eingriffe dar.

Tabelle 3-2: Eingriffsmöglichkeiten mit Zugriffsart

Automationsfunktion	Eingriffsmöglichkeit
Calculate Route	Veränderung von Transitrouten durch Editieren des Routenplanergebnisses
Calculate Recon Route	Veränderung von Aufklärungsrouten durch Editieren des Aufklärungsroutenplanergebnisses
Recon	Veränderung des DetectionLevel für Aufklärungsaufträge
Fly Route	Veränderung der Flughöhe für Aufträge
Scan Along Route	Manuelle Gimballführung

3.4.2 Beschreibung der möglichen Zugriffsarten

Die im vorherigen Abschnitt vorgestellten Zugriffsarten sollen im Detail beschrieben werden.

3.4.2.1 Veränderung Transitrouten

Die Veränderung der Transitrouten, also der Flugrouten, die der reinen Verlegung dienen, ist in den meisten zeitgenössischen unbemannten Luftfahrzeugsystemen umgesetzt. Sie bietet eine sehr detaillierte Kontrollmöglichkeit, da sie die Position einer Aufklärungsdrohne direkt steuert. Diese bekannte und intuitive Schnittstelle wird nun eingeschränkt, indem der Zugriff nur bei Vorhandensein eines zugehörigen Transitauftrags zugelassen wird. Dieser Transitauftrag kann auch eine Unteraufgabe eines beliebigen anderen Auftrags, beispielsweise eines Aufklärungsauftrags, sein. Durch diese Einschränkung wird sichergestellt, dass der Agent der manuellen Flugroute ein Ziel, nämlich die Verlegung zum Zielpunkt, zuordnen kann. Dies bietet ein Verständnis der Intention des Bedieners und eröffnet damit Handlungsspielräume, wie sie weiter oben beschrieben sind. Darunter fallen die Unterstützung bei Verletzungen von Rules of Engagement, Luftraumgrenzen und bei Verlust der Funkverbindung.

3.4.2.2 Veränderung DetectionLevel

Militärische Aufklärungsmissionen haben, neben dem Sammeln von Informationen, meistens das Ziel den Gegner über die gesammelten Informationen und die eigene Anwesenheit zu täuschen. Dies wird meist durch das Verhindern oder Erschweren der eigenen Aufklärbarkeit erreicht. Als Standard haben sich, laut Experteninterviews mit Bundeswehrpiloten der Drohne Heron, drei Stufen der Aufklärbarkeit (engl. Detection-Level) etabliert. Diese sind in Tabelle 3-3 dargestellt.

Tabelle 3-3: Definition Detection-Levels

Detection-Level	Beschreibung
Detection-Level 1 (DL1)	Eine Aufklärung durch das Ziel ist hinnehmbar
Detection-Level 2 (DL2)	Eine Aufklärung durch das Ziel ist zu vermeiden
Detection-Level 3 (DL3)	Eine Aufklärung durch das Ziel ist um jeden Preis zu vermeiden

Die Detection-Levels werden in der praktischen Anwendung für jedes Luftfahrzeug in Mindestabstand zum Ziel und in Annäherungsrichtung je nach Wind und Geräuschpegel des UAVs ausgedrückt.

3.4.2.3 Veränderung Aufklärungsrouten

Die Veränderung der Aufklärungsrouten, welche die Flugroute während einer Aufklärungstätigkeit bezeichnet, unterscheidet sich zur Transitroute durch zusätzliche

Rahmenbedingungen. Diese sind vor allem durch das oben beschriebene Detection-Level und die Einschränkungen des Sensorsystems, wie beispielsweise der Reichweite, gegeben. Ähnlich wie bei der Flugroute ist die Veränderung der Aufklärungsflugroute eine weit verbreitete Funktion. Durch die Beschränkung des Zugriffs auf Aufklärungsaufträge ist es dem Agenten möglich den Eingriff zuzuordnen und neben der gleichen Unterstützung wie für Transitrouten zusätzlich Hilfen zum Detection-Level und zum optimalen Sensoreinsatz zur Verfügung zu stellen.

3.4.2.4 Flughöhe

Die Veränderung der Flughöhe ist eigentlich Teil der Flugroute. Jedoch bietet die direkte Veränderung der Flughöhe in manchen Situationen einen Vorteil. Sie stellt einen Eingriff in eine tiefere Ebene des automatischen Routenflugs dar. Dieser wird hier als Parametermanipulation des FMS implementiert. Dadurch ist es möglich die Flughöhe für Aufträge und Unteraufträge gesondert festzulegen. Der Agent wird über diese zusätzliche Einschränkung der Flugplanung informiert und kann mögliche Konflikte erkennen und darüber informieren.

3.4.2.5 Manuelle Gimbalführung

Die Gimbalautomation umfasst das Ausrichten des Gimbals auf das Zielobjekt, das Abscannen der Zielgeometrie und die Anpassung der Kameraparameter, beispielsweise dem Zoomfaktor. In diese Automationsfunktion kann der Mensch durch Parametermanipulation oder substituierend eingreifen. Die Parametermanipulation umfasst lediglich das Einstellen des Zooms, während die Substitution zusätzlich die Vorgabe der Ausrichtung und das Abscannen umfasst.

3.5 Interaktionskonzept und Benutzerschnittstelle

In diesem Abschnitt soll die Interaktion zwischen Mensch und Agent beschrieben werden. Daraus lassen sich Anforderungen an den Agenten und die Benutzerschnittstelle ableiten.

3.5.1 Interaktionskonzept der Mensch-Maschine-Schnittstelle

Aus der Anordnung des Agenten auf der Werkzeugseite des Arbeitssystems ergibt sich, dass der Agent nicht proaktiv im Sinne der Mission handelt. Dies ist Systemen auf der Arbeiterseite vorbehalten. Durch diese Einschränkung ist zum einen eine leichtere Umsetzung möglich und zum anderen ein klares Delegiertenverhältnis vom Mensch zur Maschine festgelegt, was eine Vereinfachung in anderen Bereichen, wie beispielsweise der Akzeptanz, darstellt. Demnach soll der Agent nur handeln, wenn er vom Operateur dazu aufgefordert wird. Da bei dieser Untersuchung von variablen Automationsgraden die auftragsbasierte Führung als höchstmögliche Automation angenommen wird, ist dies gleichzusetzen mit der Erteilung eines Auftrags vom Menschen an den Agenten. Dies ergänzt die Vorgabe des Konzepts des geführten Zugriffs nach einem Auftrag als erste Interaktion zwischen Mensch und Maschine.

Nach der Erteilung eines Auftrags erstellt der Agent einen Plan und präsentiert diesen dem Operateur. Für Folgeaufträge wird der Plan entsprechend erweitert und eventuell optimiert. Tiefere Eingriffe des Menschen in die Automationshierarchie finden nur über den Plan statt. Auftretende Plangefährdungen durch Situationsänderungen oder Änderungen durch den Menschen werden gemeldet. Um diese Information bereitstellen zu können, ist eine permanente Planüberwachung durch den Agenten nötig. Für den Anwendungsfall von Aufklärungsdrohnen werden die in Tabelle 3-4 aufgeführten Auftragsarten angeboten.

Tabelle 3-4: Auftragsarten

Auftrag	Beschreibung
Recon	Aufklärung eines Gebiets, einer Route oder eines Punktziels
Transit	Verlegung des UAVs unter Einhaltung von Luftraumordnungsmaßnahmen
Detect LP	Suche und Bewertung von möglichen Landepunkten für den Helikopter

Diese umfassen die wichtigsten Aufgaben, die an Aufklärungsdrohnen im MUM-T Verband gestellt werden. Weiterführende Einsatzzwecke, wie beispielsweise das Verfolgen aufgeklärter Einheiten, sind im Rahmen dieser Arbeit nicht abgedeckt jedoch leicht ergänzbar.

3.5.2 Resultierende Benutzerschnittstelle

Wie weiter oben beschrieben, ist es notwendig die Benutzerschnittstelle für das Konzept des geführten Zugriffs neu zu entwerfen. Die Beschränkung auf den Anwendungsfall von Aufklärungsdrohnen erlaubt es konkretere Vorgaben zu machen. Eine Standardbenutzerschnittstelle in diesem Bereich benötigt mindestens eine Kartendarstellung für die Positionierung des UAVs und eine Möglichkeit Sensoregebnisse anzuzeigen und zu steuern. Werden diese Anforderungen mit der im Konzept geforderten Darstellung von Aufträgen und von Auftrags- bzw. Automationshierarchien verbunden, so bietet sich eine Darstellung des Plans in der Karte an. Diese erzeugt eine Vorstellung für die räumlichen Distanzen und erlaubt eine zeitliche Abschätzung der Auftragsdauer auf einen Blick. Zur Vermeidung des Überladens der Benutzeroberfläche wird eine skalierbare Darstellung nach (Rudnick & Schulte, 2016) gewählt, die je nach Informationsbedarf des Operateurs unterschiedliche viele Details anzeigt. Der Nutzer kann den Informationsbedarf durch die Größeneinstellung der Karte selbst von der reinen Anzeige der Aufträge über Unteraufträge bis hin zum tatsächlichen Flugweg der UAVs festlegen. Eingriffe in tiefere Ebenen der Automationshierarchie erfolgen ebenfalls über die Karte. Dabei wird die Zuordnung von Automationsfunktionen zu Elementen des Plans und deren Ähnlichkeit im hierarchischen Aufbau genutzt. So stellen beispielsweise Aufträge die höheren und Flugrouten oder Sensorelemente die tieferen Ebenen dar. Ein Zugriff auf ein Planelement wird auf einen Eingriff in die entsprechende Automationsfunktion umgesetzt. Die Umsetzungsdetails werden im nächsten Kapitel vorgestellt.

3.6 Annahmen zum Anwendungsfall

In diesem Abschnitt sollen einige für den Rest der Arbeit geltende Annahmen getroffen werden, welche die Komplexität in den Anwendungsfällen stark reduzieren. Dadurch werden das Systemdesign und die erforderlichen Nachweisexperimente vereinfacht.

3.6.1 Umwelt

Zunächst einmal soll die Umwelt betrachtet werden, in der sich das Arbeitssystem befindet. Dabei ist vor allem der Einfluss auf das Design der kognitiven Agenten interessant. (Russell & Norvig, 1996) liefert ein Klassifizierungsschema, das die wesentlichen Umwelteigenschaften für Agenten beschreibt. Tabelle 3-5 zeigt die möglichen Eigenschaften der Umwelt, welche die Implementierung eines Agenten erleichtern oder erschweren.

Tabelle 3-5: Umwelteigenschaften

Einfache Umsetzung	Komplexe Umsetzung	Bedeutung
Zugänglich	Unzugänglich	Sind alle Umweltzustände durch Sensoren zu erfassen?
Deterministisch	Nicht deterministisch	Können die Folgen einer Handlung vorausgesehen werden?
Episodisch	Nicht episodisch	Haben Handlungen Einfluss auf alle nachfolgenden Situationen oder ist die Reichweite begrenzt?
Statisch	Dynamisch	Ändert sich der Umweltzustand während der Agent eine Planung durchführt?
Diskret	Kontinuierlich	Ist der Umweltzustand in diskreten Werten darstellbar?

Die jeweils für diesen Anwendungsfall zutreffende ist hervorgehoben. Da es sich beim Einsatzort des Agenten um die reale Welt handelt, sind zunächst einmal alle Eigenschaften als komplex anzusehen. Demnach erschweren alle Eigenschaften eine Implementierung bis hin zur Unmöglichkeit. Jedoch kann die Komplexität reduziert werden, indem die folgenden Annahmen getroffen werden. Mit wenigen Ausnahmen kann der Agent durch seine Sensorik die für ihn wesentlichen Zustände der Umwelt erfassen. Deshalb kann diese als zugänglich angesehen werden. Des Weiteren ist die Umwelt zwar nicht deterministisch, jedoch kann zumindest ein Planungs determinismus angenommen werden. Das heißt, dass geplante Aktionen in der großen Mehrheit der Fälle auch erfolgreich sind. Die Umwelt kann für den Agenten als episodisch angenommen werden, wenn die Aufträge untereinander unabhängig sind, oder nur geringe Abhängigkeiten aufweisen. Solange sich Änderungen langsam im Vergleich zur Fortbewegungsgeschwindigkeit und zur Planungsdauer vollziehen, kann das Szenario als statisch während der Planung angenommen werden. Führt die Diskretisierung der Umwelt durch Eingangsfilter zu einem hinreichenden Abbild, kann diese als diskret angesehen werden. Durch diese Annahmen wird die Implementierbarkeit eines Agenten mit den geforderten Zielen für den Anwendungsfall wieder möglich.

3.6.2 Technische Defekte

Das Auftreten technischer Defekte am Hubschrauber und den UAVs soll ausgeschlossen werden. Beide Störfälle stellen natürlich eine wesentliche Beeinflussung des Mensch-Maschine-Systems dar. Deren Berücksichtigung würde die getrennte Untersuchung der Detailaspekte noch stärker erschweren, als es durch das komplexe Umfeld und den vorgegebenen Anwendungsfall schon der Fall ist. Außerdem kann deren relative Seltenheit und damit niedrige Relevanz für den Standardanwendungsfall geltend gemacht werden.

3.6.3 Funkverbindung

Die Funkverbindung stellt bei variablen Automationsgraden einen neuralgischen Punkt dar und erreicht bei einer realistischen Darstellung mehrerer Funkteilnehmer eine hohe Komplexität. Zur Vereinfachung sollen zwei Annahmen getroffen werden. Zum einen soll der zuverlässige Funkkontakt zwischen allen Teilnehmern gelten. Das heißt, dass die Verbindung von den UAVs zum Hubschrauber und die Verbindung der UAVs untereinander zwar nicht permanent vorhanden sein muss, jedoch Übertragungen unverfälscht ihr Ziel in zu vernachlässigender Zeit erreichen. Dies ist durch moderne Funktechnik bereits gegeben. Zum anderen sollen Unterbrechungen der Verbindung relativ zur Gesamtmissionszeit nur kurz bestehen. Dadurch

soll es dem Operateur möglich sein zumindest in Abständen ein vollständige Statusinformationen zu erhalten und dem Agenten auf den UAVs Anweisungen mitzuteilen. Auch der gezielte Einsatz von Störern durch feindliche Kräfte und Funkunterbrechungen aus Gründen der Tarnung sollen in dieser Arbeit nicht behandelt werden. Natürlich ist eine Behandlung von längeren Funkausfällen und technischen Defekten für die weiterführende Untersuchung der Inhalte dieser Arbeit notwendig.

4 Implementierung

Zur Umsetzung des Konzepts dienen vor allem zwei Systembestandteile, der kognitive Agent und die Benutzerschnittstelle. Deren Implementierung soll im Folgenden beschrieben werden.

4.1 Umsetzung des Kognitiven Agenten

Die Umsetzung des kognitiven Agenten bildet den Kern dieser Arbeit. Hierzu werden in diesem Kapitel Anforderungen definiert, um anschließend eine Auswahl für ein geeignetes kognitives Framework treffen zu können. Im weiteren Verlauf wird die eigentliche Umsetzung des Agenten mithilfe des Drools-Frameworks vorgestellt.

4.1.1 Anforderungen

Neben der zentralen Anforderung kognitive Automation umzusetzen bestehen weitere technische Anforderungen. Diese sollen im Folgenden dargestellt werden.

4.1.1.1 Kognitive Automation als zentrale Anforderung

Der zentrale Bestandteil des Konzepts ist der Umgang mit niedrig- bis hochautomatisierten Funktionen. Diese müssen im Agenten repräsentiert sein. Als niedrigste Automationsfunktionen sollen Regelschleifen wie beispielsweise Stabilisierung des Fluggeräts oder der Sensorik vorhanden sein. Zu den hochautomatisierten Funktionen zählen Situationsanalyse und Planungsfähigkeit, welche zur Umsetzung von auftragsbasierter Führung notwendig sind. Diese höheren kognitiven Fähigkeiten werden nach (Onken&Schulte 2010) auch als kognitive Automation, bzw. der resultierende Agent als kognitiver Agent bezeichnet.

4.1.1.2 Technische Anforderungen

Neben den konzeptrelevanten Eigenschaften existieren auch Anforderungen an die technische Umsetzbarkeit. Diese sind:

Performanz: Da in einem späteren Experimentalaufbau der Agent auf einem UAV betrieben werden soll, muss die gewählte Architektur performant genug sein, um auf Hardware mit eingeschränkter Leistungsfähigkeit auch komplexere Situationen schnell genug zu berechnen.

Einfache Implementierung und Änderbarkeit: Der Großteil der Implementierungsleistung sollte idealerweise in die Umsetzung und Überprüfung des Konzepts fließen, weshalb bei der Auswahl einer Architektur Flexibilität und einfache Implementierbarkeit von Verhalten zu berücksichtigen sind. Dabei sind auch die Existenz und Nutzbarkeit von Werkzeugen für die Arbeit mit dem System zu beachten.

Interoperabilität mit Experimentalsystem: Diese Arbeit ist Teil eines Gesamtexperimentalsystems. Dadurch muss sich der Agent einfach in das System einfügen lassen können. Dies setzt vor allem eine Anbindbarkeit an die verwendete Interprozesskommunikation voraus.

Verfügbarkeit: In der Literatur existieren viele Arbeiten über Architekturen für Agenten. Jedoch ist oft die zugrundeliegende Software nicht öffentlich verfügbar und damit von dritten nicht verwendbar.

4.1.2 Sichtung vorhandener Architekturen

Es existiert eine Reihe von Architekturen für Agenten, welche diese Eigenschaften bereits teils oder vollständig enthalten. Im Folgenden werden mögliche Kandidaten vorgestellt.

4.1.2.1 Adaptive Control of thought-rational (ACT-R)

ACT-R ist eines der ersten Frameworks, das den menschlichen kognitiven Prozess von der Sinneswahrnehmung bis zur motorischen Antwort modelliert (Anderson 1998). Es wurde stetig erweitert um beispielsweise höhere kognitive Fähigkeiten zu integrieren (Anderson 2004). Die Software basiert auf der funktionalen Programmiersprache Lisp und ist frei verfügbar. Es handelt sich um ein Produktionensystem mit verschiedenen Modulen, welche von menschlichen Denkprozessen abgeleitet sind. Entscheidungen werden basierend auf vorgegebenen Zielen und zur Verfügung stehenden Optionen gefällt. Aufgrund der zugrundeliegenden Theorie basieren viele wissenschaftliche Veröffentlichung zu kognitiven Agenten auf ACT-R.

4.1.2.2 Soar-Framework

Das Soar-Framework ist ein Produktionensystem, welches mithilfe von Regeln und Zuständen Entscheidungen herbeiführt (Laird 2018). Die Regeln werden in einer eigenen Programmiersprache verfasst. Die Anwendung der Regeln können auf bestimmte Zustände beschränkt werden, wodurch die Ausführungsgeschwindigkeit steigt. Durch seine methodische Umsetzung des menschlichen kognitiven Modells ist SOAR im akademischen Bereich als kognitive Architektur sehr verbreitet und bildet die Grundlage für viele weitere Architekturen. Es bietet die außerdem die Möglichkeit des Lernens durch das Speichern von einmal gefundenen Lösungen für Konfliktzustände.

4.1.2.3 Cognitive System Architecture (COSA)

Die Cognitive System Architecture (COSA) von (Putzer & Onken, 2001) stellt eine Modellierung des kognitiven Prozesses unter Nutzung des regelbasierten Systems SOAR dar. Durch Erweiterung des SOAR Frameworks um objektorientierte Programmierung und die Modellierung von Wissen in der Cognitive Programming Language (CPL) wurde so eine handhabbare Architektur für die Entwicklung von kognitiven Systemen geschaffen. Der kognitive Prozess stellt die Problemlösungs- und Planungsfertigkeit des Menschen nach, indem nach einer Interpretation der Umwelt Ziele bestimmt werden, die mithilfe von Planung und Planumsetzung zu einer erwünschten Veränderung der Umwelt führen. Die Analyse- und Planungsfähigkeit wurde in SOAR-Regeln umgesetzt, welche auf Situationswissen (Fakten) in einem Arbeitsspeicher zugreifen und diese verändern können. Die Faktenstruktur wird objektorientiert modelliert und zusammen mit den Regeln dem System als a-priori-Wissen zur Verfügung gestellt. Es existieren noch weitere Anwendungsfälle. Darunter fallen kognitive Agenten für die Durchführung einer SEAD-/Attack-Mission mit Hilfe des COSA Frameworks in (Meitinger, 2008) mit Schwerpunkt auf der Kooperation zwischen den Agenten. Außerdem ist die Anwendung von COSA bei der Umsetzung eines wissensbasiert Luftfahrzeugkonfiguration (engl. Knowledge Configured Vehicle, KCV) nach (Kriegel, 2012) zu erwähnen.

4.1.2.4 Cognitive System Architecture with Centralized Knowledge Representation (COSA2)

COSA2 ist eine Weiterentwicklung von COSA. (Brüggenwirth, 2014) erweiterte das Konzept des kognitiven Prozesses um spezifische Planungsalgorithmen. Dabei orientierte er sich am Rasmussen-Schema des menschlichen Denkprozesses. Zur Umsetzung war es notwendig, dass die verschiedenen Algorithmen für beispielsweise Identifizierung, Planung und Ausführung auf die gleiche Wissensbasis zurückgreifen können. Als Lösung wurde hier eine zentrale Ontologie, die Regeln, Fakten und Handlungsmöglichkeiten beinhaltet und modellierte diese in CPL.

4.1.2.5 Intelligent Multi-UxV Planner with Adaptive Collaborative/Control Technologies (IMPACT)

Der Playbook-Ansatz nach (Miller et al., 2004) kombiniert eine Planungskomponente, eine Ausführungskomponente und eine gemeinsame Sprachdefinition zwischen Benutzer und System, die sogenannten Plays. Diese sind ähnlich zu Spielzügen wie sie in Sportarten, beispielsweise dem amerikanischen Football, vorkommen. Der Teamführer und die Mannschaft trainieren die Handlungsweisen jedes einzelnen bei einem entsprechenden Play. Wird der Spielzug dann im Spiel durch den Teamführer angesagt, wissen alle Beteiligten um ihre Rolle und welches Verhalten sie von den Mitspielern erwarten können. Dies ermöglicht die Kodierung von komplexem Verhalten in wenigen Worten und damit ein gemeinsames Verständnis für alle Beteiligten. Dieser Ansatz wurde von (Miller et al., 2004) auf die Führung von mehreren UAVs angewendet. Der Bediener als Teamführer kommandiert einen Spielzug und kann dadurch schnell komplexes aber gleichzeitig vorhersehbares Verhalten bei den UAVs erzeugen. Im Unterschied zu den bisher vorgestellten zielebasierten Architekturen finden die Handlungen der UAVs nach einem Ablaufskript statt und können sich entsprechend nicht gut an neue Situationen anpassen. Es obliegt dem Bediener in solchen Situationen die Plays so abzurufen, dass das erwünschte Ergebnis eintritt. Dazu ist es möglich die unterschiedlichen Stufen der Automatisierung von Plays zu nutzen und beispielsweise einige UAVs detaillierter zu führen. Das System IMPACT (Intelligent Multi-UxV Planner with Adaptive Collaborative/Control Technologies, (Behymer et al., 2017)) implementiert das Playbook Konzept, um einem Operateur die Führung von bis zu 15 unbemannten Fahrzeugen zu ermöglichen. Diese bestehen aus je 5 Luft-, Boden- und Wasserfahrzeugen und werden zur Sicherung einer Militärbasis eingesetzt. Diese hohe Anzahl an zu kontrollierenden Elementen birgt einige Herausforderungen. Dazu verwendet IMPACT ein integriertes System aus hohem Automationsgrad für die unbemannten Fahrzeuge, eine geeignete Benutzeroberfläche und ein Assistenzsystem zur Unterstützung bei Aufgaben wie Patrouille im Gebiet oder entlang von Strecken, Verfolgung von sich bewegenden Objekten und das Überwachen von Positionen.

4.1.2.6 Drools-Framework

Das Drools-Framework der Firma JBoss⁵ umfasst eine Verarbeitungseinheit und Werkzeuge für Regeln und bietet damit die Funktionalität eines Produktionensystems (engl. Rule Engine) auf industriellem Standard. Es handelt sich dabei um Open-Source-Software mit einer großen Unterstützergruppe aus dem professionellen Bereich. Wie alle Produktionensysteme benötigt es Fakten und Regeln für deren Verarbeitung. Beides zusammen bilden das Wissen im Langzeitspeicher. Die Verarbeitung erfolgt mithilfe eines Rete-Algorithmus (Forgy, 1982) innerhalb eines Arbeitsspeichers in dem auch die Ergebnisse abgelegt werden. Dieser Algorithmus erreicht eine hohe Verarbeitungsgeschwindigkeit durch die effiziente Kombination und parallele Prüfung mehrerer Regeln. Die Fakten liegen in Form von Java-Klassen vor, wodurch Vererbung und damit eine vereinfachte Struktur ermöglicht wird. Die Regeln bestehen aus einer, so genannten, linken Seite (engl. left hand side, LHS), den Bedingungen für das feuern der Regel und einer, so genannten, rechten Seite (engl. right hand side, RHS), den Effekten der Regel. Die LHS wird in einer eigenen Programmiersprache verfasst, während die RHS beliebigen Javacode ausführen kann.

⁵ JBoss Inc. (2017). Drools Business Rules Management System. <http://www.drools.org>

```

rule "Detect UAV low on fuel"
  when
    $uav : UAV( self == true , $fuel : fuel, fuel < 20)
  then
    System.out.println("Running low on fuel for "+ $uav.getName());
    System.out.println("Only " + $fuel + "% remaining!");
  end

```

Code 1: Beispiel Drools Syntax

In Code 1 ist ein Beispiel für den Drools Syntax dargestellt. Jede Regel beginnt mit dem Schlüsselwort “rule” und einem daran angeschlossenen eindeutigen Namen. Als nächstes folgt die LHS, die mit dem Wort “when” eingeleitet wird. Darin werden die Bedingungen für das Ausführen der RHS definiert, die mit dem Wort “then” beginnt. Die Regel wird durch ein “end” abgeschlossen.

In der LHS wird in diesem Beispiel nach einem Objekt vom Typ UAV im WorkingMemory gesucht. Außerdem muss es ein Attribut self und ein Attribut fuel haben. Ersteres muss den Wert wahr annehmen und letzteres weniger als 20 betragen. Treffen diese Bedingungen zu, wird diesem Objekt für die Ausführungsdauer der Regel der Name \$uav und dem Attribut fuel der Name \$fuel zugewiesen. Außerdem wird die RHS ausgeführt. Hier wird der Javacode ausgeführt, der in diesem Fall aus der Ausgabe von zwei Zeilen Text besteht. Benannte Objekte können wie Variablen verwendet werden. So wird beispielsweise auf das Attribut name des Objekts \$uav zugegriffen, während \$fuel direkt verwendet wird.

Es ist anzumerken, dass diese Regel für jedes Objekt im WorkingMemory, das alle Bedingungen erfüllt, je einmal ausgeführt wird. Dadurch lassen sich sehr mächtige Funktionen für die parallele Verarbeitung erstellen.

4.1.2.7 Auswahl des Frameworks

Die Eigenschaften der vorgestellten Frameworks sind Tabelle 4-1 dargestellt.

Tabelle 4-1: Vergleich der vorgestellten kognitiven Architekturen

Framework	Situationsanalyse	Planungsfähigkeit	Performanz	Aufwand	Interop.	Verfügbarkeit
SOAR	+	0	+	-	+	+
COSA	+	+	-	-	-	+
COSA2	+	+	-	-	+	+
ACT-R	+	+	+	-	-	0
IMPACT	+	+	+	-	?	-
Drools	+	0	+	+	+	+

Daraus ergibt sich, dass das Drools-Framework die meisten Anforderungen erfüllt. Es besitzt jedoch keine eingebaute Planungsfähigkeit. Diese kann jedoch durch mithilfe von Regeln implementiert werden.

Zum zweiten Kandidaten, SOAR, hebt sich Drools durch die Verwendung der weit verbreiteten Programmiersprache Java und die damit verfügbaren Entwicklungswerkzeuge auch innerhalb des Regelsystems ab. Außerdem wird das Drools-Framework in realen Anwendungen im produktiven Einsatz betrieben und durch eine aktive Entwicklergemeinschaft laufend verbessert.

4.1.3 Implementierung des kognitiven Agenten mit dem Drools-Framework

Bei der Implementierung eines kognitiven Agenten müssen die beiden Funktionen Situationsanalyse und Planungsfähigkeit umgesetzt werden. Erstere benötigt die Modellierung des Problemfelds durch Fakten und Bewertungsregeln, was in Drools nativ unterstützt wird. Letztere wurde mithilfe eines Hierarchical Task Network (HTN) Planers basierend auf Fakten und Regeln innerhalb des Drools-Frameworks umgesetzt.

4.1.3.1 Architektur

Als Struktur für die Modellierung und auch für ein besseres Verständnis des kognitiven Agenten soll ein BDI-Agenten (Beliefs-Desires-Intentions) dienen. Dieser verfügt über ein Weltmodell (Beliefs), welches den aktuellen Zustand darstellt. Vordefinierte Ziele (Desires) geben einen Anstoß zur Handlung, wenn bestimmte Bedingungen im Weltmodell erfüllt sind. Pläne (Intentions) sind Handlungsketten und dienen der Erfüllung der Ziele. Alle in der Sichtung vorgestellten kognitiven Architekturen folgen dieser Einteilung, einige weichen jedoch vom Namensschema ab.

Innerhalb des Drools-Frameworks soll das Weltmodell in Form einer Klassenstruktur abgebildet werden. Dies ermöglicht Vererbung und Wiederverwendung. Die Ziele sollen implizit über Kosten im Planungsprozess und Analyseprozess dargestellt werden. Pläne sollen mithilfe einer Planungskomponente aus der aktuellen Situation erstellt und anschließend ausgeführt werden. Die Planausführung soll überwacht werden und der Plan bei sich ändernden Umweltbedingungen aktualisiert werden.

Auf Basis der modellierten Elemente kann ein Entscheidungsprozess agieren und intelligentes Verhalten erzeugen. Hierfür wurde der Observe-Orient-Decide-Act Ansatz (OODA-Loop) nach Boyd (Richards, 2011) ausgewählt. Hierbei handelt es sich ursprünglich um eine Schematisierung der Entscheidungsfindung im Luftkampf. Er kann jedoch auch für allgemeine Entscheidungsprozesse herangezogen werden. In der Beobachtungsphase (Observe) werden Informationen über die Umwelt gesammelt. Die Orientierungsphase (Orient) dient der Ableitung von Handlungsempfehlungen aus dem erstellten Lagebild. In der Entscheidungsphase (Decide) werden die Handlungsalternativen verglichen und die beste ausgewählt. Diese wird anschließend in der Handlungsphase (Act) ausgeführt. Der gesamte Prozess muss nicht von vorne bis hinten durchlaufen werden. Es können auch Schleifen zwischen Handlungsphase und Orientierungsphase bzw. Entscheidungsphase durchlaufen werden was zu einer hohen Flexibilität und Reaktionsgeschwindigkeit führt.

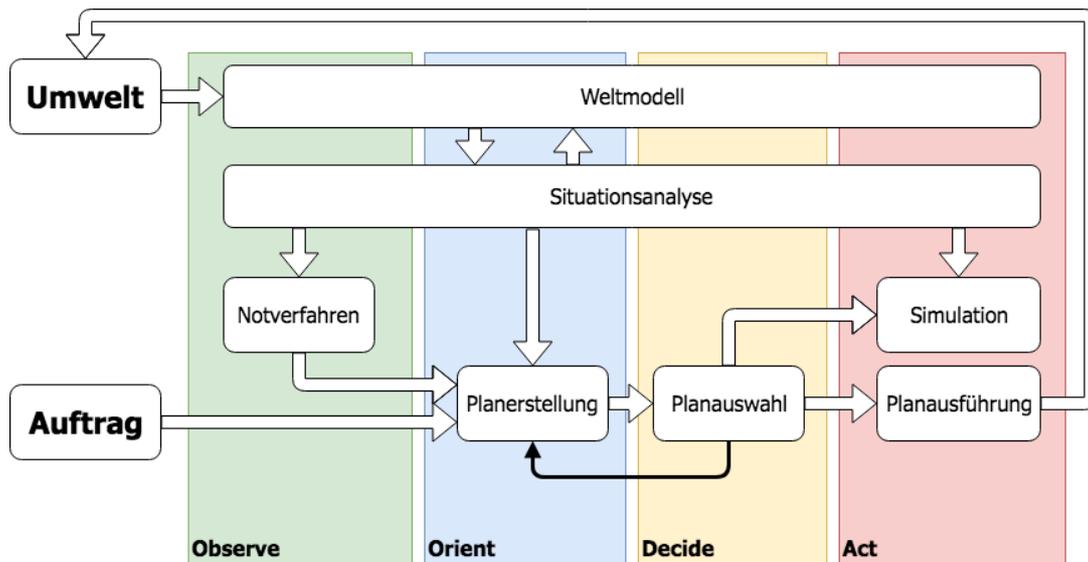


Abbildung 4-1: Architektur des kognitiven Agenten

Abbildung 4-1 zeigt die Gesamtarchitektur, welche nach dem OODA-Loop strukturiert ist. Die Grundlage jeden Handelns des Agenten ist ein Auftrag. Demnach handelt der Agent nicht ohne Aktion des Bedieners. Diese Designentscheidung wurde bewusst gewählt und wird weiter unten diskutiert. Es sind jedoch auch permanent existierende Aufträge, wie z.B. ein Auftrag zum Selbstschutz, möglich. Sogenannte Notverfahren bilden dies ab und werden nur eingeleitet, wenn kein Auftrag existiert. Bei vorhandenem Auftrag wird beispielsweise die Gefährdung des UAV als Hindernis in der Auftragsumsetzung behandelt und mit Warnungen an den Nutzer kommuniziert, wie es im entsprechenden Absatz beschrieben ist.

Das Weltmodell des Agenten wird durch die angeschlossenen Module, wie beispielsweise Sensoren, aus der Umwelt laufend aktualisiert. Eine Funktionalität zur Situationsanalyse ermittelt daraus die relevanten Informationen für den Agenten und erstellt mithilfe von Inferenz neues Wissen aus den gegebenen Fakten. Diese werden wieder im Weltmodell abgelegt. Im Gegensatz zur reinen Modellierung der Umwelt ist damit zusätzlich abstraktes Wissen, wie beispielsweise ein Gefährdungsstatus des UAVs, verfügbar. Das Weltmodell kann von allen Teilmodulen des Agenten ausgelesen werden.

Um den Auftrag in der aktuellen Situation ausführen zu können werden Pläne erstellt und durch die Situationsanalyse bewertet. Der Plan mit den niedrigsten Kosten wird für die Ausführung ausgewählt. Durch Kosten als Auswahlkriterium ist es möglich verschiedene Ziele gleichzeitig zu berücksichtigen und unterschiedlich zu gewichten.

Während der Planausführung wird durch eine Voraussimulation unter Berücksichtigung aller Umweltveränderungen die Gültigkeit des aktuellen Plans überwacht. Die Voraussimulation bedient sich der gleichen Situationsanalysekomponente wie die Planung selbst und ermöglicht so eine konsistente Bewertung.

Der hier vorgestellte Agent besitzt, neben der wissensbasierten Ebene, welche durch die Fähigkeit zur Planung abgebildet ist, auch die Möglichkeit regelbasiert zu handeln. Ein Beispiel ist der Einflug in bedrohtes Gebiet, durch den regelbasiert ein Rückzug auf eine sichere Position ausgelöst wird, ohne dass eine Deliberation auf kognitiver Ebene notwendig ist. Die unterste Ebene der Regelschleifen wird durch andere Automationsfunktionen, wie beispielsweise den Autopiloten übernommen. Die einzelnen Funktionalitäten und Phasen werden im Folgenden beschrieben.

4.1.3.2 Situationsanalyse

Die Stärke von Produktionssystemen, und damit auch Drools, ist die Inferenz von neuen Informationen aus vorhandenen. Deshalb eignet sich das Framework zur Situationsbeurteilung. Dafür ist eine Fakten- und Regeldefinition notwendig.

4.1.3.2.1 Definition der Fakten

Wie oben angesprochen bestehen Fakten in Drools aus Javaklassen und können Eigenschaften voneinander erben. Abbildung 4-2 zeigt die dem Agenten bekannten Klassen der Umwelt.

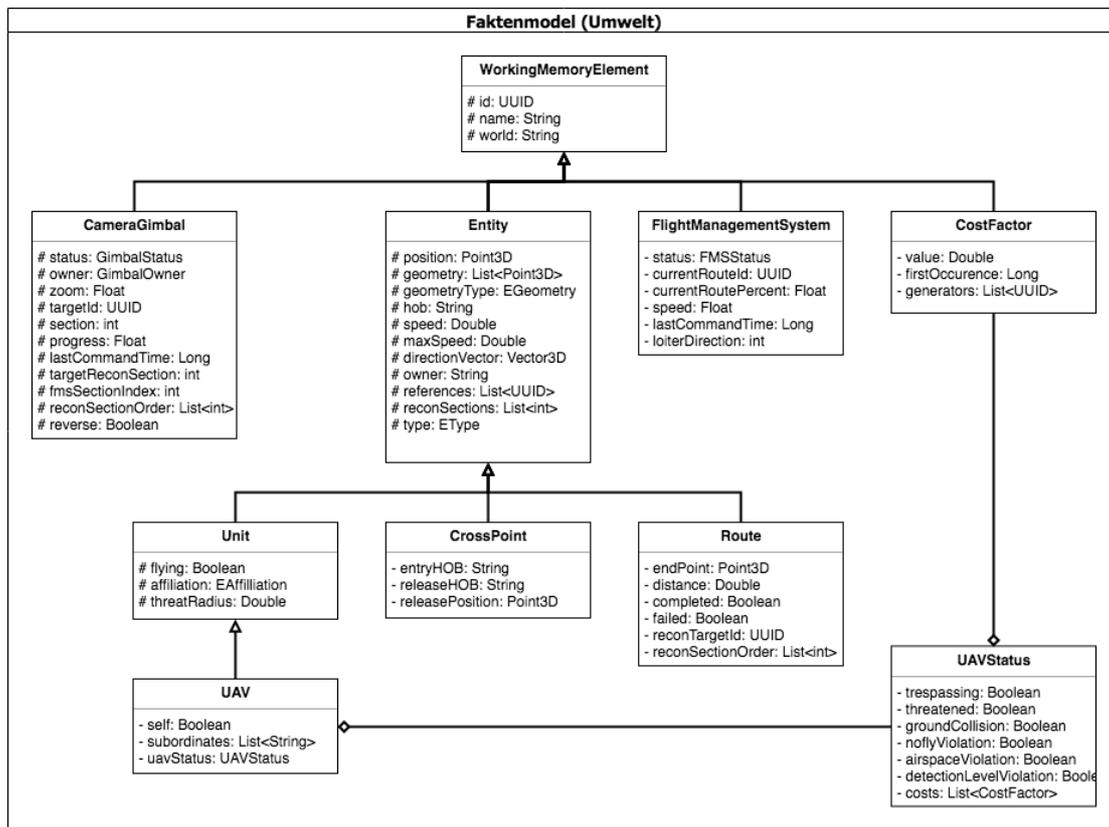


Abbildung 4-2: Modellierung der Umwelt

Grundlage ist die Klasse **WorkingMemoryElement**. Diese beinhaltet Namen und eindeutige Identifikationsnummer eines Objects in Form einer UUID. Zusätzlich ist die Planungswelt als eindeutiger String hinterlegt. Davon abgeleitet sind verschiedene Kindklassen, die sich in Welt darstellungsklassen und Planungsklassen unterscheiden lassen. Die Klasse **Entity** repräsentiert Objekte in der realen Welt und hat entsprechend die Eigenschaften Position, Typ und Geometrie. Außerdem enthält die Entity einige Verwaltungsvariablen, wie beispielsweise Referenzen auf andere Objekte. Die Klassen Plan, Task, Method, Alternative und Future dienen der Planung und werden im nächsten Kapitel behandelt.

Weitere von Entity abgeleitete Klassen sind **Unit**, welche Einheiten repräsentiert und **Route**, welche Flugrouten darstellt. Unit enthält dementsprechend die Zuordnung, also Freund, Feind, neutral oder unbekannt, und den Wirkradius.

Route enthält routentypische Informationen, wie Distanz und Status. Der Status stellt dar, ob das Abfliegen der Route bereits abgeschlossen oder fehlgeschlagen ist. Bei Aufklärungsflugrouten ist als weitere Information die Identifikationsnummer des Ziels hinterlegt.

CrossPoint stellt den Übergang zwischen zwei Fluggebieten dar. Deswegen sind Start- und Zielgebiet hinterlegt, sowie Anfangs- und Endpunkt des dazugehörigen Korridors.

UAV wird zur Repräsentation des eigenen und der anderen unbemannten Flugobjekte verwendet. Dementsprechend ist eine Variable zur Kennzeichnung des eigenen Fluggerätes hinterlegt. Außerdem ist der Status mit den Warnmeldungen und weiteren Verwaltungsvariablen gespeichert.

CameraGimbal enthält den vom Sensorsystem erhaltenen Zustand des Gimbals. Darin befinden sich unter anderem das aktuelle Ziel, die Bewegungsrichtung und der Fortschritt des Gimbals.

FlightManagementSystem bietet die Schnittstelle zum FMS und wird durch dieses mit den Informationen über die aktuelle Route, den Fortschritt, sowie die eingestellte Geschwindigkeit befüllt.

4.1.3.2.2 Definition der Analyseregeln

Die Stärken eines Produktionensystems ist die Situationsanalyse und -bewertung. Dieser Umstand wurde eingesetzt, um eine mehrdimensionale Bewertung jeder Situation für das UAV auf Kostenbasis zu ermöglichen. Wie weiter oben beschrieben, sind Kosten ein Ansatz für ein zielorientiertes System. Jedes Teilziel kann, entsprechend seiner Priorität, gewichtet werden und die Summe der Kosten stellt dann die Gesamtzielerfüllung dar. Die vollständige Bewertung eines Plans wird durch dessen simulierte Ausführung erreicht, wobei die Simulation schrittweise erfolgt. Nach jedem Zeitschritt wird der momentane Stand der simulierten Situation durch die Analyseregeln bewertet und die ermittelten Kosten zu den bisherigen addiert. Ist die Simulation abgeschlossen, können die Gesamtkosten für den Vergleich mit alternativen Plänen herangezogen werden. Code 2 zeigt ein Beispiel für eine Analyseregeln.

```
rule "Add threat costs"
  when
    $e : Unit(affiliation == Unit.EAffiliation.Foe)
    $u : UAV(self == true)
    $p : Plan(executing == true || world == "0.5" || world == "0")
  then
    // threat radius for airborne
    double radius = $e.getThreatRadius().get("AirAttack");

    // 3d distance
    if($e.getPosition().distance($u.getPosition()) < radius)
    {
      ArrayList generatorList = new ArrayList<UUID>();
      generatorList.add($e.getId());
      generatorList.add($p.getFmsSim().getCurrentRouteId());

      modify($p)
```

```

    {
        addCosts("Threat", 1.0, generatorList, $p.getExecutionTime())
    }
}
end

```

Code 2: Beispiel Analyseregel

Diese Regel fügt einem aktiven Plan aus der Simulation oder der realen Welt einen Kostengenerator vom Typ "Threat" hinzu, wenn sich das UAV innerhalb des Angriffsradius für Luftfahrzeuge einer feindlichen Einheit befindet. Dieser enthält den Kostenwert pro Zeitschritt (1.0), eine Liste der verantwortlichen Entitäten (hier die feindliche Einheit und die aktuelle Flugroute) und den Zeitpunkt des Auftretens. Diese Informationen können später verwendet werden, um mehr Details für eine Warnung an den Operateur zu liefern. Weitere Regeln zum Aufdecken von Fehlerzuständen verhalten sich ähnlich zur Regel für Bedrohungen. Ein Großteil der Analyseregeln ist sowohl für die Simulation während der Planung, als auch für die Bewertung der aktuellen Lage während der Planausführung nutzbar. Diese Wiederverwendbarkeit reduziert den Entwicklungsaufwand des Systems.

Tabelle 4-2 stellt die verschiedenen Fehlerzustände mit Beschreibung und Gewichtung dar. Der Kostenfaktor ist dabei als Vielfaches der Kosten definiert, die für die Fortbewegung um einen Meter entstehen. Dementsprechend wird beispielsweise der Aufenthalt im bedrohten Gebiet pro Zeiteinheit mit einem Umweg von 1km gleichgesetzt.

Tabelle 4-2: Fehlerzustände und Kostenfaktoren

Fehlerzustand	Beschreibung	Kostenfaktor
Trespass	Das UAV befindet sich auf dem Weg in eine Bedrohung	1.000
Threat	Das UAV befindet sich in einer Bedrohung	1.000
Airspace Violation	Das UAV verletzt Luftraumordnungsmaßnahmen	10.000
Detection Level Violation	Das UAV nähert sich einem Aufklärungsziel zu sehr an	600
Ground Collision	Das UAV kollidiert mit dem Boden	100.000
Recon Paused (Gimbal Needed)	Der Gimbal steht dem UAV nicht zur Verfügung	200
Gimbal Failure	Der Gimbal weist einen Defekt auf	200
Landing Point Failure	Die Funktion der Landezonenaufklärung ist beeinträchtigt	200

Der hohe Wert für die Verletzung von Luftraumordnungsmaßnahmen lässt sich dadurch begründen, dass diese meist nur einen Zeitschritt dauern, da Luftraumgrenzen meist keine Tiefe haben. Dementsprechend muss die Gewichtung höher sein, um eine Auswirkung auf die Planung zu erzielen.

4.1.3.3 Umsetzung der Planungsfähigkeit in Drools

Die Planungskomponente des Agenten wurde als HTN-Planer in Drools umgesetzt. HTN-Planer verwenden Vorschriften über die Aufteilung von Aufgaben in Unteraufgaben bei der Planung, sogenannte Methoden. Diese werden dem Planer a-priori zur Verfügung gestellt und

stellen den Hauptteil des einprogrammierten Wissens dar. Die Methoden werden beim Planungsprozess zu einem hierarchischen Netzwerk oder Baum kombiniert, dessen Blätter Elementaraufgaben sind also keine weitere Aufteilung in Unteraufgaben benötigen. Zusätzlich zum Aufgabenwissen steht dem Planer Wissen über die zu verändernden Zustände zur Verfügung. Elementaraufgaben beinhalten die Art und Weise, wie Zustände verändert werden. Beim Planungsvorgang wird die oberste Aufgabe, das Planungsproblem, mithilfe der zur Verfügung stehenden Methoden in Unteraufgaben zerlegt. Gibt es mehrere Alternativen, wird für jede ein eigener Zustandsraum (eine eigene Welt) erstellt. Anschließend werden die Unteraufgaben solange weiter zerlegt, bis nur noch Elementaraufgaben im Plan existieren. Bei der anschließenden Anwendung der Zustandsveränderungen jeder Elementaraufgabe in Reihenfolge des Plans, wird die Ausführung des Plans simuliert. Der entstehende Weltzustand wird dann auf Widersprüche und Kosten überprüft. Bei mehreren Zustandsräumen wird die kostengünstigste Lösung als Plan ausgewählt. Beim sogenannten Stutzen können Teillösungen bereits vor der Fertigstellung auf Widersprüche und Kosten überprüft werden und bei Überschreitung entfernt werden. Dadurch kann die Performanz des Algorithmus gesteigert werden.

4.1.3.3.1 Funktionsweise

Die konkrete Implementierung ist am SHOP2 Algorithmus von (Nau et al., 2003) orientiert, welcher das HTN Prinzip umsetzt. Für die HTN-Planungsfunktion wurden spezielle Klassen implementiert und im Drools WorkingMemory verfügbar gemacht. Abbildung 4-3 zeigt die Vererbungsstruktur der verwendeten Klassen.

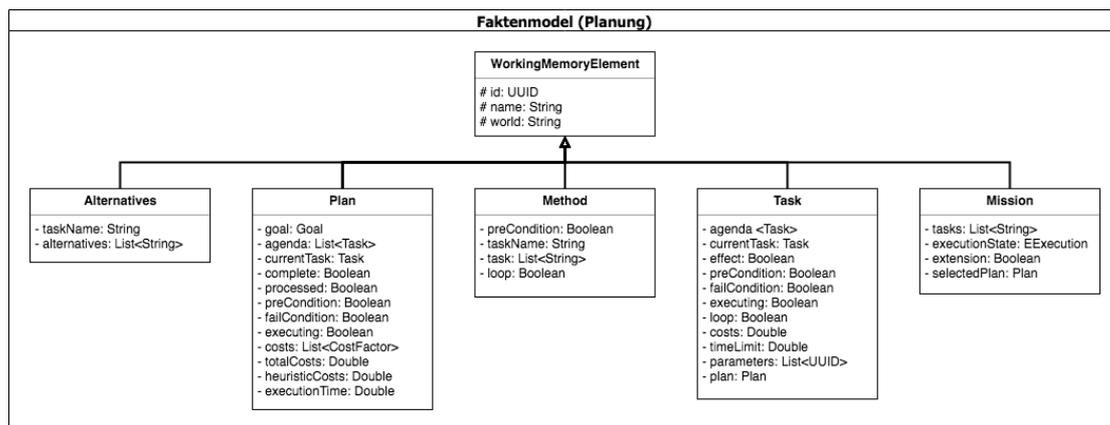


Abbildung 4-3: Modellierung der Planung

Alle haben die gemeinsame Elternklasse `WorkingMemoryElement`, die weiter oben beschrieben wurde. Das Herzstück der Umsetzung ist die Klasse `Plan`. Ein Plan enthält eine Liste von Tasks und Informationen zum momentanen Planungszustand sowie den gegenwärtig aktiven Task. Tasks haben einen festgelegten Typ (z.B. "Recon"), der die weitere Verarbeitung durch Regeln sicherstellt. Sie können weitere Subtasks enthalten. Außerdem enthalten sie eine Liste von Objekten, auf die sich der Task bezieht (z.B. "Fahrzeug A"). Die zur HTN-Planung nötigen Methoden und Alternativen sind auf zwei Arten umgesetzt. Einfache Methoden werden durch eine Klasse `Method` dargestellt. Diese enthält den Tasktyp auf den die Methode angewendet werden kann und die Typen der Tasks in der richtigen Reihenfolge, welche als Subtasks eingefügt werden sollen. Einfache Methoden werden zum Programmstart aus einmal feuern den Regeln befüllt, welche diese dann in Drools als Fakten einfügen.

```

rule "UseReconRouteMethod"
  when
    // always, once
  then
    Method useReconRouteMethod = new Method("UseReconRouteMethod");

    useReconRouteMethod.setTaskName("UseReconRoute");

    useReconRouteMethod.getTasks().add("PrepareGimbal");
    useReconRouteMethod.getTasks().add("TransitRouteStart");
    useReconRouteMethod.getTasks().add("FlyReconRoute");

    insert(useReconRouteMethod);
  end

```

Code 3: Verwendung von Aufklärungsrouten als einfache Methode

In Code 3 ist zu erkennen, dass durch das Weglassen der Bedingungen der LHS die Regel ein einziges Mal ausgeführt wird. Sie erzeugt ein Objekt vom Typ Method, das als Ziel einen Task vom Typ "UseReconRoute" hat und diesen um drei Unteraufgaben ergänzen kann. Zum Abschluss wird das Methodenobjekt mit "insert" in das WorkingMemory eingefügt und steht anschließend dem HTN-Algorithmus zur Verfügung. Für einfache Alternativen fungiert die Klasse Alternative auf ähnliche Weise, mit dem Unterschied, dass hier nicht Subtasks sondern alternative Tasks vorgehalten werden.

Komplexe Methoden und Alternativen werden über Regeln mit bestimmten Vorbedingungen und Aktionen definiert. Dies wird weiter unten genauer erklärt. Der Vorteil dieser Aufteilung ist, dass ein Großteil der notwendigen Methoden und Alternativen durch leicht verständliche Listen angelegt werden kann und gleichzeitig die Flexibilität besteht, Methoden und Alternativen mit jeglicher Art und Komplexität der Vorbedingungen anzulegen. Tabelle 4-3 fasst die Umsetzung noch einmal zusammen.

Tabelle 4-3: HTN Elemente

HTN Element	Umsetzung in Drools
Einfache Methode	Klasse Methode, mit statischem Inhalt
Komplexe Methode	Regel, die auf Plan/Task operiert
Einfache Alternative	Klasse Alternative, mit statischem Inhalt
Komplexe Alternative	Regel, die auf Plan/Task operiert

Vom Nutzer beauftragte Tasks werden in einem Planobjekt in Drools hinterlegt. Zu Beginn der Planung wird dieses mit den abzuarbeitenden Tasks und allen Fakten des Weltmodells in eine Planungswelt kopiert. In dieser fiktiven Welt kann der Plan nun durchgespielt werden und die simulierten Auswirkungen auf die Kopie des Weltmodells analysiert werden. Nun wird durch Regeln das Methodenobjekt, welches den jeweiligen Tasktyp als Ziel hat, angewendet, indem der Task um die in der Methode aufgezählten Subtasks erweitert wird. Dies geschieht durch das Anlegen von Taskobjekten als Fakten in Drools und die Eintragung als Subtask in die Liste

des übergeordneten Tasks. Bei einfachen Methoden mit existierendem Methodenobjekt wird dabei ebenfalls die Liste der Bezugsobjekte in die Subtasks kopiert. Bei komplexen Methoden können weitere Bezugsobjekte hinzugefügt oder bestimmten Subtasks zugewiesen werden. Code 4 zeigt die Umsetzung der komplexen Methode für die Aufklärung der Landepunkte.

```
rule "Method CheckLandingPoints"
  when
    $t : Task(name == "CheckLandingPoints", world != "0", $p : plan,
executing == true, agenda.size() == 0, $parameters : parameters)
    $landingsite : Entity(id == $parameters.get(0))
    $landingpoints : ArrayList(size > 0) from collect(Entity(landingsite
== $landingsite))
  then
    for(Object o : $landingpoints)
    {
      Entity e = (Entity) o;

      Task reconLP = new Task("Recon");
      reconLP.getParameters().add(e.getId());
      insert(reconLP);

      $t.getAgenda().add(reconLP);
    }

    update($t);
end
```

Code 4: Auswahl Einflugpunkte als komplexe Alternative

Hier werden für einen zurzeit aktiven Task (executing == true) vom Typ CheckLandingPoints der als Parameter 0 die ID einer LandingSite hat, alle Landepunkte gesammelt, welche auf diese LandingSite verweisen. Für jeden Landepunkt wird ein Aufklärungstask als Unteraufgabe zum Task CheckLandingPoints hinzugefügt.

Gleichzeitig zur Auswertung der Methoden findet die Auswertung der Alternativen statt. Existieren für Tasks oder Subtasks Alternativenobjekte, so wird der dazugehörige Plan und alle dazugehörigen Tasks für jede Taskalternative kopiert und in eine neue Planungswelt verschoben. Diese erhält außerdem eine Kopie des momentanen Weltmodells der ursprünglichen Planungswelt (Elternwelt), wodurch die Änderungen des bisher ausgeführten Plans am Weltmodell und somit dessen Fortschritt erhalten bleiben. Technisch geschieht dies durch die Änderung des "World"-Attributs von Plan, Tasks und Fakten nach folgendem Schema. An den bisherigen Wert wird ein Punkt (".") und der Index der Alternative angehängt. Die Darstellung der realen Welt in Drools trägt die Bezeichnung "0", die erste Planungswelt

“0.0” und mögliche Alternativen beispielsweise “0.0.0” und “0.0.1”. Durch dieses Schema kann die Welt innerhalb einer Baumstruktur eingeordnet werden. Existiert nun ein Plan mit einer neuen Welt, feuern Regeln, welche alle veränderlichen Objekte (z.B. Units, Routen, etc.) aus der Elternwelt in die neue Welt kopieren. Der durch das Alternativenobjekt behandelte ursprüngliche Plan wird nun als abgeschlossen gekennzeichnet indem das “Processed”-Flag gesetzt und der Task, für den die Alternativen zur Verfügung standen um den Zusatz “completed:” im Tasktyp ergänzt wird. Die neu entstandenen Pläne stehen nun zur Abarbeitung bereit und können die Kopien der veränderlichen Objekte in ihrer jeweiligen Welt manipulieren. Die Planung für ein Planobjekt ist abgeschlossen, sobald als Subtasks nur noch Elementartasks vorkommen, das heißt, dass diese nicht mehr durch eine Methode oder eine Alternative ersetzt werden können.

Die Anzahl der Planungswelten ist theoretisch nur durch die vorhandene Rechenleistung und den Speicher begrenzt. In der Praxis ergaben sich jedoch nie mehr als 64 parallele Planungswelten. Der Planungsvorgang kann eigentlich parallel und ohne Einhaltung der Taskreihenfolge abgearbeitet werden. Jedoch müssen alle entstehenden Pläne anschließend simuliert werden, um eine Bewertung vornehmen zu können. Um den Rechenaufwand gering zu halten werden die Anwendungen von Methoden und Alternativen sequentiell in der Reihenfolge der späteren Planarbeit ausgeführt. Zusätzlich wird nach jeder Änderung der bisher entstandene Plan simuliert und bewertet. Die Steuerung dieses Vorgangs erfolgt durch “Execute” Flags in Plänen und Tasks. Wird ein Plan zur weiteren Planung ausgewählt so wird das Execute Flag des Plans und des zugehörigen momentan aktiven Tasks gesetzt. Methoden und Alternativen werden nur auf Tasks mit gesetztem Execute Flag angewendet. Es können auch mehrere Pläne parallel verarbeitet werden. Durch diese Kontrollmöglichkeit kann der Planungsvorgang gezielt gesteuert werden, was aufgrund der mit den Handlungsalternativen exponentiell ansteigenden Anzahl der Planungswelten auch notwendig ist. Konkret wurde die Steuerung durch einen A*-Algorithmus durchgeführt, was weiter unten beschrieben ist.

4.1.3.3.2 Elementartasks

Elementartasks sind als Droolsregeln umgesetzt, welche als gemeinsame Vorbedingung die Existenz eines Taskobjekts des entsprechenden Typs mit aktivem Execute Flag im Working Memory haben. Um die Codelänge zu reduzieren und mehr Übersicht zu schaffen wurde ein Tasktemplate angelegt, was genau diese Vorbedingung beschreibt. Zusätzlich können flexibel, je nach Tasktyp verschiedene Vorbedingungen mit dem Drools Syntax festgelegt werden. Code 5 zeigt die Anwendung.

```
rule "ExecuteTemplate"  
  when  
    $templatetask : Task(preCondition == true, failCondition == false,  
effect == false, executing == true, $parameters : parameters)  
  then  
    // do nothing  
end  
  
rule "WaitRouteRequest Execute" extends "ExecuteTemplate"  
  when
```

```

$t : Task(name == "WaitRouteRequest", this == $templatetask)
$route : Route(id == $parameters.get(1))
then
  modify($t)
  {
    setEffect(true)
  }
end

```

Code 5: Template für aktiven Task und Nutzung des Templates

Die Nachbedingung der Regel stellt dann die Ausführung des Tasks dar. Dies kann beispielsweise eine Anfrage an den Routenplaner oder die Kommandierung des Autopiloten sein. Durch die Droolsengine wird bei der Planbearbeitung die Taskregel, welche den momentan aktiven Task beschreibt, zyklisch geprüft. Bei zutreffenden Vorbedingungen wird der zugehörige Javacode ausgeführt. Anschließend wird das Effect-Flag des Taskobjekts gesetzt, was weiteren Regeln signalisiert, dass der Plan zum nächsten Taskobjekt weiterschalten kann.

Bei der Implementierung der Tasks wurde ein System verwendet, das Fehler abfangen kann und die Kompatibilität mit der später erfolgenden Plansimulation sicherstellt. Tasks, welche eine Kommunikation mit einer äußeren Instanz beinhalten, werden als zwei Tasks abgebildet, welche wiederum in ein bis zwei Regeln abgelegt sind. Das Absetzen eines Kommandos oder einer Anfrage wird durch eine Initiierungsregel durchgeführt, das Warten auf die Statusänderung oder die Antwort durch eine Warteregel. Ersterer ist meist als einfache Regel, im Gegensatz zu komplexen Regeln, wie oben beschrieben, umgesetzt. Letzterer besteht aus einer Regel, welche als Vorbedingung die Bestätigung der Statusänderung oder die Existenz der Antwort hat und als Nachbedingung keine Aktion ausführt. Dieser Regeltyp dient nur dazu, die Planausführung an dieser Stelle solange zu pausieren, bis die Kommunikation abgeschlossen ist. Zusätzlich sind für Warteregeln weitere Regeln implementiert, welche Fehler aufdecken können. Dies kann beispielsweise das Überschreiten einer maximalen Wartezeit oder eine Statusänderungen in einen so nicht vorgesehenen Status sein. Diese Regeln sind eng mit dem jeweiligen Tasktyp verknüpft und setzen im Fehlerfall das Failure-Flag des zugehörigen Taskobjekts. Weitere Regeln markieren daraufhin den gesamten Plan als fehlerhaft. Für die spätere Simulation des Plans ist es wichtig, dass das Ausführen des Tasks nicht unbedingt eine reale Aktion nach sich zieht. Deswegen unterscheiden die meisten Taskregeln anhand des World-Attributs des Taskobjekts, ob eine simulierte oder eine reale Aktion ausgeführt wird. Dabei löst meist eine Initiierungsregel in der Simulation keine Aktion aus, in der realen Welt hingegen schon. Eine Warteregel löst keine Aktion in der realen Welt aus, setzt jedoch im Simulationsfall den gewünschten Zustand in der jeweiligen simulierten Welt direkt, beispielsweise die UAV-Position. An dieser Stelle kann ebenfalls eine Fehlerbehandlung erfolgen.

4.1.3.3 Planablauf und Plansimulation

Wie oben beschrieben, wird ein Plan nach jeder Änderung simuliert. Dies erfolgt automatisch, da das Execute-Flag des Plans und somit des momentan aktiven Tasks gesetzt sind. Weil sich Pläne in der Planungsphase in einer Simulationswelt, also nicht in der Welt "0" befinden, werden Elementartasks automatisch im Simulationsmodus ausgeführt und verändern demnach nur die Objekte im WorkingMemory, welche sich in der gleichen Welt befinden. Durch die

vorher beschriebene Situationsanalyse wird der Plan bewertet und mit unterschiedlichen Typen von Kosten beaufschlagt. Um den Analyseregeln die Möglichkeit zu geben auch auf kleine Veränderung früh reagieren zu können, werden bestimmte Elementartasks in kleinen Schritten simuliert. Dies sind vor allem Bewegungen des eigenen UAVs, der anderen UAVs und weiterer Einheiten. Die Simulation der Warteregel für das Abfliegen einer Route lässt beispielsweise das UAV in einstellbaren Simulationszeitschritten an der Route simuliert entlangfliegen. Dies ermöglicht es Annäherungsregeln oder Luftraumverletzungsregeln zu feuern und entsprechende Kosten auf den Plan aufzuschlagen. Auch das Fehlschlagen des Plans wird, wie oben beschrieben, erfasst. In diesem Fall wird der Plan und anschließend dessen Planungswelt aus dem WorkingMemory entfernt und in der weiteren Planung nicht berücksichtigt. Dies stellt das Stutzen (engl. Pruning) des HTN-Algorithmus dar.

4.1.3.3.4 A*-Algorithmus

Da sich die Komplexität des Planungsprozesses mit jeder existierenden Alternative stark erhöhen kann, ist ein Verfahren zur Steigerung der Planungseffizienz notwendig. Bei den Simulationswelten handelt es sich um die Knoten eines Graphen in Baumstruktur, dem Weltenbaum. Durch die oben beschriebene Steuerungsmöglichkeit kann festgelegt werden auf welchem Blattknoten die Planung voranschreiten soll. Es handelt sich also im Prinzip um eine Graphensuche, für die es mehrere Algorithmen gibt. Im vorliegenden Fall wurde der A*-Algorithmus als ein effizienter und einfach umzusetzender Suchalgorithmus für diese Anwendung ausgewählt. Für jede Welt werden bei der Simulation in jedem Schritt die einzelnen Kostentypen gewichtet und als Gesamtkosten im Plan eingetragen. Zusätzlich findet eine Schätzung anhand einer Heuristik für die noch benötigten Kosten zum Erreichen des Ziels statt. Anschließend werden N Welten mit der niedrigsten Summe dieser beiden Kosten zur Planung freigegeben und alle anderen Welten pausiert. Dies erlaubt die Parallelisierung der Planung und gleichzeitig die gezielte Planung auf das Ziel zu. Die Effizienz des A*-Algorithmus hängt maßgeblich von der Güte der Heuristik ab. Grundsätzlich darf die Heuristik die am Ende tatsächlich auftretenden Kosten nicht übersteigen, da ansonsten nicht optimale Lösungen gefunden werden. Dennoch sollten die geschätzten Kosten möglichst nahe am wahren Wert liegen, damit die Suche schneller entlang des richtigen Lösungsweges erfolgt. Um dies sicherzustellen wurde als Heuristik die minimale Strecke zwischen UAV und Zielpunkt gewählt, wobei die Pflicht zur Benutzung von Entry- und Exitpoints von Luftraumstrukturen berücksichtigt wurde. Diese Entfernung wird von einer unabhängigen Funktion durch einen Brute-Force-Ansatz ermittelt. Diese Heuristik unterschätzt die Kosten in jedem Fall, liegt jedoch nahe genug am wahren Wert, um die Suche in die richtige Richtung zu lenken. Durch den Einsatz des A*-Algorithmus konnte die Planungszeit wesentlich reduziert werden, da die vielversprechendsten Alternativen bevorzugt ausgewertet werden. Dennoch bleibt der Vorteil des parallelen Ausführens von Regeln in Drools erhalten, da N Planungswelten zur weiteren Auswertung freigegeben werden und damit gleichzeitig abgearbeitet werden können.

4.1.3.3.5 Weitere Funktionalitäten

Um parallele Aktionen in der Planausführung zu ermöglichen, wurde das Konzept der Futures implementiert. Dieser Begriff ist Programmiersprachen, wie beispielsweise C++ oder Java, entlehnt und bezeichnet das Starten einer Funktion mit dem Zweck die Ergebnisse in der Zukunft abzuholen. In der hier umgesetzten Variante können Handlungen im Plan vorgesehen werden, die erst zu einem späteren Zeitpunkt unter definierbaren Bedingungen ausgeführt werden. Dies erweitert die bisher linearen oder nur beschränkt parallelen Planmöglichkeiten um Nebenläufigkeit.

Ein Anwendungsbeispiel für ein Future ist die Funktion, den Gimbal vor Abschluss des Transits zum Ziel auf das Ziel auszurichten, sobald die Entfernung zum Ziel klein genug ist. Wird das

Future mit den entsprechenden Parametern vor dem Transitauftrag eingereicht, so kann die Aktion Ausrichten des Gimbals parallel zum Transit erfolgen, was sonst aufgrund der Linearität des Plans nicht oder nur mit Aufwand möglich. Code 6 stellt das Beispiel als Quelltext dar.

```

rule "PrepareGimbal Execute" extends "ExecuteTemplate"
  when
    $t : Task(name == "PrepareGimbal", this == $templatetask)
    $g : CameraGimbal()
    $parentTask : Task(agenda contains $t)
  then
    // Gimbal Preparation
    /.../
    // Future insertion
    Future future = new Future($t.getName(), $parentTask);
    insert(future);
  end

rule "PrepareGimbal Future"
  when
    $u : UAV(self == true, world == "0", $uavPosition : position)
    $t : Task(executing == true, $parameters : parameters, $targetId :
$parameters.get(0))
    $f : Future(name "PrepareGimbal", parentTask == $t)
    $e : Entity(id == $targetId, $entityPosition : position)
  then
    if($uavPosition.distance($entityPosition) < 2500)
    {
      // command gimbal scan
MainClass.getInstance().mCom.gimbalControl(CameraGimbal.GimbalStatus.SCAN,
10, $e.getId());
      // Future removal
      retract($f);
    }
  end

```

Code 6: Beispiel für die Nutzung eines Futures

4.1.3.3.6 Probleme des HTN-Planers

Trotz des Einsatzes eines A*-Suchalgorithmus kann die Komplexität der Planungswelten in diesem Anwendungsszenario exponentiell mit der Anzahl an existierenden Alternativen ansteigen. Dies stellte sich als die größte Schwäche des Planungsalgorithmus heraus und erforderte eine weitere Optimierung. Die normale Verhaltensweise des Agenten ist es, nach jeder Missionsänderung einen vollständig neuen Plan von Grund auf zu erstellen. Dies ist erforderlich, da in manchen Situationen lokale Minima existieren, die bei stückweiser Planung der Einzelelemente zu einer nicht optimalen Lösung führen.

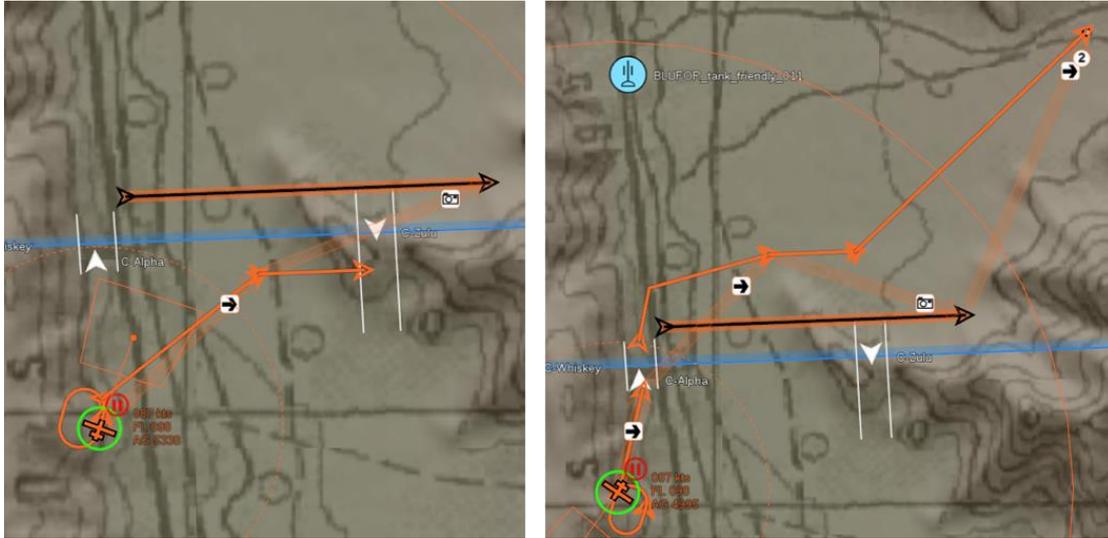


Abbildung 4-4: Beispiel Aufklärung einer Route innerhalb HOA die von außerhalb der HOA durchgeführt wird und anschließend Weiterflug in HOA

In Abbildung 4-4 ist ein Fall eines lokalen Minimums zu sehen. Wird ein Aufklärungsauftrag auf die Route gegeben, so besteht die optimale Lösung aus dem Parallelflug entlang der Route außerhalb des Einsatzgebietes. Folgt anschließend ein Auftrag zum Zielpunkt T innerhalb des Einsatzgebietes zu fliegen, was nur über Einflugpunkte erlaubt ist, so führt die alte Lösung des Aufklärungsauftrags zu einem Umweg. Hierbei wird die Notwendigkeit deutlich beim Hinzufügen eines weiteren Auftrages die gesamte Lösung neu zu entwickeln.

Durch dieses Verhalten wird die Planung bei der Verkettung mehrerer Aufträge allerdings immer länger, da sich der Raum der Möglichkeiten, und damit die Komplexität, exponentiell vergrößert. Dies führt schnell zu einer nicht akzeptablen Planungszeit. Um das Problem zu verhindern wurde das Verhalten des so Agenten geändert, dass die ersten drei Aufträge vollständig neu geplant werden, alle weiteren Aufträge jedoch den bis dahin bestehenden Plan nutzen und nur den zusätzlichen Auftrag planen. Dadurch beträgt die Planungszeit auch bei komplexen Befehlsverkettungen nur wenige Sekunden. Dies erwies sich als sinnvoller Kompromiss zwischen Planungsoptimalität und Rechenzeit.

4.1.3.4 Ausführung von Plänen

Ist der kostengünstigste, vollständige und ausführbare Plan gefunden, ersetzt er eventuell schon vorhandene Pläne in der Welt "0". Der neue Plan wird zurückgesetzt und der Agent kann nun mit der Ausführung in der realen Welt beginnen. Die Baumstruktur des Plans wird beginnend mit dem ersten Task und aller Subtasks abgearbeitet. Im Unterschied zur Simulation werden Elementartasks nun real ausgeführt, was meist eine Anfrage oder einen Befehl an angeschlossene Module, beispielsweise eine Fluganweisung an das FMS, bedeutet. Sind alle Subtasks abgearbeitet wird ein Task als erledigt markiert und gelöscht. Wie oben beschrieben

sind die meisten Elementartasks eine Abfolge von Anfrage und Abwarten des Ergebnisses. Parallellaufende, zum jeweiligen Task gehörende, Prüfregeln erkennen Fehler bei der Antwort oder Überschreitungen von Höchstwartezeiten. Der Agent kann dann entsprechend reagieren, falls dies in den Ausführungsregeln hinterlegt ist. Eine einfache Reaktion wäre das erneute Senden der Anfrage bei Zeitüberschreitung, eine komplexere die Feststellung des Scheiterns des Plans.

4.1.3.4.1 Voraussimulation in die Zukunft

Die Überprüfung der aktuellen Validität des Plans wird ergänzt durch eine Voraussimulation des Plans in die Zukunft. Durch diese Planüberwachung kann auf Änderungen in der Umwelt oder sonstigen Rahmenbedingungen effizient reagiert werden. Dazu wird der aktuelle Plan in eine neue Welt kopiert, die mit "0.S" bezeichnet ist. Da technisch kein Unterschied zu den Planungswelten aus der Planungsphase besteht werden sofort alle Planungsregeln ausgelöst. Dies beinhaltet das Kopieren von Weltobjekten in ihrem aktuellen Zustand in die Simulationswelt, das simulierte Fliegen entlang der geplanten Route und die Erzeugung von Kosten bei Bedrohung oder anderen Zielverletzungen. Je nach Kostenart existieren Regeln, die ein Vorhandensein dieser Kosten mit einer Warnmeldung dem Bediener mitteilen. Da die Simulation Zeiten berechnet und Verursacher der Kosten mit Zeitpunkt gespeichert werden, bildet dies die Grundlage für ein detailliertes Lagebild des Bedieners. Auch ein Scheitern des simulierten Plans kann erkannt werden und eine entsprechende Meldung an den Bediener abgesetzt werden.

4.1.3.4.2 Umplanung und Lernen

Die Warnmeldungen Trespass, Airspace Violation, Detection Level Violation und Ground Collision geben dem Bediener die Möglichkeit zur Umplanung per Knopfdruck. Dies löst einen erneuten Planungsvorgang aus. Die Maßnahme ist vor allem dann hilfreich, wenn sich an der Situation seit dem Ende der letzten Planung eine Änderung ergeben hat. Diese kann nun im neuen Plan berücksichtigt werden. Problematisch ist die Situation, wenn der ermittelte Plan von Anfang an eine dieser Warnungen auslöst und sich die Situation nicht wesentlich geändert hat. Dies kann vor allem bei Aufklärungsaufträgen oder bei fehlerhaft hinterlegten Daten, wie Luftraumgrenzen, der Fall sein. Der Bediener ist mit der, dem System nach, optimalen Lösung augenscheinlich nicht zufrieden und möchte durch die Neuplanung eine Änderung des Plans erwirken. Bei unveränderter Situation würde der gleiche Plan erneut errechnet werden. Um dem vorzubeugen, wird bei einer Neuplanung der aktuelle Plan gespeichert und Pläne, die diesem stark ähneln mit zusätzlichen Kosten versehen. Beim Planungsvorgang wird nun eine weniger optimale, aber dafür unterschiedliche, Lösung ermittelt, falls dies möglich ist. Dieser Vorgang stellt einen einfachen Lernvorgang dar. Als Beispiel soll die Planung in das in Abbildung 4-5 dargestellte bedrohte Gebiet dienen.

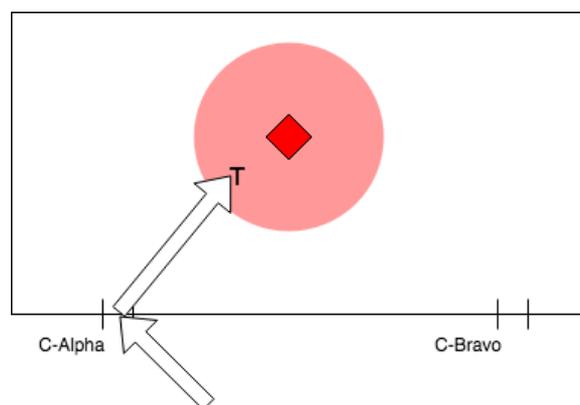


Abbildung 4-5: Einflug in Bedrohung über Korridor

Der Flug erfolgt über den Einflugpunkt C-Alpha und wird trotz Verletzung der Trespass-Regeln bis zum Zielpunkt T durchgeführt, da dies vom Operateur vorgegeben ist. Die Warnung erscheint aufgrund der Verletzung und weist den Operateur auf das Problem hin. Dieser analysiert den Plan und möchte durch eine Neuplanung eine andere Umsetzung des Auftrags erreichen. Eine erneute Berechnung würde im exakt gleichen Plan resultieren. Wird die aktuelle Umsetzung des Plans jedoch im Agenten gespeichert kann sie bei der Neuplanung mit Zusatzkosten belegt werden, so dass nun ein Einflug über Korridor C-Bravo erfolgt. Bei einer erneuten Neuplanung wird der Einflug wieder über C-Alpha erfolgen, da keine weitere wesentlich unterschiedliche Lösung des Auftrags existiert. Sind mehr Alternativen vorhanden, werden diese entsprechend vorgeschlagen, bis es keine weitere mehr gibt und der ursprüngliche Plan wieder angezeigt wird. Ist der Operateur weiterhin nicht mit dem Planungsergebnis zufrieden, muss er tiefer in die Automation eingreifen und beispielsweise die Route ändern.

4.1.4 Umsetzung des Konzepts

Bei der Implementierung des kognitiven Agenten wurde das Konzept des geführten Zugriffs von Anfang an berücksichtigt. Die weiter oben angesprochene Automationshierarchie wird nun direkt für die Umsetzung des Konzepts herangezogen. Variabler Automationsgrad heißt in diesem Zusammenhang, dass Funktionen aus verschiedenen Ebenen dieser Hierarchie direkt eingesetzt werden können. Abbildung 4-6 zeigt noch einmal die Automationshierarchie und mögliche Eingriffspunkte. Die Automationshierarchie ist jetzt, wie auch die Implementierung im weiteren Verlauf, auf ein einzelnes UAV beschränkt.

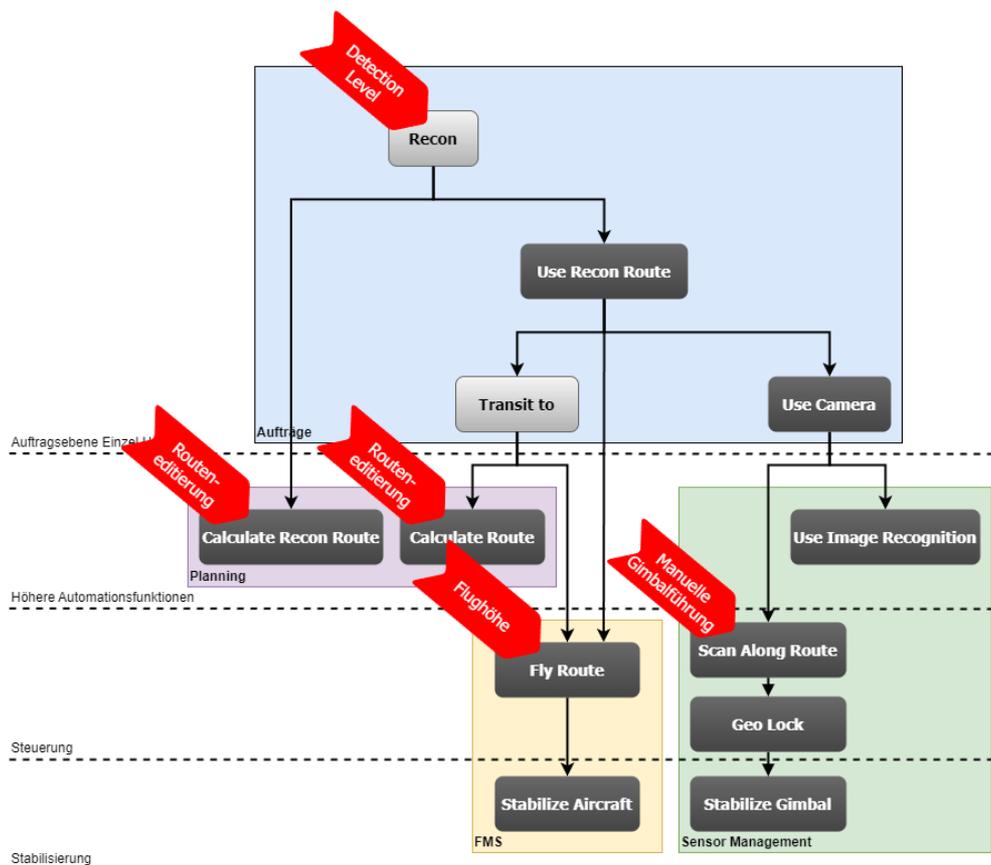


Abbildung 4-6: Eingriffspunkte in der Automationshierarchie eines Einzel-UAV

Wie Eingangs beschrieben, ist es nicht notwendig alle Zugriffe zur Verfügung zu stellen. Stattdessen sollte eine sinnvolle, also in diesem Anwendungsgebiet für den Einsatz hilfreiche, Auswahl an anzubietenden Eingriffsmöglichkeiten ausgewählt werden. Außerdem sollten für die wissenschaftliche Untersuchung Eingriffsmöglichkeiten aus unterschiedlichen

Automationsebenen zur Verfügung stehen. Die Auswahl der Eingriffspunkte nach militärischen Gesichtspunkten fand nach der Befragung von Experten statt. Außerdem wurden mehrere Variationen prototypisch implementiert und getestet, um daraus die finale Konfiguration für die Experimente zu erstellen.

4.1.4.1 *Planungskonflikte und Warnungen*

Durch die vom Konzept vorgesehenen Eingriffe wird der vorher ermittelte Plan verändert. Dadurch kann es zu Konflikten kommen, falls Ziele des Agenten verletzt werden. Der Agent ist konzeptionell und durch seine Umsetzung immer an die Vorgaben des Nutzers gebunden. Dies können Aufträge oder Eingriffe in die Automation sein. Demnach ist das oberste Ziel die Einhaltung dieser Vorgaben. Weitere Ziele, wie beispielsweise der Selbstschutz oder die Nichtaufklärbarkeit können dabei jedoch verletzt werden. Durch die stets ablaufende Voraussimulation können solche Konflikte meist schon vor dem Eintreten erkannt werden. Zusammen mit der Situationsanalyse ermöglicht dies eine detaillierte Warnung an den Nutzer wo und wie Ziele verletzt werden. Auf dieser Grundlage kann sich der Operateur für eine Rücknahme seines Auftrags oder seines Eingriffs entscheiden. Er kann jedoch auch den Plan unverändert ablaufen lassen und die Konflikte in Kauf nehmen, falls dies taktisch die beste Wahl ist oder falls die Warnungen unbegründet sind, beispielsweise durch Fehler oder fehlendes Wissen in der Automation. Zuletzt bietet der Agent auch eine Umplanungsmöglichkeit per Knopfdruck an, wobei der oben beschriebene einfache Lernalgorithmus Pläne verhindert, die zum gleichen Konflikt führen. Die gleiche Verhaltensweise wird auch bei Konflikten angewendet, welche sich durch Änderungen der taktischen Lage ergeben. So könnte eine aufgeklärte feindliche Einheit die durch den Operateur vorgegebene Route blockieren. Die Voraussimulation erkennt auch diesen Fall und die erzeugten Warnungen geben dem Nutzer die Möglichkeit zu reagieren.

Die Voraussetzung für diesen Vorgang ist eine ständige Kommunikationsmöglichkeit, wie sie im militärischen Einsatz nicht immer gegeben ist, jedoch hier aus Vereinfachung angenommen werden soll. Die Berücksichtigung von unterbrochener Kommunikation in diesem Fall bildet die Grundlage für weitere Forschung.

4.1.4.2 *Umgesetzte Eingriffspunkte*

Die resultierenden Eingriffspunkte sind den in Abbildung 4-6 gekennzeichneten Automationsgraden zugeteilt

Tabelle 4-4 zeigt diese Zuordnung. Die einzelnen Eingriffe werden im Folgenden beschrieben.

Tabelle 4-4: Abbildung auf Automationsgrade

Eingriff	Automationsgrad
Veränderung des Detection-Level für beliebige Aufträge	Auftragsbasierte Führung
Veränderung von Transitrouten durch editieren des Routenplanerergebnisses	Konventionelle Automation
Veränderung von Aufklärungsrouten durch editieren des Aufklärungsroutenplanerergebnisses	Konventionelle Automation
Flughöhe	Manuelle Eingaben
GimbalScan	Konventionelle Automation
GimbalLock	Manuelle Eingaben

4.1.4.2.1 Geführter Zugriff auf Detection-Level

Die Einstellung des Detection-Level erfolgt für jeden Auftrag. Die Umsetzung des geführten Zugriffs ist trivial, da die Einstellung erst nach Auftragserteilung möglich ist.

4.1.4.2.2 Geführter Zugriff auf Transitrouten

Die Transitrouten sind ein Produkt der Automationsfunktion Routenplaner. Sie werden für fast alle Bewegungen des UAVs eingesetzt. Grundsätzlich ist es möglich auf zwei Arten manuell auf die Automationsfunktion Routenplaner einzuwirken. Entweder können die Eingabeparameter verändert oder das Ergebnis der Planung kann verändert, beziehungsweise ganz vorgegeben werden. Es wäre denkbar im Routenplaner die Gewichte der Gefährdungen zu verändern, um beispielsweise direktere, dafür weniger sichere Routen zu erhalten. Das Problem der Parametermanipulation bei komplexen Automationsfunktionen ist die Unklarheit des Zusammenhangs zwischen Ursache (Änderung eines Parameters) und Resultat (veränderte Route) für den Menschen. Dies ist vor allem auf Nichtlinearitäten bei der Kostenberechnung zurückzuführen.

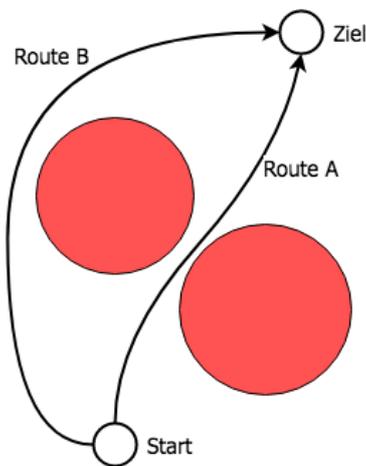


Abbildung 4-7: Parameter Routenplaner

Abbildung 4-7 zeigt ein Beispiel einer solchen Nichtlinearität. Innerhalb der roten Bedrohungsradien sind die Kosten sehr hoch. Die optimale Route A führt zwischen den Bedrohungen hindurch. Soll nun ein größerer Abstand zu den Bedrohungen gehalten werden, springt die optimale Lösung ab einem bestimmten Abstandswert auf die neue Route B. Nur durch Ausprobieren, bzw. systematisches Untersuchen der verschiedenen Einstellungen ist es möglich, ein Gefühl für die Auswirkungen von solchen Parameteränderungen zu bekommen.

Eine weitere Möglichkeit ist das Verändern von zusammengefassten Parametern, bzw. dem Nutzer leichter verständlichen Beschränkungen. Hiermit wäre es möglich beispielsweise bestimmte Gebiete zu meiden oder bestimmte Punkte auf der Route zu bevorzugen. Dies ist gleichbedeutend mit einer die Parameterveränderung in reduziertem Umfang. Auf diese Art des manuellen Eingriffs wurde gezielt verzichtet, da ein ähnlicher Eingriffstyp bereits durch die Vorgabe des Detection-Levels behandelt wird. Durch den Verzicht sollte auch die Komplexität der Bedienung und die damit verbundenen Lerneffekte im späteren Versuch reduziert werden.

Somit bleibt zur Routenmanipulation die direkte Veränderung der bereits geplanten Route. Dafür wurde zum einen die Möglichkeit implementiert einzelne Wegpunkte auf der Karte zu verschieben und deren Höhe einzustellen. Zum anderen kann die gesamte Route von Hand vorgegeben werden, indem die Route gelöscht wird und durch Hinzufügen neuer Wegpunkte eine neue Route erstellt wird. Wie sich herausstellte, sind diese beiden Eingriffe in fast allen Fällen ausreichend. Um einen undefinierten Abschnitt der Flugstrecke zu vermeiden, werden

Anfangs- und Endpunkte der manuellen Routen automatisch mit dem End- bzw. Anfangspunkt der vorherigen bzw. nachfolgenden Flugroute verbunden. Dies erlaubt auch dem Agenten eine konsistente Weiterplanung trotz Eingriff des Menschen.

Abbildung im Agenten: Der Agent wird über die Änderung der Route durch eine Änderung der taktischen Lage informiert. Die neue Route ist nach der Manipulation in der taktischen Lage enthalten und wird über den normalen Updatemechanismus in das WorkingMemory eingetragen. Sie kann nun für die Projektion des Flugweges verwendet werden. Zusätzlich wird die Route als durch den Bediener verändert gekennzeichnet. Dies ermöglicht eine besondere Behandlung, beispielsweise beim Umplanen.

4.1.4.2.3 Geführter Zugriff auf Aufklärungsrouten

Wie auch beim Routenplaner so kann auch beim Aufklärungsplaner ein Eingriff entweder über die Veränderung der Parameter oder des Ergebnisses stattfinden. Die in diesem Fall verfügbaren Parameter sind der Abstand zum Aufklärungsziel, sowie die Annäherungs- und Flugrichtung. Für den Aufklärungsplaner wurden der Abstandsparameter und die Flugrichtung dem Operator zugänglich gemacht. Dieser kann über die Einstellung der Einschränkung DetectionLevel den Abstand qualitativ festlegen und über die Auswahl Recon bzw. Recon Rev. im Kontextmenü die Flugrichtung bestimmen. Grundsätzlich übernehmen alle Unteraufträge das Detectionlevel des übergeordneten Auftrags. Es können einzelnen Unteraufträgen jedoch auch unterschiedliche DetectionLevels zugewiesen werden. Die zweite Möglichkeit besteht wiederum in der Veränderung bzw. Vorgabe der Aufklärungsflugroute direkt. Dies wurde, ähnlich der Transitroute, ebenfalls implementiert. Der Unterschied besteht lediglich in der Möglichkeit auch den letzten Wegpunkt zu verändern, da sich eine größere Flexibilität bei der Aufklärungsflugroute als notwendig erwies.

Abbildung im Agenten: Die veränderte Aufklärungsflugroute wird analog zu normalen Flugrouten über die taktische Lage in das WorkingMemory eingetragen und ebenfalls als verändert gekennzeichnet.

4.1.4.2.4 Geführter Zugriff auf die Flughöhe

Als exemplarischer Eingriff auf eine Automationsfunktion rein über Veränderung der Eingangparameter wurde der Autopilot mit dem Parameter Flughöhe implementiert. Über eine Vorgabe der Einschränkung Flughöhe über Grund ist es möglich die resultierende Flugbewegung auf niedrigem Automationslevel zu manipulieren.

Abbildung im Agenten: Die Veränderung der Flughöhe wird direkt in die betroffenen Unteraufträge als vom Operator vorgegebene Randbedingung eingetragen. Bei der Erstellung und Simulation des Flugweges und bei Umplanungen wird mit den festgelegten Werten gearbeitet.

4.1.4.2.5 Geführter Zugriff auf den Kameragimbal

Die Automationsfunktionen hinter dem Kameragimbal setzen sich zusammen aus Bodenstabilisierung, Bodenfolgefunktion, Kameraeinstellung und Bilderkennung. Für diese existieren eine große Zahl an Parametern, bei denen eine Änderung oft keinen direkten Zusammenhang mit der Auswirkung haben, so dass oft nur durch Ausprobieren das gewünschte Ergebnis erreicht werden kann. Dazu zählen beispielsweise die Regelungsparameter der Stabilisierung, die Belichtungseinstellungen der Kamera oder die nichtlinearen Parameter der Bilderkennungsalgorithmen. Deshalb wurde auf einen Großteil der Manipulationsmöglichkeiten verzichtet. Lediglich für die Bodenfolgefunktion wurden Eingriffe implementiert. Zum einen kann der Gimbal auf eine beliebige Bodenkoordinate oder ein beliebiges Element in der taktischen Lage fixiert werden (GeoLock). Dies erlaubt das

genauere Betrachten auftauchender Objekte und der vorherrschenden Situationen. Zum anderen kann ein Scanbefehl auf eine Route oder eine Fläche gegeben werden. Dies hat den Einsatz der gesamten Sensorautomation auf dieses Objekt zur Folge. Ein laufender Scan des Gimbals kann durch den Bediener pausiert werden. Dies ist vor allem nützlich, wenn interessante Objekte im Sensorstream erscheinen, die genauer betrachtet werden sollen. Während der Pause kann der GeoLock auf beliebige statische und dynamische Positionen eingesetzt werden, was beispielsweise das Verfolgen von sich bewegenden Einheiten ermöglicht. Anschließend kann durch ein Resume der Gimbal wieder freigegeben werden und die Automation fährt mit dem Scannen am letzten aktiven Punkt fort.

Abbildung im Agenten: Die manuelle Bedienung des Gimbals wird im Agenten durch den neuen Gimbalstatus gekennzeichnet. Darin sind der momentane Benutzer und der letzte Befehl, wie GeoLock oder Scan, enthalten. Mithilfe dieser Informationen kann der Agent erkennen, ob die Kamera für aktuelle oder zukünftige Einsätze zur Verfügung steht. Dieses Verständnis hilft bei der Informationsaufbereitung für den Menschen. Ist der Gimbal in Benutzung und soll er demnächst durch den Agenten eingesetzt werden, so kann eine Aufforderung an den Operateur erfolgen den Gimbal demnächst freizugeben. Kann der Agent aufgrund der Gimbalnutzung durch den Menschen einen Auftrag nicht fortführen, so kann eine Warnung erfolgen. Dieses Konzept wurde im Agenten generalisiert für Objekte vom Typ Resource umgesetzt und kann entsprechend auf andere beschränkt zur Verfügung stehenden Hilfsmittel angewendet werden.

4.1.5 Resultierender Kognitiver Agent

Die finale Version des in Drools umgesetzten kognitiven Agenten besteht aus 20 Faktenklassen und 152 Regeln. Diese sind in 13168 Codezeilen umgesetzt. Der Agent ist in der Lage auf einem Intel i7 Prozessor mit 3.3GHz und 8GB RAM bis zu 64 parallele Planungswelten zu erstellen, zu simulieren und innerhalb von maximal fünf Sekunden einen Plan zu generieren. Der durchschnittliche Anwendungsfall zeigt eine Planungszeit von weniger als einer Sekunde. Die genauen Messwerte werden im Ergebniskapitel vorgestellt. Außerdem lassen sich Änderungen durch die einfache Syntax, die klare Struktur und Priorität innerhalb der Regeln und die einfache Anbindung an die Außenwelt einfach durchführen.

4.2 Umsetzung der Bedienoberfläche

Als Benutzerschnittstelle für die Kommandierung der UAVs und die Bereitstellung der Aufklärungsergebnisse wurde ein Kartendisplay mit zusätzlichen Funktionalitäten gewählt. Dieses lässt sich modular in ein Multifunktionsdisplay (MFD) integrieren oder unabhängig auf verschiedenen Anzeigegeräten darstellen.

Das MFD umfasst alle notwendigen Funktionen für die Bedienung eines Hubschraubers, wie Primary Flight Display (PFD), Navigationskarte, Funkgeräteinstellungen und ähnliches. Im Folgenden werden lediglich die Elemente für die UAV-Führung beschrieben. Sowohl das MFD als auch das Kartendisplay basieren auf der Vorarbeit von (Brand, 2013), wurden jedoch für die UAV-Bedienung stark angepasst. Die Sensoransichten wurden in der gemeinsamen Projektarbeit mit (Ruf, von der Mülbe, & Stuetz, 2017) erstellt.

4.2.1 Kartendisplay

Das Kartendisplay dient der räumlichen Orientierung, sowie dem Überblick über die aktuelle taktische Lage.

4.2.1.1 Allgemeine Elemente

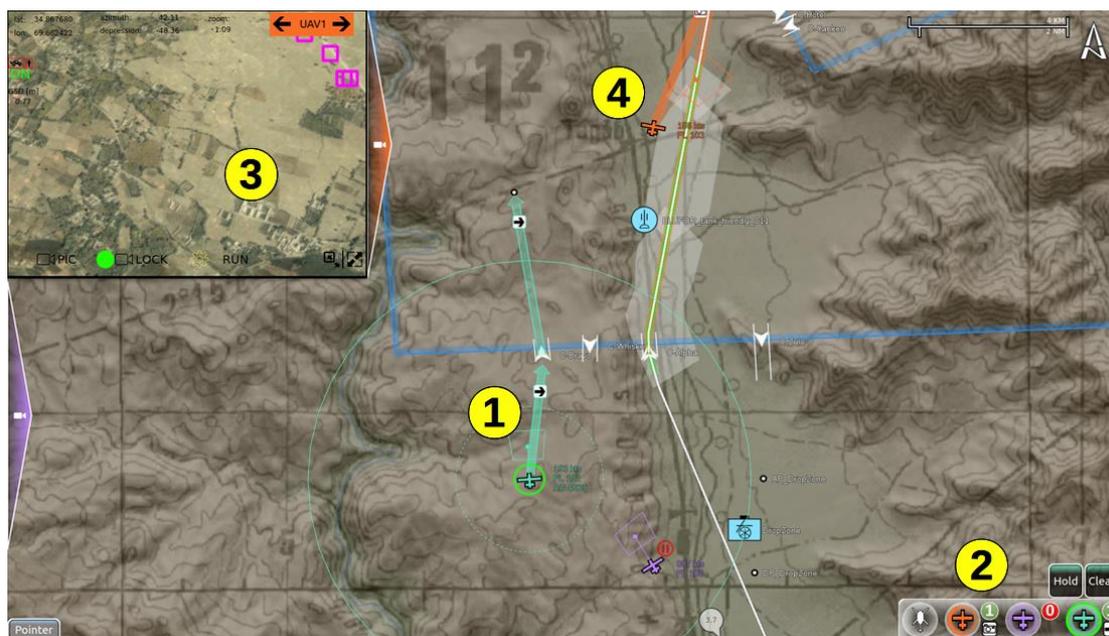


Abbildung 4-8: Multifunktionsdisplay mit taktischer Karte

Abbildung 4-8 zeigt die verschiedenen Elemente des Kartendisplays. Die Karte ist frei verschiebbar und die Zoomstufe per Fingergeste einstellbar. Im Hintergrund sind die hinterlegten Kartendaten zu sehen. Je nach Zoomstufe wird auf die nächste passende hinterlegte Karte gewechselt. Dies erlaubt eine Darstellung von Übersichtskarten (1:100.000), Detailkarten (1:50.000) und Satellitenfotos in einem. Oben rechts ist der Nordpfeil mit Maßstab zu sehen. Taktische Kartenelemente, wie Routen, Lufträume, Flugverbotszonen, sowie andere Einheiten werden ebenfalls dargestellt (Nummer 1).

4.2.1.2 Darstellung der UAVs

Die wesentliche Funktion der Karte ist die Darstellung der UAVs an deren aktueller Position. Zusätzlich werden für jedes UAV Fluginformationen wie Flugrichtung und Position durch Positionierung auf der Karte, sowie Flightlevel, Höhe über Grund und Fluggeschwindigkeit als numerische Werte direkt am UAV angezeigt. Außerdem werden zur Unterstützung der Entfernungsabschätzung ein durchgezogener Kreis im Abstand von 3 NM und ein gestrichelter Kreis im Abstand von 1 NM um das ausgewählte UAV angezeigt. Die momentane Sensorausrichtung ist durch eine Linie vom UAV-Symbol zum Aufpunkt des Sensors dargestellt. Zusätzlich wird der momentane Sensorfootprint auf der Karte visualisiert.



Abbildung 4-9 UAV-Dock mit aktuellem Auftrag und Statusinformationen

Für einen Überblick über den Status aller eigenen Luftfahrzeuge existiert ein UAV-Dock (Abbildung 4-9). Im Dock sowie durch Klick auf das Symbol in der Karte kann ein UAV oder der Helikopter ausgewählt werden. Außerdem wird im UAV-Dock für jedes UAV der aktuelle Auftragsfortschritt (Kreisanzeige um das jeweilige UAV), die Anzahl der noch

abzuarbeitenden Aufträge und der aktuelle Auftrag mit Hilfe eines Auftragsymbols (z.B. kleine Kamera für Aufklärung, Pfeil für Transitflug) angezeigt. Nach Auswahl eines UAVs stehen die Schaltflächen Execute/Hold und Clear zur Verfügung. Erstere steuert die Ausführung der Aufträge und letztere löscht alle bestehenden Aufträge für dieses UAV.

4.2.1.3 Kontextmenü

Durch Klicken auf eine freie Position oder ein taktisches Element wird ein situationsabhängiges Kontextmenü geöffnet.



Abbildung 4-10: Kontextabhängiges Menü für Position, Route und LandingSite

Je nach Objekt enthält es verschiedene Einträge. Abbildung 4-10 zeigt das Menü für einen Punkt auf der Karte, eine Route, und eine Landezone. Unabhängig vom angewählten Objekt steht mit der Schaltfläche Info eine Funktion zur Verfügung, welche zusätzliche Informationen zum angewählten Objekt einblendet. Zusätzlich erscheinen die immer verfügbaren Aufträge Transit, Recon, Recon Reverse, Find Path und Follow Route in der jeweiligen UAV Farbe. Je nach Element werden weitere Menüeinträge sichtbar, wie beispielsweise die Edit-Route-Funktion. Diese ermöglicht es selektierte Routen zu verändern. Nach der Selektion erscheint das Kontextmenü mit den Optionen Edit Route und Redraw Leg. Mithilfe des ersten Eintrages können Wegpunkte hinzugefügt, verlegt oder entfernt werden. Mit dem zweiten Eintrag kann der gesamte Routenabschnitt neu gezeichnet werden, indem die Wegpunkte nacheinander durch Klick eingegeben werden.

4.2.1.4 Sensoransichten

Auf der linken Seite im Multifunktionsdisplay stehen zwei Sensoransichten zur Verfügung die bei Bedarf ausgeklappt werden können (Nummer 3). In Abbildung 4-11 ist die untere Sensoransicht vergrößert dargestellt.

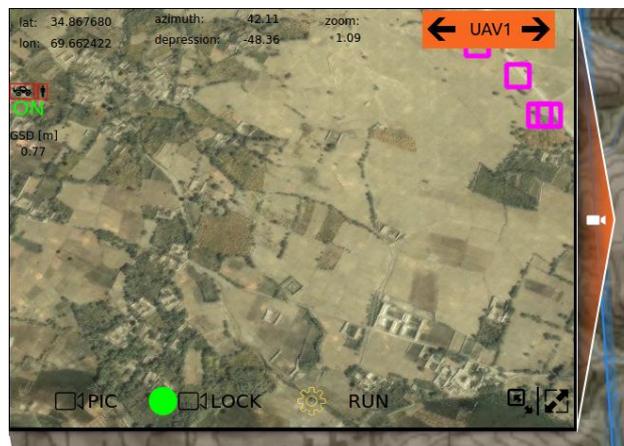


Abbildung 4-11: Sensorfenster

Beide können auf den Sensor eines UAVs, unabhängig vom ausgewählten Luftfahrzeug auf der Karte, aufgeschaltet werden. Die Ansichten bieten Funktionen zum Zoomen und Fixieren des Sensors auf einen Punkt. Außerdem stehen Informationen zur Gimbalausrichtung und zur Bodenauflösung zur Verfügung. Zusätzlich kann der Sensor über das Kontextmenü der Karte auf einen Punkt oder eine Einheit fixiert werden.

4.2.1.5 Eingriffsmöglichkeiten auf verschiedenen Automationsebenen

Gemäß dem Konzept des geführten Zugriffs erfolgen alle Eingriffe durch die Planhierarchie, um eine Zuordnung zu einem Auftrag sicherzustellen. Der höchste zur Verfügung stehende Automationsgrad für die Agenten an Bord der UAVs ist hierbei die auftragsbasierte Führung.

4.2.1.5.1 Auftragsbasierte Führung

Durch einen Klick auf eine der Auftragschaltflächen im Kontextmenü wird der entsprechende Auftrag an die Auftragsliste des jeweiligen UAVs angehängt. Dies löst eine Planung durch den Agenten aus. Vergebene Aufträge werden in Form von Pfeilen symbolisiert. Diese sind während der Planung gestrichelt und nach deren Abschluss durchgezogen gezeichnet. Außerdem ist der Planungsvorgang im UAV-Dock am jeweiligen UAV durch ein Wartesymbol dargestellt. Dabei ist es möglich einen übergeordneten Auftrag zu erteilen, wie beispielsweise ein Gebiet aufzuklären, oder mehrere Aufträge zu verknüpfen, um das Vorgehen des Agenten stärker zu beeinflussen. So könnten mehrere Transit-Aufträge den Weg zum aufzuklärenden Gebiet vorgeben. Dies erlaubt die Anwendung des Stringenzkonzepts von (Uhrmann, 2013). Parameter von Aufträgen oder Unteraufträgen können durch Auswahl des entsprechenden Auftragspfeils gesetzt oder verändert werden. Das erscheinende Kontextmenü bietet beispielsweise die Vorgabe der Flughöhe oder des DetectionLevel für Aufklärungsaufträge. Diese Veränderung der Auftragsparameter stellt einen manuellen Eingriff auf Auftragsebene dar.

4.2.1.5.2 Zoomabhängiger Detailgrad

Die Darstellung mehrerer UAVs mit allen Aufträgen und Details führt zu einer überfrachteten Benutzerschnittstelle. Hierfür wurde eine Darstellung implementiert, die den Detailgrad vom aktuellen Kartenzoom abhängig macht. Bei kleinerem Zoomfaktor werden weniger und bei größerem Zoomfaktor mehr Details angezeigt.

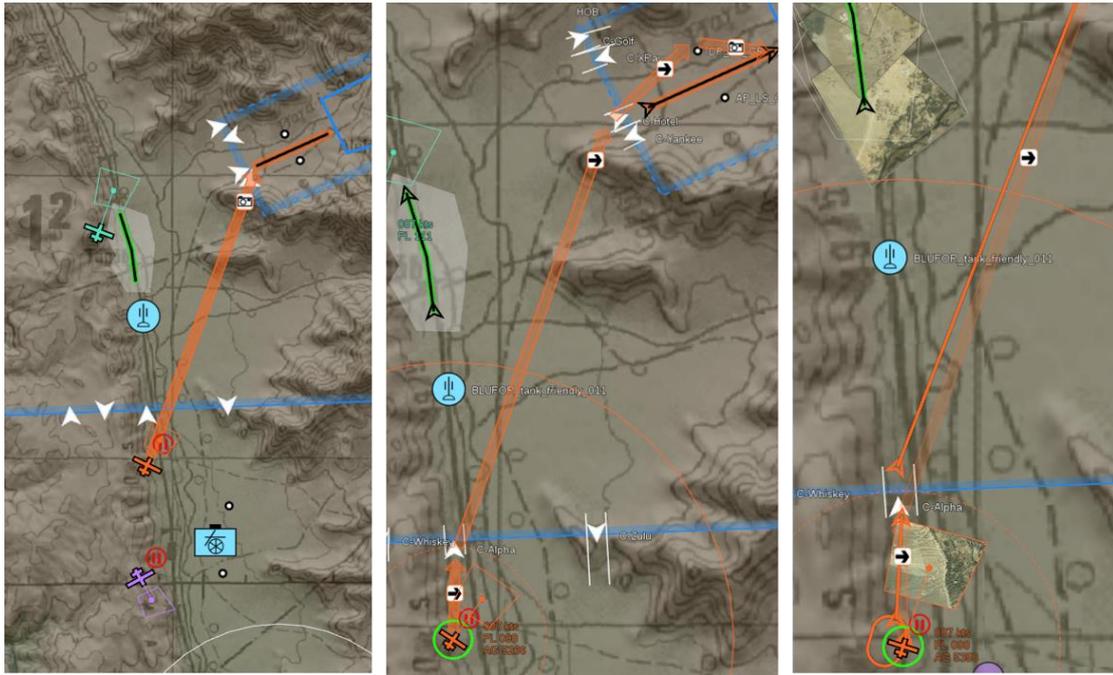


Abbildung 4-12: MFD Zoomstufen mit zunehmenden Details

Auftragspfeile folgen diesem Darstellungskonzept. Bei niedriger Zoomstufe werden nur die übergeordneten Aufträge angezeigt, bei mittlerer Zoomstufe werden zusätzlich Unteraufträge eingeblendet und bei hoher Zoomstufe wird beim aktuell ausgewählten UAV zudem noch die Flugrouten dargestellt. Die Aufträge des angewählten UAVs werden ferner immer eine Stufe detaillierter angezeigt. Das in Abbildung 4-12 dargestellte orangefarbene UAV führt einen Aufklärungsauftrag im inneren blau umrandeten Einsatzgebiet durch. Es nutzt dazu Einflugpunkte, die bei größerer Zoomstufe erkennbar werden. Bei einer weiteren Vergrößerung der Zoomstufe werden auch die Details der Flugroute angezeigt.

4.2.1.5.3 Eingriffe auf Subsystemebene

Eingriffe in die Routenplanung erfolgen über den zoomabhängigen Detailgrad. Die automatisch errechneten Routen werden bei ausreichend großem Zoomlevel dargestellt und können durch das Kontextmenü wie oben beschrieben beliebig verändert werden.

In das Sensorsystem kann über die Sensoransicht manuell eingegriffen werden. Dabei können der Sensoraufpunkt auf dem Boden und die Zoomstufe eingestellt werden. Im Gegensatz zu den bisherigen Eingriffsarten ist das Sensorsystem parallel zu anderen Tätigkeiten nutzbar. Zu Konflikten kommt es, wenn der Sensor vom Nutzer verwendet wird, während er gleichzeitig vom Agenten für einen Auftrag benötigt wird. In diesem Fall wird der Nutzer über eine Warnung informiert und kann den Gimbal wieder freigeben. Der Agent wartet bis zur Freigabe des Sensors mit der Ausführung des Teilauftrages, was es dem Nutzer ermöglicht laufende Aufklärungen zu unterbrechen und nahtlos fortzusetzen.

4.2.1.6 UAV Warnungen

Für bestimmte Fehlerzustände des UAVs werden Warnungen oberhalb des UAV-Docks angezeigt, wie es in Abbildung 4-13 dargestellt ist.



Abbildung 4-13: UAV Warnungen

Je nach Farbe stellt die Warnung entweder eine Bedrohung der Mission (Rot), beispielsweise durch Verlust des UAVs, eine Missionsverzögerung oder Einbuße der Missionsqualität (Gelb), beispielsweise durch schlechte Aufklärungsergebnisse, oder eine Information (Blau) dar. Sie beinhaltet weiterhin das betroffene UAV als Textfarbe und in Textform den Warnungstyp und bei in der Zukunft auftretenden Problemen die Zeit bis zum Eintreten in Sekunden. Für einige Warnungstypen steht die Möglichkeit der Neuplanung (engl. Replan) zur Verfügung und bei Aufenthalt im bedrohten Gebiet wird eine Möglichkeit zum Rückzug (engl. Retreat) angeboten. Alle Warnungen ermöglichen die schnelle Anzeige (engl. Show) der Ursachen. Dabei werden die verursachenden Missionselemente in der Karte dargestellt und kurzzeitig blinkend hinterlegt. Zusätzlich zur Warnung selbst wird bei roten und gelben Warnungen ein Dreiecksymbol mit Ausrufezeichen in der entsprechenden Farbe im UAV-Dock neben dem betroffenen UAV (siehe Abbildung 4-13) und neben dem UAV-Symbol auf der Karte (siehe Abbildung 4-14) angezeigt. Dadurch wird die Sichtbarkeit für den Operateur erhöht.



Abbildung 4-14: UAV Warnung auf Karte

4.2.2 Zusammenfassung

Mithilfe des Kartendisplays und seinen Steuerelementen wurde eine Möglichkeit geschaffen direkt in der Automationshierarchie einzugreifen und gemäß dem Konzept des geführten Zugriffs innerhalb eines existierenden Plans Anpassungen vorzunehmen.

5 Integration und Erprobung

In diesem Kapitel werden die Integration des vorgestellten Agenten und der Benutzerschnittstelle in ein Gesamtsystem und dessen Evaluierung in beiden vorgestellten Anwendungsfällen beschrieben. Die Evaluierungen der MUM-T Konfiguration bestand aus einer Funktionsdemonstrationen in einer Simulationsumgebung mit explorativer Untersuchung zur Einsetzbarkeit des Systems und zur Nutzung von variablen Automationsgraden. Die Evaluierung der UAV-Steuerung aus einer Bodenkontrollstation wurde in Mensch-Maschine-Versuchen im Realflug zum Vergleich des Konzepts des geführten Zugriffs mit dem freien Zugriff auf Automationsfunktionen durchgeführt. Die Beschreibung der Experimente umfasst dabei jeweils die spezifischen Anpassungen in der Integration, die Versuchsbeschreibung und die Auswertung.

5.1 Integration Agent und Benutzerschnittstelle

Für beide Anwendungsfälle wurde eine einheitliche Architektur geschaffen, deren Aufbau und Softwaremodule im Folgenden beschrieben sind. Abbildung 5-1 zeigt die Integration von Agent und Benutzerschnittstelle in das Gesamtsystem. Die notwendigen anwendungsfallsspezifischen Änderungen werden in den entsprechenden Abschnitten vorgestellt.

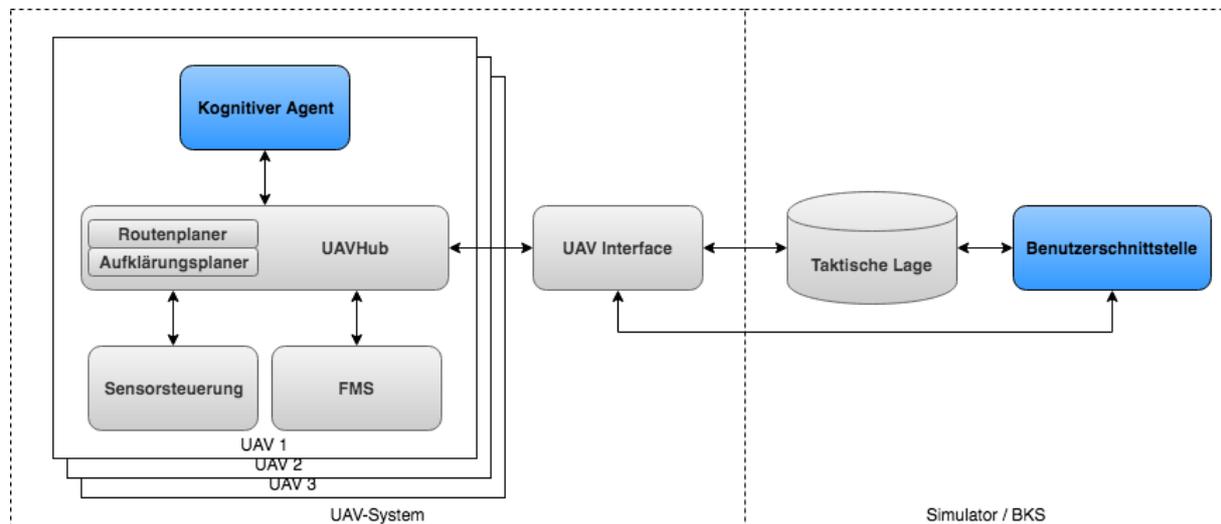


Abbildung 5-1: Integration von Agent und Benutzerschnittstelle in das Gesamtsystem

Der **kognitive Agent** kommuniziert mit der Außenwelt über das **UAVHub**. Dieses umfasst zusätzlich zwei Softwarekomponenten integriert, die Planungsberechnungen übernehmen.

Der **Routenplaner** ist für die Berechnung von Flugrouten zuständig. Da der Agent mit Handlungsoptionen arbeitet, soll der Routenplaner nicht ein optimales, sondern mehrere unterschiedliche, aber ausreichend gute, Ergebnisse zurückgeben. Diese werden vom Agenten unter den gegebenen Bedingungen mit der internen Situationsanalyse geprüft und entsprechend für den Plan ausgewählt. Der Routenplaner basiert auf einer Implementierung des A*-Algorithmus nach (Schmitt, 2021). Grundlage für die Planung ist ein Höhenmodell des Terrains. Die Quelle für Terrainhöhen sind reale SRTM Daten nach (Farr et al., 2007) mit 30m Stützstellenabstand. Begrenzende Parameter, wie Steigrade oder minimaler Kurvenradius und Hindernisse, wie feindliche Einheiten, Luftraumstrukturen oder Flugverbotszonen werden ebenfalls berücksichtigt. Die Kostenfunktion nutzt Distanz als Hauptbeitrag, gewichtet jedoch positive Höhendifferenzen, als Steigen, stärker. Einflüge in Terrain oder Hindernisse sind ausgeschlossen. Der Routenplaner bietet 2D- und 3D-Planung. Bei letzterer umfliegt oder überfliegt der Planer Hindernisse je nach Kosten, kann jedoch auf ein bestimmtes Höhenband begrenzt werden, was für taktische Flugmanöver interessant ist. Falls ein Flugweg nicht

möglich ist, weil beispielsweise Start- oder Endpunkt unterhalb des Terrains liegen, wird ein Fehler zurückgegeben.

Der **Aufklärungsplaner** stellt für gegebene Geometrien Aufklärungsflugrouten zur Verfügung. Generell ist die Berechnung einer Flugroute für den optimalen Einsatz eines Sensors ein komplexes Problem. Zur Vereinfachung wurde die Berechnung für drei mögliche Geometrien auf ein festgelegtes Set an einfach bestimmbar Lösungen reduziert. Dies geschah unter der im militärischen Kontext sinnvollen Annahme, dass das Aufklärungsziel nicht überflogen werden soll und die Bewegung des Sensoraufpunkts auf dem Boden schneller erfolgt als die Bewegung des UAVs in der Luft. Für Punktziele und Flächen werden vier mögliche Aufklärungsflugrouten (A, B, C, D) zurückgegeben, für Routen zwei (A, B), wobei durch einen Parameter die Richtung entlang der Route festgelegt werden kann. Durch einen weiteren Parameter kann der minimale Abstand zum Ziel gewählt werden. Die möglichen resultierenden Flugrouten für die drei Geometrien sind in Abbildung 5-2 dargestellt. Die Bewegungen des Sensoraufpunkts ist ebenfalls dargestellt. Deren Berechnung erfolgt durch die Sensorverwaltung und wird weiter unten vorgestellt.

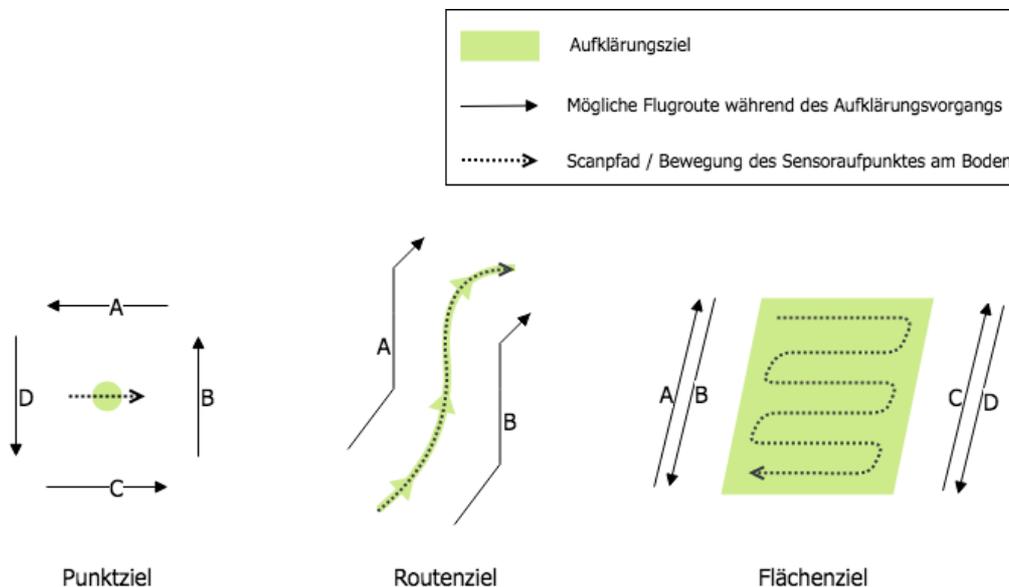


Abbildung 5-2: Aufklärungsflugrouten und Scanpfade bei unterschiedlichen Aufklärungszielen

Ähnlich wie der Routenplaner arbeitet der Aufklärungsplaner anfragenbasiert. Die Anfrage muss dabei das Ziel, sowie die Abstandsparameter und die gewünschte Flughöhe enthalten. Als Ergebnis liefert das Modul zwei oder vier dreidimensionale Aufklärungsflugrouten zurück.

Das **Flight-Management-System (FMS)** bildet die Schnittstelle des Agenten zum Autopiloten. Es nimmt kommandierte Werte vom Agenten entgegen, verwaltet die aktuelle Flugroute und stellt Informationen zu Fähigkeiten und Status des Autopiloten zur Verfügung. Durch seine generische Schnittstelle abstrahiert das FMS die Kommunikation zum Autopiloten. Somit können verschiedene Ausprägungen von Fluggeräten angesteuert werden. Das FMS übernimmt die Flugführung auf Wegpunktebene. Dazu kann der Agent Routen und Ausführungsbefehle, wie das Starten oder Pausieren der Route, übergeben. Zusätzlich steht das Halten der aktuellen Position zur Verfügung. Dabei wird die Umsetzung der Befehle an die zugrundeliegende Plattform angepasst. Ein Multikopter ist beispielsweise in der Lage zu schweben, während eine Flächenplattform zum Halten der Position kreisen muss. Für letztere steht dem Agenten zusätzlich die Kreisrichtung als Parameter zur Verfügung. Dies ist vor allem für Aufklärungsaufträge und das Vermeiden von Gebieten, wie Flugverbotszonen oder gefährlichen Bereichen notwendig. Weitere Parameter sind Geschwindigkeit und Flughöhe,

sowohl über Grund, als auch absolut. Alle drei dienen dem Agenten dazu die Plattform optimal zu steuern. Das FMS liefert außerdem die aktuell eingestellten Sollwerte und die tatsächlichen Werte sowie die aktuell hinterlegte Route zurück

Die **Sensorverwaltung** bildet eine abstrahierende Schicht zwischen Operateur, Agentensoftware und dem Sensor. Damit können beliebige Sensoren an das System angeschlossen und der Zugriff auf diese durch beide Nutzer verwaltet werden. Die Sensorverwaltung stellt zwei Automationsstufen für die Sensorsteuerung zur Verfügung. Die niedriger automatisierte Ausrichtungsfunktion bietet lediglich Ausrichtung und Stabilisierung der Kamera auf eine Koordinate. Sie steht dem Operateur direkt als manueller Zugriff mit einem veränderbaren Zoomparameter zur Verfügung. Die höher automatisierte Scanfunktion ermöglicht das Abscannen von Punkten, Routen oder Gebieten. Dabei werden die Parameter Ausrichtung, Bewegungsgeschwindigkeit und Zoom automatisch bestimmt. Die Scanfunktion nutzt hierbei die Ausrichtungsfunktion im Sinne einer Automationshierarchie. Erteilt der Mensch oder der Agent der Sensorverwaltung einen Scanbefehl auf ein Objekt, so richtet es den Sensor auf den Anfangspunkt der Objektgeometrie aus und fährt diese entlang. Bei einer Punktgeometrie wird ein kurzer Abschnitt quer zur Beobachtungsrichtung abgefahren, bei einer Route deren Wegpunkte und bei einem Gebiet ein Suchmuster wie in Abbildung 5-2 dargestellt. Dabei wird durch Anpassung des Zoomfaktors der Kamera sichergestellt, dass ein ca. 1km x 1km Bereich erfasst wird.

Ein Scan kann jederzeit pausiert oder abgebrochen werden. Wird ein automatisierter Scan pausiert fährt er nach der Freigabe an der zuletzt beobachteten Stelle fort. Dies ist vor allem für Situationen wichtig, in denen der Mensch den Sensor während eines Scans durch GeoLock-Befehle für andere Zwecke einsetzt. Die Sensorverwaltung führt hierbei eine Ressourcenverwaltung durch, um einen Zugriffskonflikt zwischen Operateur und Agent zu vermeiden. Dabei kann der Mensch jederzeit einen Scanbefehl des Agenten pausieren oder abbrechen. Er muss jedoch den Sensor nach seiner Verwendung wieder für den Agenten freigeben. Dem Agenten ist es nicht erlaubt auf einen vom Menschen genutzten Sensor zuzugreifen. Er wird jedoch über die Nutzung informiert und kann seinerseits den Menschen über Warnungen zur Freigabe auffordern.

Die Entwicklung einer automatisierten Detektion ist nicht Teil dieser Arbeit, jedoch für den sinnvollen Einsatz des UAVs unverzichtbar. Deshalb wurde diese Funktion im Experiment mit Hilfe der bekannten Positionen von zu detektierenden Objekten nachgestellt. Ein Objekt wurde als erkannt behandelt, sobald es sich im Sichtbereich des Sensors befand.

Das **UAV Interface** bündelt die Kommunikation aller UAVs und stellt die Informationen gesammelt den jeweiligen Systemen zur Verfügung.

Die **taktische Lage** ist eine In-Memory-Datenbank, die gemeinsam im Rahmen von (Schulte et al., 2018) entwickelt wurde. Sie dient als zentraler Zustandsspeicher für Missionselemente, Luftraumordnungsmaßnahmen und aufgeklärte Objekte. Über sie wird auch das Wissen innerhalb der einzelnen Agenten synchronisiert.

5.2 Evaluierung Gesamtsystem im Hubschraubersimulator

Eine Evaluierung des Systems im Hubschraubersimulator bietet die Möglichkeit detaillierte Messungen unter kontrollierten Umständen durchzuführen. Dabei können viele Elemente, wie zum Beispiel Missionslänge, Anzahl anderer Einheiten und Missionsgebiet auf der Welt besser dargestellt werden als in einem Realflugexperiment. Demgegenüber steht der fehlende Realismus mit der Möglichkeit eines veränderten Verhaltens der Crew gegenüber real fliegenden Luftfahrzeugen.

Ziel der Untersuchung war es die Eignung der Implementierung für die Führung von mehreren UAVs aus einem Hubschrauber heraus mit Zugriff auf variable Automationsgrade explorativ in realitätsnahen Szenarien zu untersuchen. Dabei waren vor allem die Interaktionen zwischen Operateur und System und die Bewertung der Eingriffsmöglichkeiten durch den Operateur Fokus der Untersuchung. Die hier beschriebenen Versuche waren Teil einer umfassenden Messkampagne für das Projekt CASIMUS (Schulte et al., 2018) in dessen Rahmen auch der Aufbau der Experimentalumgebung stattfand.

5.2.1 Versuchsdesign

Die Versuchskonfiguration bestand aus einem Transporthubschraubersimulator mit einem zweisitzigen Cockpit und drei simulierten UAVs mit Aufklärungssensorik in Form einer Gimballkamera. Zwei Besatzungsmitglieder bildeten eine Crew die in die Rollen Kommandant und Pilot unterteilt ist. Dabei führt der Pilot die zur unmittelbaren Steuerung des Hubschraubers notwendigen Tätigkeiten aus. In einer konventionellen Konfiguration ohne UAVs trägt der Kommandant die Verantwortung für das Luftfahrzeug, plant die Mission und unterstützt den Piloten in anspruchsvolleren Situationen. In der hier vorgestellten Versuchskonfiguration nimmt er zusätzlich die Rolle des Operators ein und führt die UAVs über die eingangs beschriebene Bedienoberfläche.

Um die Aussagekraft der Ergebnisse zu verbessern, sollten Hubschraubercrews der Bundeswehr mit langjähriger Flugerfahrung und Einsatzerfahrung in realitätsnahen Missionen den Umgang mit dem Experimentalsystem erproben. Für statistisch belastbare Daten sollte eine große Zahl an Versuchspersonen teilnehmen. Die letzten beiden Anforderungen standen jedoch im Gegensatz zur Verfügbarkeit von erfahrenen Hubschrauberpiloten für die Forschung. Für die CASIMUS Experimente standen schließlich 4 Hubschraubercrews jeweils fünf Tage zur Verfügung, welche sich in eineinhalb Tage für das Training und drei Tage für Messungen und Befragungen aufteilten. Während der Messungen sollten fünf typische militärische Transporthubschraubermissionen geflogen und anschließend im direkten Gespräch mit der Crew ausgewertet werden.

Diese Arbeit konzentriert sich dabei auf den Anteil der UAV-Führung durch den Kommandanten und deren Auswirkung auf die Mission und das Gesamtsystem.

5.2.1.1 Grundidee

Ziel der Experimente war es die Eignung der Implementierung für Einsatzszenarien zu ermitteln und die Nutzung variabler Automationsgrade genauer zu untersuchen. Dazu wurde im Sinne einer explorativen Untersuchung das System so gestaltet, dass den Operateuren grundsätzlich alle Arten variabler Automationsgrade zur Verfügung standen. Diese konnten jederzeit frei und implizit zwischen der auftragsbasierten Führung, durch die Vergabe von höher automatisierten Aufträgen, dem freien Zugriff, durch direkte Ansteuerung der zugrundeliegenden Automationsfunktionen und dem geführtem Zugriff, durch Veränderung von Unteraufträgen oder zu Aufträgen gehörenden Flugrouten, wählen. Damit sollte untersucht werden, ob variable Automationsgrade genutzt werden und ob die Bedienung dieser komplexen Eingriffe möglich ist und zum Erfolg der Mission beiträgt, ohne den Operateur in seiner Rolle als Kommandant zu stark zu beanspruchen.

Für eine umfassendere Datenerhebung sollte das UAV-System in der zur Verfügung stehenden Zeit durch die Operateure möglichst intensiv genutzt werden und so die Anzahl an beobachtbaren Interaktionen zwischen Operateur und System maximiert werden. Aus diesem Grund wurden sehr komplexe dynamische militärische Szenarien für die Missionen gewählt. Deren Dynamik wurde zusätzlich noch durch Änderung der Lage oder des Auftrags während der Mission erhöht, wodurch für die Crew eine neue Vorgehensweise zur Erfüllung der Mission

erforderlich wurde. Für eine bessere Vergleichbarkeit der Missionen und der Arbeitsbelastung durch den Kontakt mit aufzuklärenden Objekten wurden diese dynamisch entlang der geplanten Flugroute platziert.

Für die Validierung der Notwendigkeit variabler Automationsgrade sollte deren Nutzungshäufigkeit, sowie deren Verbesserung der Missionsleistung untersucht werden. Außerdem sollte Bewertung variabler Automationsgrade durch die Operateure mithilfe von Fragebögen untersucht werden.

Zur Sicherstellung einer Mindestmenge an Nutzungen für die Auswertung wurden gezielt Situationen in den Experimentalablauf eingefügt, welche die Anwendung variabler Automationsgrade provozierten.

5.2.1.1.1 Platzierung von aufzuklärenden Objekten

Der Nachteil von dynamischen Missionen für die experimentelle Beobachtung besteht in der Unvorhersehbarkeit des Operateurverhaltens. Als Schwierigkeit für das Design des Experiments stellte sich heraus, dass aufgrund der taktischen Freiheiten eines Hubschrauberkommandanten der Flugweg in jeder Mission zwischen den Crews stark variieren konnte. Dieses Problem wurde besonders relevant, da eine Platzierung von feindlichen und neutralen Einheiten als Aufklärungsobjekte notwendig war und die Anzahl der Detektionen für alle Crews ähnlich sein sollte. Bei den Größen der Missionsgebiete von ca. 80 km² war die Wahrscheinlichkeit ein platziertes Objekt mit dem Helikopter oder einem UAV zu überfliegen, und damit zu detektieren sehr gering. Eine Verteilung von vielen Einheiten im Missionsgebiet zur Erhöhung der Wahrscheinlichkeit hätte, neben Performanzproblemen bei der Simulation und dem niedrigen taktischen Realismus auch zu extremen Häufungen von Detektionen bei einzelnen Crews führen können. Die Lösung des Problems erfolgte mit zwei Ansätzen. Zum einen wurde der Flugweg durch die Vorgabe von Ein- und Ausflugpunkten an den Luftraumordnungsmaßnahmen kanalisiert. Dadurch wurde vor allem die Variabilität der geflogenen Strecke von Crew zu Crew verringert. Außerdem konnten in einigen Missionen feindliche Einheiten an diesen Knotenpunkten platziert werden, um einen Überflug zu garantieren. Dies ließ sich jedoch nicht auf alle Missionen anwenden, da ansonsten die Vorhersehbarkeit sehr hoch und der taktische Realismus durch das Sammeln von feindlichen Einheiten an diesen eigentlich unbekanntenen Punkten gering gewesen wäre. Aus diesem Grund wurde ein Platzierungsverfahren für Einheiten entlang einer geplanten Hubschrauberroute nach folgendem Schema eingesetzt. Zu Anfang der Mission wurde die Flugroute und eine Alternative durch den Kommandanten geplant. Zur Aufklärung dieser Routen wurden dann die UAVs vorausgeschickt. Bevor die UAVs die Grenze der HOA überschritten und damit in das potenziell feindliche Gebiet einfliegen, wurde, nach Freigabe durch einen Experimentator, automatisch eine vorab festgelegte Anzahl an feindlichen und neutralen Einheiten entlang der Routen so platziert, dass stets entweder die Hauptflugroute oder eine der Alternativen bedroht wurde, was ebenfalls vorab für jede Mission festgelegt war. Trotz dynamischer Missionen und geringer Einschränkungen der taktischen Entscheidungen der Crew wird durch das beschriebene Vorgehen eine hohe Vergleichbarkeit zwischen den Crews gewährleistet.

5.2.1.1.2 Provozierte Anwendungsfälle variabler Automationsgrade

Wie bereits beschrieben, können Systeme mit variablem Automationsgrad geeignet sein die Auswirkung neuer und unbekannter Fehler zu reduzieren, da Schwächen einer Automationsfunktion durch den Eingriff des Nutzers behoben werden können. Daraus folgt jedoch das Dilemma für die experimentelle Erprobung Systeme mit variablem Automationsgrad im N+1 Fall anzuwenden. Es muss beim Versuchsdesign entschieden definiert werden, welche Schwächen im System nicht behoben werden und stattdessen als Anwendungsfall für den N+1 Fall genutzt werden sollen. Aus diesem Grund wurden einige

Spezialfälle der hohen Automationsfunktionen für die Experimentalkampagne nicht implementiert, sondern als Anwendungsfälle für das Experiment genutzt. Die nun bekannten Probleme konnten demnach auch gezielt, beispielsweise durch das Einspielen einer bestimmten Situation, ausgelöst werden. Die im Folgenden dargestellten Anwendungsfälle wurden im Experiment untersucht.

Kurzfristige Luftraumordnungsmaßnahmen

Im Gegensatz zu den im System vorhandenen Luftraumordnungsmaßnahmen wie HOA und HOB, kann der Agent prinzipbedingt ihm unbekannte Beschränkungen nicht berücksichtigen. Die Anwendung des variablen Automationsgrads als Schnittstelle zwischen dem Menschen bekannten Wissen und dem Agenten wurde durch die Platzierung eines sogenannten *Operationhouse* in jeder Mission provoziert. Das Operationhouse stellte einen Einsatz von Spezialkräften an einer Position auf der Karte dar. Diese verdeckten Operationen verbieten meist den Überflug mit UAVs für alle verbündeten Einheiten, um eine Warnung des Gegners auszuschließen. Die Operationen werden meist kurzfristig bekannt gemacht und wurden im Experiment durch einen Funkspruch und anschließende Eintragung in die taktische Karte der Crew mitgeteilt. Zusätzlich erfolgte eine Anweisung das Operationhouse in einer bestimmten Himmelsrichtung zu umfliegen. Die Platzierung während des Experiments wurde stets so gewählt, dass ein UAV diese Vorgabe in wenigen Minuten verletzen würde und ein möglichst großer Aufwand bei einer Umplanung entstanden wäre. Dies zwang die Piloten den Aufforderungen des Funkspruchs durch eine manuelle Veränderung der Route zu folgen. Diese Art des Wissenstransfers vom Menschen in die Maschine sollte durch diesen Anwendungsfall dargestellt werden.

Aufklärungsflugrouten

Der Aufklärungsplaner erstellte Routen für die Aufklärung ausschließlich anhand der Geometrie des Aufklärungszieles und dem umgebenden Gelände. Dies führt jedoch unweigerlich zu Problemen, falls Hindernisse oder Bedrohungen ein Abfliegen der Route stören oder unmöglich machen. Die Beseitigung der Mängel ist nicht trivial, da eine Vielzahl von möglichen Situationen dazu führen kann. Die Behandlung von unvorhersehbaren Situationen ist jedoch genau eine Stärke des Menschen, welcher diese durch variable Automationsgrade im System zur Anwendung bringen kann. Die Schwäche des Systems wurde deshalb als Auslöser für den Einsatz variabler Automationsgrade genutzt.

Es konnten beim Flug entlang einer Aufklärungsflugroute zwei Arten von Konflikten auftreten. Diese sind Einflug in den Bedrohungsradius einer feindlichen Einheit und Verletzung einer Luftraumordnungsmaßnahme. Durch Platzierung von feindlichen Einheiten entlang der Helikopterflugrouten konnte es in vielen Fällen zur Bedrohung der parallel verlaufenden Aufklärungsflugroute führen. Zur Lösung des Konflikts standen den Piloten zwei Möglichkeiten zur Verfügung. Zum einen wurde die Bedrohung der UAV-Flugroute durch die Vorwärtssimulationsfähigkeit des Agenten erkannt und eine entsprechende Warnung ausgegeben. Diese beinhaltete eine Schaltfläche zur Neuplanung, welche durch den Menschen ausgelöst werden konnte. Je nach Situation führte jedoch auch der neue Plan zu einer Bedrohung des UAVs, beispielsweise wenn feindliche Einheiten den Parallelflug links und rechts der Helikopterroute versperrten. Aus diesem Grund und falls der Operateur eine weitere Lösung bevorzugte, stand die manuelle Veränderung der Aufklärungsflugroute zur Verfügung. Bei Verletzungen von Luftraumordnungsmaßnahmen durch Aufklärungsflugrouten konnte lediglich deren manuelle Veränderung den Konflikt lösen, da der Agent diese Verletzung bereits als optimale Lösung berechnet hatte und ansonsten nur Alternativen mit noch höheren Kosten existierten. Dennoch wurde diese in Kauf genommene Verletzung vom Agenten als Warnung zur Anzeige gebracht, worauf der Operateur reagieren konnte.

Aufklärungsdaten

Als Anwendungsfall für den manuellen Eingriff in die Aufklärungsfähigkeiten des UAVs wurde die in Kapitel 3.4.2.5 beschriebene manuelle Gimbalsteuerung genutzt. Diese ermöglichte dem Operateur eine Übersicht über das Geschehen am Boden zu erhalten und eine direktere Kontrolle der Sensorik in Fällen, in denen die automatischen Aufklärungsfähigkeiten nicht die gewünschten Informationen erbrachten. Außerdem wurde in der Mission Rocket Raid die Anforderung eines Gefechtsschadensberichts durch die Missionsleitstelle eingebaut, was nur über eine manuelle Gimbalsteuerung und Beurteilung durch den Operateur möglich war.

5.2.1.2 Szenario und Missionen

Als Szenario wurde ein fiktiver asymmetrischer Konflikt in Afghanistan gewählt, wie er von den meisten teilnehmenden Piloten bereits im Einsatz erlebt wurde. Innerhalb dessen mussten die Versuchsteilnehmer sechs Missionen durchführen, welche in (Pyshkin, 2014) ausgearbeitet wurden. Von den sechs erstellten Missionen waren fünf als Messmission vorgesehen und eine als Abschluss des Trainings. Alle Missionen wurden im Raum Kabul in Afghanistan durchgeführt und umfassten Transportaufträge verschiedener Art mit einem unbewaffneten Transporthubschrauber und drei UAVs als Vorabauflärer. Jede der Missionen bestand aus einem initialen Auftrag. Um die Komplexität der Mission im weiteren Verlauf weiter zu steigern, wurde in der Regel eine Lageänderung bzw. eine Auftragsänderung vorgesehen. Tabelle 5-1: Übersicht Messmissionen fasst die Missionen in der Reihenfolge der Durchführung für alle Crews zusammen.

Tabelle 5-1: Übersicht Messmissionen

Mission	Missionstyp	Missionsdauer [Min.]	Lageänderungen
Special Observation	Truppentransport	40	0
Golden Hour	MedEvac	35	1
Desert Shield	Truppentransport	45	1
Rocket Raid	Truppentransport	60	2
Mosahi Convoy	Truppentransport, Bergung	40	1

5.2.2 Versuchsanordnung

Die experimentelle Untersuchung des UAV-Systems sollte in einem Hubschraubersimulator mit hohem Realismusgrad durchgeführt werden. Dazu wurde der institutseigene Hubschraubersimulator im Rahmen des Projekts CASIMUS weiterentwickelt und so erweitert, dass verschiedene Forschungsinhalte untersucht werden konnten. Dabei handelte es sich um Themen wie Assistenzsystemunterstützung für die Crew, Sensorautomation und Landezonenaufklärung durch UAVs.

5.2.2.1 Aufbau Simulator

Der zentrale Teil des Hubschraubersimulators ist ein generisches side-by-side Cockpit für zwei Piloten (siehe Abbildung 5-3).



Abbildung 5-3: Simulatorcockpit

Die Bedienelemente sind Nachbauten eines EC-135 Modells von Airbus Helicopters und die Anzeigen bestehen aus zwei 24 Zoll 16:9 Multitouchbildschirmen auf jeder Seite und zwei übereinander angeordneten 19 Zoll 4:3 Singletouchbildschirmen in der Mitte. Zusätzlich sind zwei Cockpit-Display-Units (CDU) unterhalb der Bildschirme angebracht, die weitere Eingabemöglichkeiten bieten. Die Außensicht wird auf drei Leinwände mit 2,9 m Diagonale und einem Seitenverhältnis von 4:3 projiziert. Die Leinwände sind in den vorderen drei 60° Segmenten angebracht. Abbildung 5-4 stellt den Aufbau dar. Außerdem steht für jeden Arbeitsplatz ein Kopfhörer mit Mikrofon zur Verfügung.

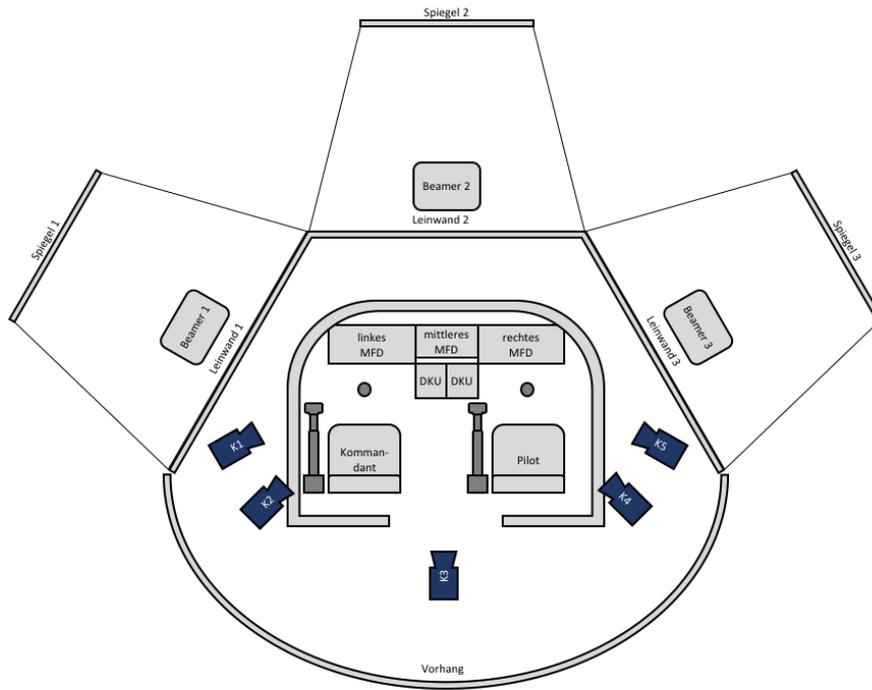


Abbildung 5-4: Aufbau Simulator

Als Experimentalsensorik waren mehrere Kameras angebracht, wovon zwei mit Sicht von hinten auf die Cockpit-Arbeitsplätze und eine zentral nach vorne ausgerichtet ist. Weitere 4 Kameras pro Arbeitsplatz dienen der Blickbewegungsmessung der Piloten. Dabei wurde das kommerzielle System Smart Eye Pro (Smart Eye AB, 2002) eingesetzt. Dieses erlaubt eine Messung des Blickstrahlaufpunkts mit einer Abweichung von weniger als 3 cm auf den Cockpit-Anzeigen und mit weniger als 20 cm auf den Außensichtleinwänden. Ersteres ist ausreichend zur Bestimmung von Schaltflächen und letzteres zur Bestimmung von Objekten in der Außensicht

5.2.2.2 Missionssimulation und Integration UAV-System

Die Komponenten im Simulator teilten sich auf in Module für die Missionssimulation, welche gemeinsam im CASIMUS entwickelt wurden und das vorgestellte UAV-System. Abbildung 5-5 zeigt die Integration der beiden Teile.

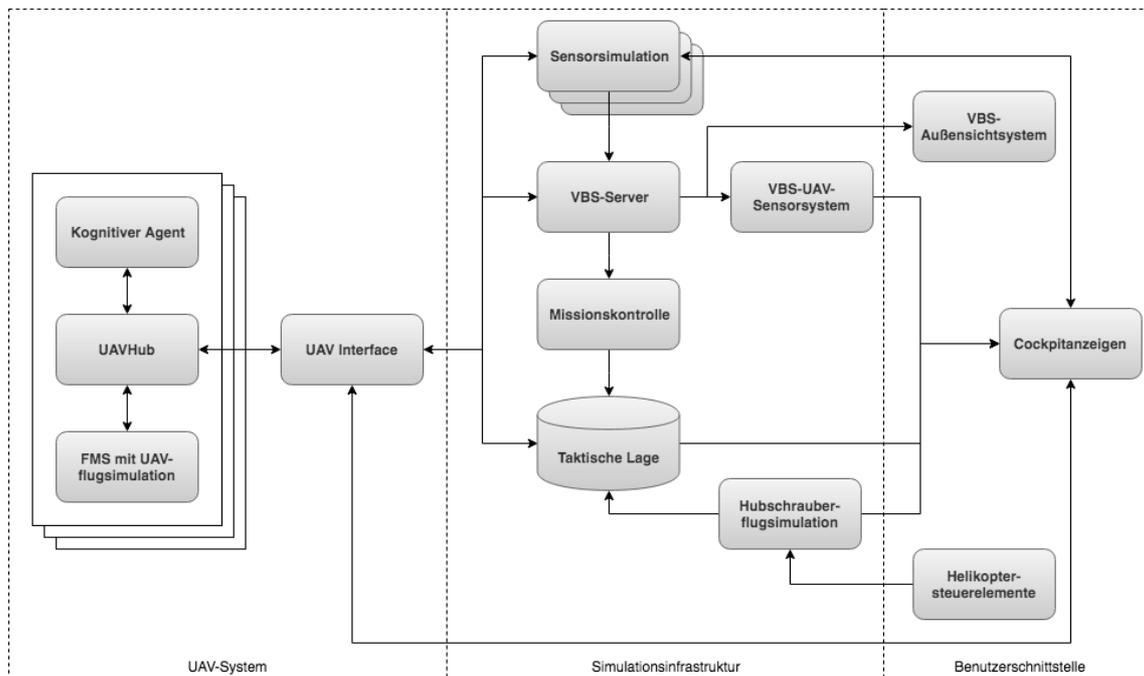


Abbildung 5-5 Integration des UAV-Systems in die Simulatorarchitektur

Für jedes UAV wurde eine eigene Instanz des **kognitiven Agenten** eingesetzt. Diese war jeweils über das **UAVHub** mit dem eigenen **Flugmanagementsystem (FMS)** und der daran angeschlossenen Flugdynamiksimulation verbunden. Alle UAVs kommunizierten über das **UAV Interface** gebündelt mit dem Simulator.

Zentraler Speicher für Position und Status aller Missionselemente war die Datenbank **Taktische Lage**. Die Flugdynamiksimulationen von Hubschrauber und UAVs stellten hier stets ihre aktuelle Position zur Verfügung. Die **Flugdynamiksimulation des Hubschraubers** wurde über die **Steuerungselemente** des Cockpits gesteuert und leitete zusätzlich Positions- und Lagedaten an die **Außensichtdarstellung** in VBS weiter. Diese synchronisierte sich über den zentralen **VBS-Server** mit den Sensordarstellungen und UAV-Positionen, so dass stets ein einheitliches Bild über die Positionen aller Luftfahrzeuge des Schwarms für die Crew in der Außensicht vorlag. Der VBS-Server simulierte außerdem die Bewegung der Missionselemente, wie anderer Luftfahrzeuge, feindlicher, befreundeter und neutraler Einheiten und speiste diese wiederum in die taktische Lage über die **Missionskontrollkonsole** ein. In diesem Modul konnte ein Experimentator die Weiterleitung von Informationen zu bestimmten Elementen blockieren oder freigeben, um beispielsweise Einheiten in der taktischen Lage erscheinen zu lassen. Außerdem steuerte die Missionskontrollkonsole das Laden und Starten der Missionen im VBS-Server. Die vorher vorgestellte Sensorverwaltung wurde durch eine **Sensorsimulation** nach (Ruf & Stütz, 2017) mit ähnlichem Funktionsumfang ersetzt, welche an das **VBS-UAV-Sensorsystem** angepasst war. Teil der **Cockpitanzeigen** war die vorgestellte Benutzeroberfläche zur Bedienung der UAVs. Eingaben des Operators, sowie Statusinformationen des UAV-Systems wurden über das UAVInterface weitergeleitet. Für die manuelle Bedienung der Sensoren wurden die Operateureingaben direkt an die Sensorsimulation weitergeleitet.

5.2.3 Versuchsdurchführung

Die Versuche wurden mit erfahrenen Hubschrauberpiloten der Bundeswehr durchgeführt. Diese erhielten ein ausführliches Training und absolvierten anschließend fünf Messmissionen. Nach jeder Mission fand eine Nachbesprechung mit Befragung statt.

5.2.3.1 Versuchsteilnehmer

Die Versuchsteilnehmer waren Hubschrauberpiloten der Bundeswehr, die teilweise noch aktiv größtenteils jedoch bereits aus dem aktiven Dienst ausgeschieden waren. Die Teilstreitkräfte Heer, Marine und Luftwaffe waren vertreten. Jeweils 2 Piloten bildeten eine Crew, bestehend aus Kommandanten und fliegendem Pilot. Tabelle 5-2 zeigt die Kenndaten der einzelnen Piloten und die Crewzugehörigkeit.

Tabelle 5-2: Einteilung der Versuchspersonen

Crew	Rolle	VP#	Alter	Flugstunden	Teilstreitkraft	aktiv
1	Kommandant	VP1	52	4500	Heer	nein
1	Pilot	VP2	31	535	Marine	ja
2	Kommandant	VP3	59	4920	Luftwaffe	nein
2	Pilot	VP4	58	6850	Luftwaffe	nein
3	Kommandant	VP5	45	2930	Heer	ja
3	Pilot	VP1	52	4500	Heer	nein
4	Kommandant	VP6	50	3400	Heer	nein
4	Pilot	VP7	58	4400	Marine	nein

Es handelte sich überwiegend um sehr erfahrene Piloten mit im Mittel 3933 Stunden an Einsatzerfahrung und einem Altersdurchschnitt von 51 Jahren. Versuchsperson 1 belegte in Crew 1 die Rolle als Kommandant und in Crew 3 die Rolle als Pilot. Um das Ergebnis nicht durch Wissen über den Ablauf der Missionen zu verfälschen wurde sie angewiesen diese Informationen nicht weiterzugeben. Crew 1 und Crew 4 kannten sich persönlich nicht, während Crew 2 und Crew 3 bereits gemeinsam geflogen waren.

5.2.3.2 Versuchsablauf

Die Versuchskampagne fand in insgesamt vier Wochen statt, welche auf einen Zeitraum von zwei Monaten verteilt waren. Abbildung 5-6 zeigt den Ablauf einer Versuchswoche.

Es fanden insgesamt fünf Messmissionen statt welche sich in Missionsvorbereitung (Briefing), Missionsdurchführung (Flug) und Missionsnachbesprechung (Debriefing) mit integrierter Auswertung unterteilten.

Die einzelnen Abschnitte werden im Folgenden näher beschrieben.

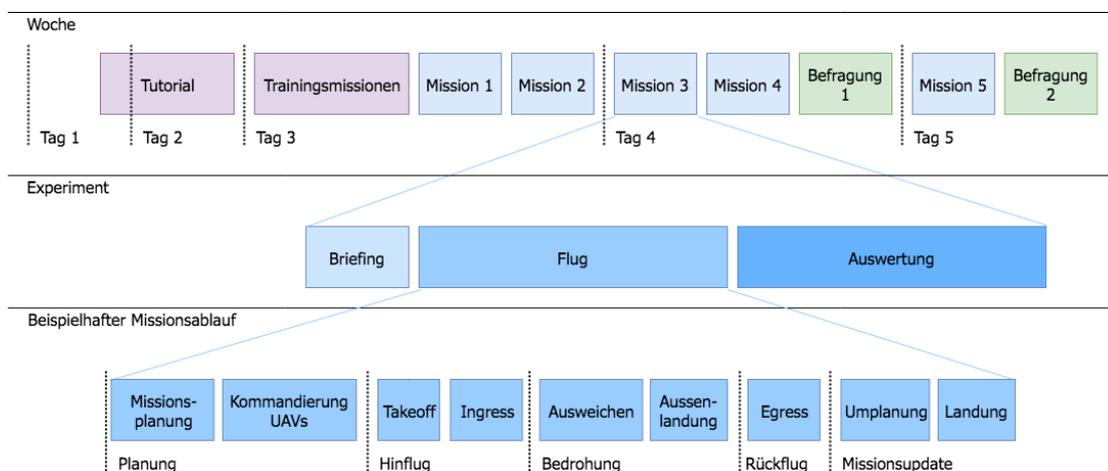


Abbildung 5-6: Ablauf Experiment

5.2.3.2.1 Tutorial

In eineinhalb Tagen wurde beiden Piloten der Umgang mit dem System in einem Tutorial vermittelt. Dabei bildete die Ausbildung an der UAV-Bedienung nur einen Teil des Trainings, während die Benutzung für andere Forschungsinhalte, wie beispielsweise das Assistenzsystem, ebenfalls ausgebildet wurde. Da es sich bei den Versuchsteilnehmern um erfahrene Hubschrauberpiloten handelte, konnten die Grundlagen der Cockpitbedienung relativ knapp behandelt werden. Der Fokus lag somit auf der Bedienung der UAVs, der Sensorik und dem Umgang mit dem Assistenzsystem. Tabelle 5-3 zeigt die Abschnitte des Tutorials.

Tabelle 5-3: Trainingsabschnitte

Kapitel	Dauer	Inhalt
Helikopter	2h	Helikoptersteuerelemente, Anzeigen und Funk
UAV- Flugführung	2h	UAV-Steuerelemente, Anzeigen und Agentenverhalten
UAV-Sensorik	2h	Sensorik, Bedienung und automatische Auswertefunktionen
Assistenzsystem	2h	Grundlagen Assistenzsystem und Anzeigen
Trainingsmission	1h	Umsetzung des erlernten Wissens mit Unterstützung bei Bedarf

Die Trainingsinhalte wurden didaktisch sinnvoll von einfach zu komplex gestaltet. Demnach wurden zuerst die Grundfertigkeiten, wie beispielsweise der Aufklärungsauftrag des UAVs, vermittelt und anschließend Feinheiten, wie die manuelle Routenmanipulation während eines solchen Auftrags. Außerdem wurde bei der Erstellung des Plans auf Auflockerungen der Lernphasen durch Flüge mit dem Simulator und auf ausreichende Pausen zwischen den Kapiteln geachtet. Im Anschluss an jeden Abschnitt erfolgte ein Flug in einer Testmission nach deren Abschluss der die Versuchsteilnehmer die Möglichkeit hatten letzte Unklarheiten durch Erklärungen des Personals beseitigen zu lassen.

5.2.3.2.2 Briefing und Missionsdurchführung

Die Missionsvorbereitung wurde in Form einer Präsentation mit Zwischenfragen gehalten. Dabei wurde nach militärischem Vorbild auf die momentane Lage, mögliche Bedrohungen, den Auftrag und die Durchführung eingegangen. Zusätzlich wurden ein Wetterbericht und notwendige Flugfunkfrequenzen vorgestellt. Das Briefing diente der Einführung in die Mission und der Vermittlung der Ziele und des gewünschten Ablaufs und zusätzlich der Steigerung der Immersion, da eine Vorbereitung bei realen militärischen Hubschraubereinsätzen unverzichtbar ist.

Während des Fluges wurde das Cockpit durch einen Vorhang vom Labor getrennt, um Störungen des Präsenzepfindens zu vermeiden. Durch eine Sprechfunkgegenstelle wurden der Flugfunk und der Kontakt mit Bodentruppen simuliert. Über diesen Kanal wurden auch Anweisungen der Experimentatoren an die Crew weitergegeben. Außerdem befanden sich zwei Beobachter hinter dem Cockpit. Deren Aufgabe war die detaillierte Aufzeichnung des Pilotenverhaltens und der Kommunikation untereinander.

5.2.3.2.3 Debriefing und Befragungen

Im Anschluss an jede Mission wurden beide Piloten zuerst gemeinsam über den Gesamteindruck und allgemeine Missionseigenschaften und anschließend einzeln zu spezifischen Situationen innerhalb der Mission befragt. Im Rahmen dieser Arbeit wurden dabei vor allem drei Situationstypen untersucht. Behandelt wurden Situationen in denen der

Kommandant variable Automationsgrade einsetzte, Warnungen, die das UAV-System einblendete, und Fehler im UAV-System, die während der Mission auftraten.

5.2.4 Auswertung

In diesem Kapitel sollen die Ergebnisse der explorativen Untersuchung im Hinblick auf die Validierung des Gesamtsystems und der Experimentalumgebung, sowie auf die Missionsleistung des MUM-T Verbunds und deren Ursachen im System- und Nutzerverhalten vorgestellt werden. Ein besonderer Fokus liegt auf der Analyse des Einsatzes von variablen Automationsgraden und deren Nutzen und Bewertung.

5.2.4.1 Validierung des Gesamtsystems und Experimentalumgebung

Für die Validierung der weiteren Ergebnisse müssen zuerst das Gesamtsystem und die Experimentalumgebung selbst validiert werden. Dazu soll zuerst die prinzipielle Funktionsfähigkeit des UAV-Systems sichergestellt werden. Für die Bewertung der Experimentalumgebung hinsichtlich Realismusgrad von Simulation, Cockpit und Missionsdesign wird die Umsetzbarkeit innerhalb der geplanten Missionszeit und auf Fragebögen an die Versuchsteilnehmer zurückgegriffen.

5.2.4.1.1 Funktionsfähigkeit des UAV-Systems

Die Gesamtflugzeit betrug 18,3 Stunden, in der auch das UAV-System aktiv war. Während der gesamten Zeit überführte das UAV-System alle Aufträge zuverlässig in durchführbare Pläne und führte diese aus. Bei der Umsetzung komplexer Aufträge gab es einige Fälle von langen Planungszeiten, jedoch keine so schwerwiegenden Abweichungen, dass die Mission nicht hätte fortgesetzt werden können. Diese werden im Abschnitt Systemverhalten genauer beschrieben. Auch alle manuellen Eingriffe in tiefere Automationsebenen durch die Kommandanten wurden wie spezifiziert umgesetzt. Das UAV-System kann somit als geeignet für die explorative Untersuchung von variablen Automationsgraden in MUM-T Konfigurationen angesehen werden.

5.2.4.1.2 Missionszeiten

Die Missionen wurden von (Pyshkin, 2014) anhand von Vorschriften zu militärischen Hubschraubereinsätzen ausgelegt. Große Abweichungen von den Auslegungsdauern der Missionen können Hinweise auf Probleme der Crews bei der Durchführung darstellen, was wiederum zu Beeinträchtigungen der Messdaten führen könnte. Abbildung 5-7 zeigt die Missionszeiten nach Crew und Mission.

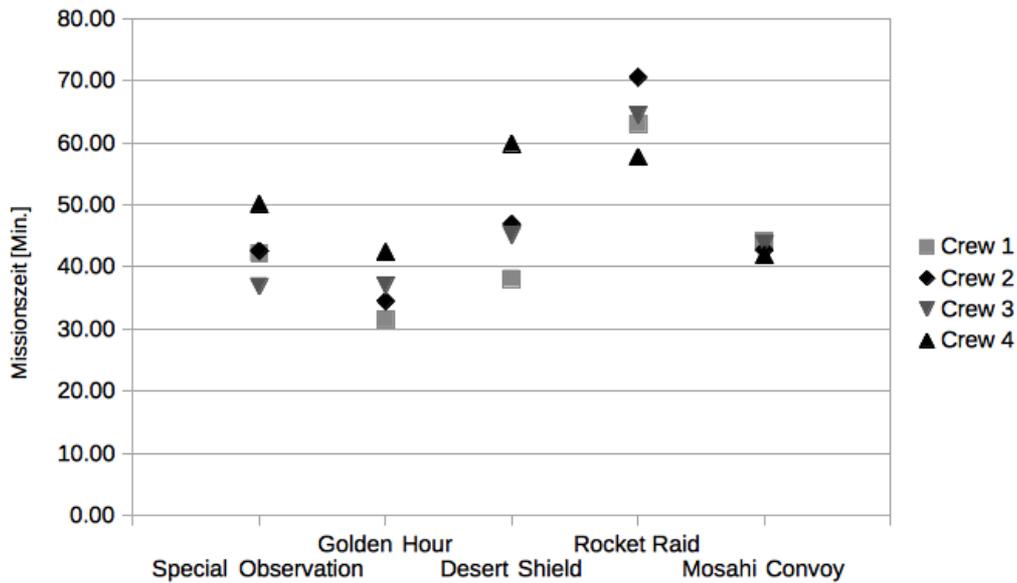


Abbildung 5-7: Missionszeiten in Minuten

Hier zeigen sich Unterschiede zwischen den Crews. Die Abweichungen vom Mittelwert erreichten jedoch nicht mehr als 19%, was in Anbetracht der möglichen unterschiedlichen Vorgehensweisen und Flugrouten in den einzelnen Missionen keine Überraschung darstellt und so auch in der Auslegung vorgesehen war.

5.2.4.1.3 Bewertung der Experimentalumgebung

Alle Crews stufte sowohl die Szenarien, als auch die Missionen als realitätsnah ein (siehe Abbildung 5-8). Die Simulation des Helikopters und der UAVs wurde als etwas weniger realistisch, jedoch ausreichend für den Zweck der Studie eingeschätzt. Im anschließenden Gespräch stellte sich heraus, dass hierbei vor allem die Visualisierung bewertet wurde. Diese sei zwar wirklichkeitsgetreuer als viele Trainingssimulatoren, könne jedoch noch deutlich als computergeneriert erkannt werden. Die Physiksimulation des Hubschraubers und der UAVs wurde als sehr realistisch eingestuft.

	Sehr unrealistisch			Sehr realistisch		
Szenario				○○○○	○○○	○
Missionsablauf			○○	○○	○○○○	
Simulation		○	○	○○○	○○○	

Abbildung 5-8: Realismuseinschätzung durch Piloten

Das Missionsbriefing, als wichtiger Teil des Missionsgeschehen und Treiber für die Immersion wurde als geeignet, ausreichend, vollständig und zweckmäßig bewertet (siehe Abbildung 5-9). Dies drückte sich auch in der lebhaften Teilnahme der Crews an den Briefings und den Zwischenfragen aus, in denen missionsrelevante Details geklärt wurden. Alle Crews schrieben unaufgefordert wichtige Punkte auf und nahmen die Aufzeichnung zur Orientierung ins Cockpit mit.

Briefing							
ungeeignet					○○○ ○○○	○○	geeignet
zu lang		○○	○○○ ○○○				zu kurz
Enthaltene Informationen							
unvollständig		○		○○○	○○○	○	vollständig
unzweckmäßig				○○○	○○○ ○	○	zweckmäßig

Abbildung 5-9: Bewertung Briefing

Die Fragen waren Teil der Gesamtfragebögen nach Durchführung aller Missionen und sind im Anhang enthalten.

5.2.4.2 Missionsleistung

In diesem Abschnitt soll die Missionsleistung für den Umfang dieser Experimente definiert werden. Sie setzt sich aus der Aufklärungsleistung und Negativleistungen zusammen. Diese werden jeweils einzeln in Unterkapiteln behandelt.

5.2.4.2.1 Leistungsdefinition

Die Missionsleistung setzt sich aus der erreichten Positivleistung und der dabei aufgetretenen Negativleistung zusammen. Die Positivleistung ist in diesem Fall das Erreichen des Missionsziels. Dieses besteht in den beschriebenen Missionen aus dem sicheren Flug des Hubschraubers zu den vorgegebenen Zielen. Dieses Ziel wurde von allen Crews erreicht. Um nun die Anteile des Systems an der Missionsleistung zu ermitteln wird folgende Annahme getroffen. Der Hauptvorteil einer MUM-T Konfiguration mit passiven Sensoren, wie sie hier eingesetzt wird, ist es, einen sicheren Flug für den bemannten Hubschrauber zu gewährleisten. Dabei wird davon ausgegangen, dass ein Flug über aufgeklärtem Gebiet sicherer ist als über nicht aufgeklärtem. Demnach ist die Aufklärungsleistung das zentrale Leistungsmerkmal des Gesamtsystems. Bestimmte Verhaltensweisen gefährden das Ziel des sicheren Flugs. Dazu zählen Verletzungen der Luftraumordnungsmaßnahmen, sowohl durch Hubschrauber, als auch durch UAVs und der Aufenthalt im feindlichen Bedrohungsradius. Die Missionsleistung wird im Folgenden demnach als die Aufklärungsleistung des MUM-T-Verbandes abzüglich der Gefährdungen definiert. Auf die Ursachen für die jeweiligen Leistungswerte wird im nächsten Kapitel eingegangen.

5.2.4.2.2 Aufklärungsleistung

Die Aufklärungsleistung setzt sich dabei aus den Bereichen aufgeklärte Fläche, aufgeklärter Anteil Flugstrecke, Flugzeit über aufgeklärtem Gebiet und Anteil aufgeklärter Objekte zusammen. Diese Anteile wurden gewählt, weil sie einerseits missionsrelevant sind und andererseits die Kernfunktionen des untersuchten Systems darstellen.

Aufgeklärte Fläche:

In Abbildung 5-10 ist die durch UAVs aufgeklärte Fläche der Crews über die Mission aufgetragen.

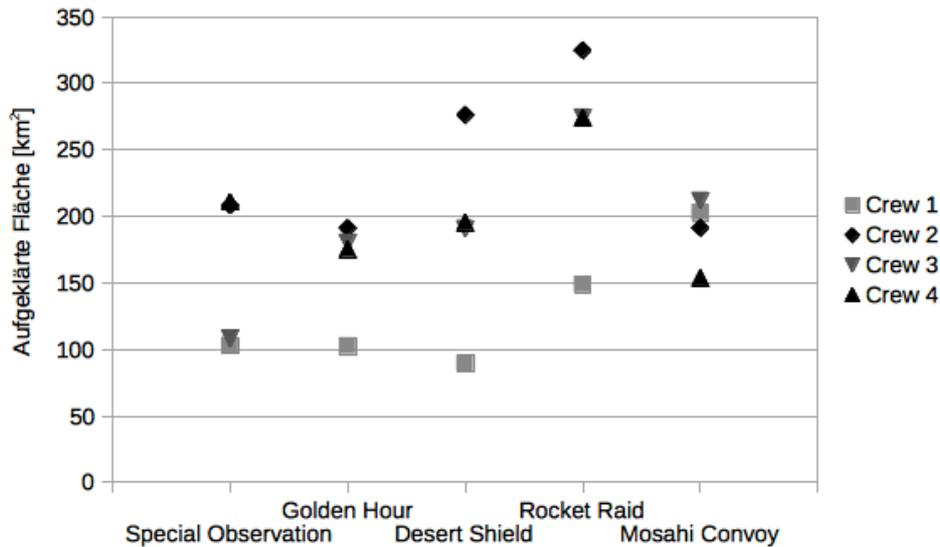


Abbildung 5-10: Aufgeklärte Fläche

Die Werte schwanken mit einem Minimalwert von 80 km² und einem Maximalwert von 275 km² sehr stark über die einzelnen Messungen. Der hohe Maximalwert von Crew 2 ist durch die spezielle Verwendung der UAVs in der Mission Rocket Raid zu erklären. Hier entschied sich der Kommandant manuelle Routen in Streifen über das Gebiet zu legen und diese aufklären zu lassen, um ein besseres Lagebild zu bekommen. Dieses Verhalten wurde durch die lange Flugzeit in dieser Mission ermöglicht. Auch in den anderen Missionen ist die Streuung zwischen den Crews ist deutlich zu erkennen. Dies deutet auf eine unterschiedliche Verwendung der UAVs hin und wird weiter unten aufgegriffen.

Anteil Flugzeit des Helikopters über aufgeklärtem Gebiet:

Zur Ermittlung der Flugzeit in aufgeklärtem Gebiet wurde die Mission nachträglich in Zeitabschnitte mit einer Sekunde Länge unterteilt. Im Anschluss wurde die Anzahl der Zeitabschnitte in der sich der Hubschrauber im aufgeklärten Gebiet befand durch die Gesamtzahl an Zeitschritten dividiert.

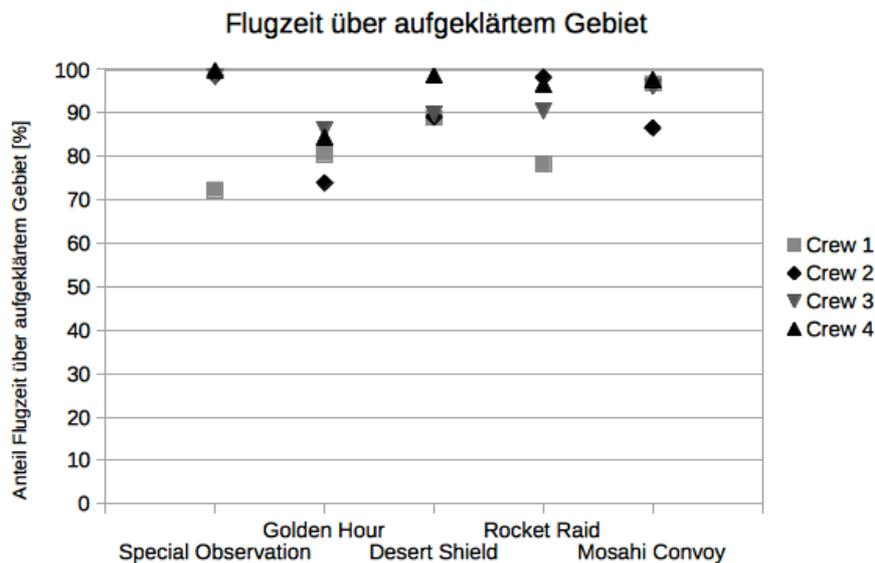


Abbildung 5-11: Anteil Flugzeit über aufgeklärtem Gebiet

Abbildung 5-11 stellt den prozentualen Anteil des Fluges über aufgeklärtem Gebiet nach Zeit und Strecke dar. Dabei wurden Flugstrecken außerhalb der HOA nicht berücksichtigt, da diese als bedrohungsfrei gelten. Das aufgeklärte Gebiet setzt sich aus aufgeklärten Flugrouten und aus aufgeklärten Landezonen zusammen. Im Durchschnitt befand sich der Hubschrauber 90% der Zeit und Strecke über aufgeklärtem Gebiet. Da alle darin liegenden Bedrohungen von den UAVs aufgedeckt werden, kann es als sicher angenommen werden. Kein Flug befand sich weniger als 70% der Zeit über aufgeklärtem Gebiet. Insgesamt kann also eine große Verbesserung gegenüber herkömmlichen Systemen festgehalten werden kann, in denen der größte Teil des Fluges über nichtaufgeklärtem Gebiet stattfindet.

Bei der Mission Golden Hour ist ein Trend nach unten zu erkennen. Dabei handelt es sich um ein Szenario in welchem der schnellstmögliche Abschluss der Mission höchste Priorität hatte, wie auch an den relativ kurzen Zeiten in Abbildung 5-7 erkennbar ist. Hierauf ist der schlechtere Wert beim Flug über aufgeklärtem Gebiet zurückzuführen, da sich alle Crews im Zweifel für einen kürzeren noch nicht aufgeklärten Weg oder gegen das Warten auf Abschluss der Aufklärung entschieden. Dies wurde im Gespräch nach der Mission von allen Crews auch so erklärt.

Aufgeklärte Objekte:

Die Aufklärungsleistung sollte neben der aufgeklärten Fläche auch die Aufklärungsqualität beinhalten. Die Auswertung der übermittelten Bilder, sei es vollautomatisiert oder durch Unterstützung des menschlichen Auswerteprozesses, ist jedoch nicht Teil dieser Arbeit, weshalb nur die Detektion, also das Erscheinen des Objekts im Videomaterial, herangezogen wurde und nicht die durch nachlaufende Prozesse vorgenommene Klassifizierung. Dies ermöglicht es die Untersuchung auf die Positionierung der UAVs und die Sensorsteuerung zu beschränken, was genau dem Einflussbereich der Kombination aus Operateur und Agent in dieser Implementierung entspricht. Als Qualitätsmaß der Aufklärung wurde deshalb der Quotient zwischen entdeckten und platzierten Objekten gewählt. Somit entspricht ein Wert von 1 dem Fall, dass alle vorhandenen Objekte erfasst wurden, was nachgelagerten Klassifizierungsalgorithmen die Detektion aller feindlichen Einheiten erst ermöglicht. Bei Werten unter 1 steigt die Wahrscheinlichkeit der Bedrohung des Hubschraubers durch unentdeckte feindliche Einheiten.

Die aufzuklärenden Objekte waren in den Missionen stets entlang der Haupt- und Sekundärflugrouten platziert. Dadurch konnte eine Vergleichbarkeit zwischen den Crews hergestellt werden. Bei Aufklärung aller Flugrouten hätten alle existierenden Objekte entdeckt werden können und somit eine Detektionsrate von 100% erreicht werden können. In allen Flügen wurden sämtliche Objekte entlang der Hauptroute gefunden. Die Detektionsrate auf der Hauptroute erreichte demnach 100% und zeigt die Leistung des Zusammenwirkens zwischen Mensch und Maschine.

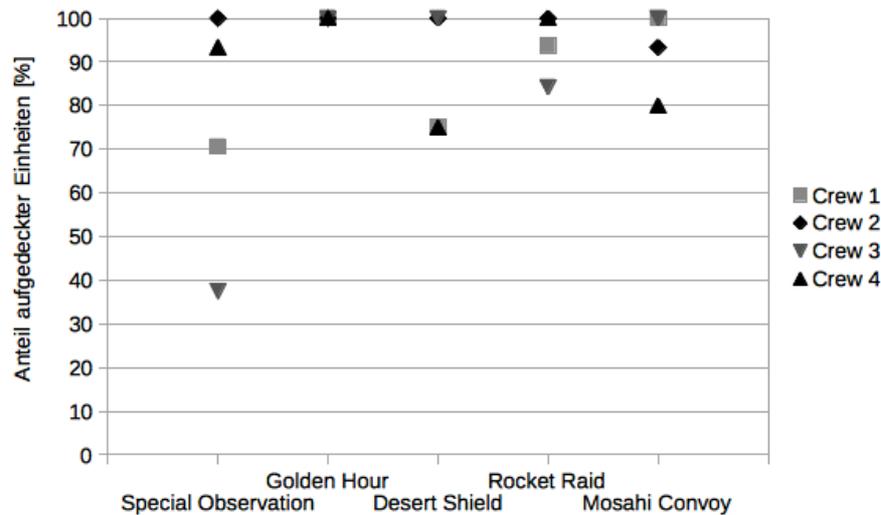


Abbildung 5-12: Detektionsrate

In Abbildung 5-12 ist die Detektionsrate, also das Verhältnis zwischen allen aufgeklärten und platzierten Objekten, zu sehen. Diese beträgt stets mehr als 70%, abgesehen von einem Wert von 37,5%, welcher bei Crew 3 in der Mission Special Observation, also der ersten absolvierte Mission, auftrat. Hier wurden Alternativrouten nicht vollständig aufgeklärt, was auf die Unerfahrenheit mit der Vorgehensweise zurückzuführen ist. Auch der zweittiefste Wert von 71% ist auf diese erste Mission zurückzuführen.

5.2.4.2.3 Verletzung von Einsatzregeln

Die Missionsleistung wird durch die Verletzung von Einsatzregeln reduziert, welche in diesem Abschnitt beschrieben werden. Diese Negativleistung setzt sich aus den Anteilen Bedrohung des Hubschraubers, Bedrohung der UAVs und Verletzung von Luftraumordnungsmaßnahmen zusammen.

Bedrohung des Hubschraubers:

Der Hubschrauber wird als bedroht angenommen, wenn er sich innerhalb der Waffenreichweite einer feindlichen Einheit befindet. In den geflogenen Missionen war dies lediglich ein einziges Mal aufgrund einer Verkettung unglücklicher Umstände der Fall. In der Mission Golden Hour wurde, wie der Missionsbeschreibung zu entnehmen ist, die Landezone durch eigene Truppen gesichert. Für eine größere Immersionswirkung sollten sich diese nach Abflug des Hubschraubers entfernen. Außerdem waren simulierte feindliche Einheiten in der Nähe der Landezone positioniert. Bei der ersten Durchführung der Mission durch Crew 1 wurde nach der erfolgreichen Landung des Helikopters und der Aufnahme der Verletzten, aufgrund eines Programmierfehlers in einem Skript, der Start des Helikopters fälschlicherweise zu früh detektiert, weshalb die eigenen Truppen die Sicherung der Landezone zu früh beendeten und sich zurückzogen. Dadurch konnten die motorisierten feindliche Truppen sich auf den Helikopter zubewegen und in Bedrohungsreichweite gelangen, so dass dieser sich für insgesamt 35 Sekunden im bedrohten Bereich aufhielt. Ansonsten hatte der Vorfall keine weiteren Auswirkungen auf das Experiment. Außerdem zeigte sich ein dadurch ein Vorteil der Nutzung einer MUM-T Konfiguration. Der Kommandant wurde über die Annäherung feindlicher Einheiten sofort automatisch informiert, da er zuvor ein UAV zur Überwachung eingesetzt hatte.

Bedrohung der UAVs:

Insgesamt hielten sich die UAVs in 34 Fällen mit einer Gesamtdauer von 243 Sekunden in bedrohtem Gebiet auf. Dies entspricht einem Anteil an der Gesamtmissionszeit von 0,43%. Geht man von einer Gleichverteilung auf alle drei UAVs aus entspricht das einer Bedrohungszeit von weniger als 0,15% pro UAV oder weniger als 1,35 Minuten bei einer Gesamteinsatzzeit von 15,6 Stunden. Zieht man zusätzlich in Betracht, dass feindliche Einheiten absichtlich auf den aufzuklärenden Routen positioniert wurden, und dadurch in nahezu jeder Mission mehrere Bedrohungen hätten auftreten müssen, ist dies ein sehr niedriger Wert.

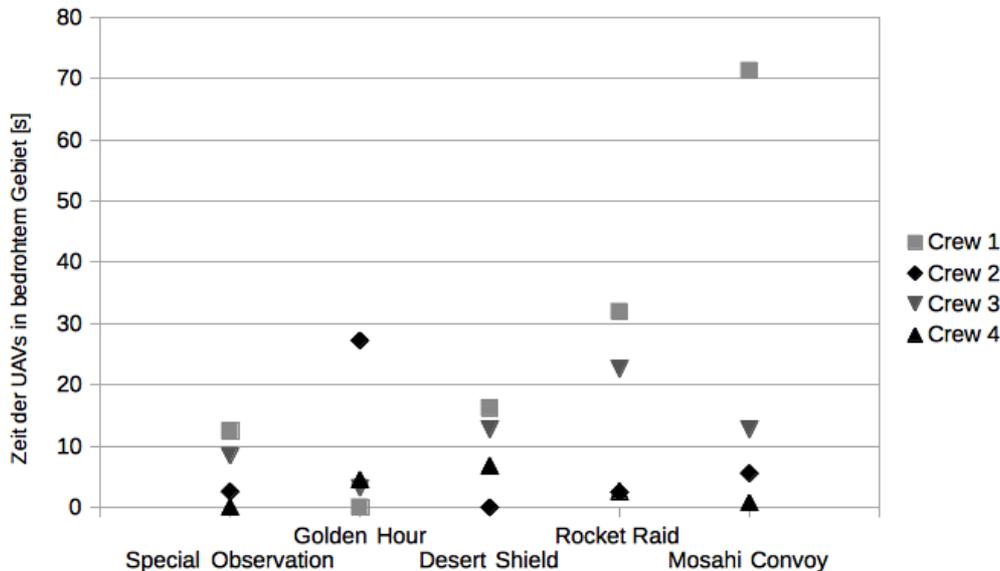


Abbildung 5-13: Zeit UAV in Bedrohung

Abbildung 5-13 zeigt die Summe der Zeit der UAVs in feindlicher Bedrohung nach Crew und Missionen aufgeschlüsselt. Crew 1 und Crew 3 erreichen tendenziell höhere Werte.

Die UAVs wurden den größten Teil der Zeit zur Vorabklärung auf nicht vorher aufgeklärtem Gebiet eingesetzt. Bei der Planung der Flugrouten wurden bereits entdeckte Bedrohung, soweit es möglich war, vom Agenten umflogen. Ein häufiger Fall war jedoch das Aufdecken einer feindlichen Einheit unmittelbar während der Aufklärung einer Fläche. In diesem Fall zeigte das UAV-System eine Warnung mit einem Vorschlag zur Umplanung an. Somit konnte der Kommandant entscheiden, ob die Fortführung des Auftrags und die damit verbundenen Bedrohung des UAVs in dieser Situation hilfreicher für den Ausgang der Mission war als eine Umplanung. Die Entscheidung zum Verbleib des UAVs in Bedrohung wurde von Crew 1 fünfmal, von Crew 2 zweimal und von Crew 3 dreimal getroffen. Der Beitrag dieser Entscheidungen zur Bedrohungszeit war mit 165 Sekunden am größten. Der restliche Beitrag von 98 Sekunden entstand aus den Zeitspannen bis zur Entscheidung den Agenten die Umplanung vornehmen zu lassen, welche im Durchschnitt nach 4 Sekunden getroffen wurde. Crew 4 gab auf die Befragung zur Vorgehensweise keine längere Bedrohung für die UAVs zuzulassen den Schutz der Ausrüstung als Grund. Demnach sind hier deutliche Unterschiede in der Bedienung und Handlungsweise zwischen den Crews zu sehen.

Verletzung von Luftraumordnungsmaßnahmen:

Grundsätzlich gab es in den Missionen zwei Ursachen für die Verletzung von Luftraumordnungsmaßnahmen. Das Überfliegen von Luftraumgrenzen, also der HOA und

HOB, und das Missachten von Anweisungen der Flugsicherung, also der Anwendungsfall des Operation House.

Insgesamt gab es 4 Vorkommnisse, bei denen Luftraumgrenzen unerlaubt von einem UAV überschritten wurden. Bei einem davon handelte es sich um zwei Überflüge der gleichen Grenze in Hin- und Rückrichtung, so dass der Luftraum nur kurz verletzt wurde. Alle Fälle traten beim Durchführen eines Aufklärungsauftrags in unterschiedlichen Missionen und bei verschiedenen Crews auf. Davon sind drei auf eine ungünstige Aufklärungsroutenplanung zurückzuführen. Einer trat bei der Aufklärung einer manuell eingetragenen Flugroute auf, welche ihrerseits eine Luftraumgrenze verletzte. Diese Verletzung wurde durch den Nutzer vorgegeben und zeigt die Möglichkeit eines Systems mit variablem Automationsgrad in taktisch sinnvollen Situationen vorgegebene Bestimmungen auszusetzen. Von den in allen Missionen eingespielten kurzfristigen Anweisungen der Flugsicherung ein bestimmtes Gebiet zu umfliegen wurden 3 missachtet. Die Fälle traten in unterschiedlichen Missionen bei verschiedenen Crews auf. Davon können zwei auf die späte Reaktion des Bedieners zurückgeführt werden. In einem Fall wurde die Anweisung ignoriert, da der Bediener einer anderen Aufgabe nachging. Insgesamt sind 7 Verletzungen von Luftraumordnungsmaßnahmen aufgetreten. Dies ist eine sehr niedrige Zahl in den hier durchgeführten dynamischen und komplexen Missionen und zeigt die Leistungsfähigkeit des Gesamtsystems.

5.2.4.3 Nutzerbewertungen

Neben den objektiven Bewertungen wurden subjektive Eindrücke der Crew erfasst. Nach jeder Mission wurde ein Fragebogen zur Bewertung der UAV-Führung und zu aufgetretenen Situationen ausgefüllt. Außerdem bewerteten die Teilnehmer ihre subjektive Workload im Anschluss an alle Missionen, um Unterschiede in der Belastung festzustellen. In Situationsfragebögen wurde nach den Beweggründen für das eigene Verhalten und die Bewertung der Unterstützung durch das System in den Situationen mit manuellen Eingriffen, Warnungen und Automationsfehlern gefragt. Nach Abschluss aller Missionen wurden die Piloten gebeten Fragebögen zum Gesamtsystem zu beantworten. Diese beinhalteten vor allem eine Gesamtbewertung des UAV-Systems und die Beurteilung der Benutzerschnittstelle. Alle Fragebögen sind im Anhang abgebildet.

5.2.4.3.1 Schwierigkeitsgrad der Missionen

Die subjektive Bewertung der Arbeitsbelastung erfolgte mithilfe des NASA-TLX Fragebogens (NASA, 1986) im Anschluss an jede Mission. Demnach handelt es sich bei dem Ergebnis um die durchschnittliche Workload über den gesamten Verlauf der Mission. Diese Erfassung sollte die Vergleichbarkeit der Missionen untereinander bestätigen. Abbildung 5-14 zeigt die Ergebnisse für die Kommandanten, da bei dieser Betrachtung die Bedienung der UAVs im Vordergrund stehen soll.

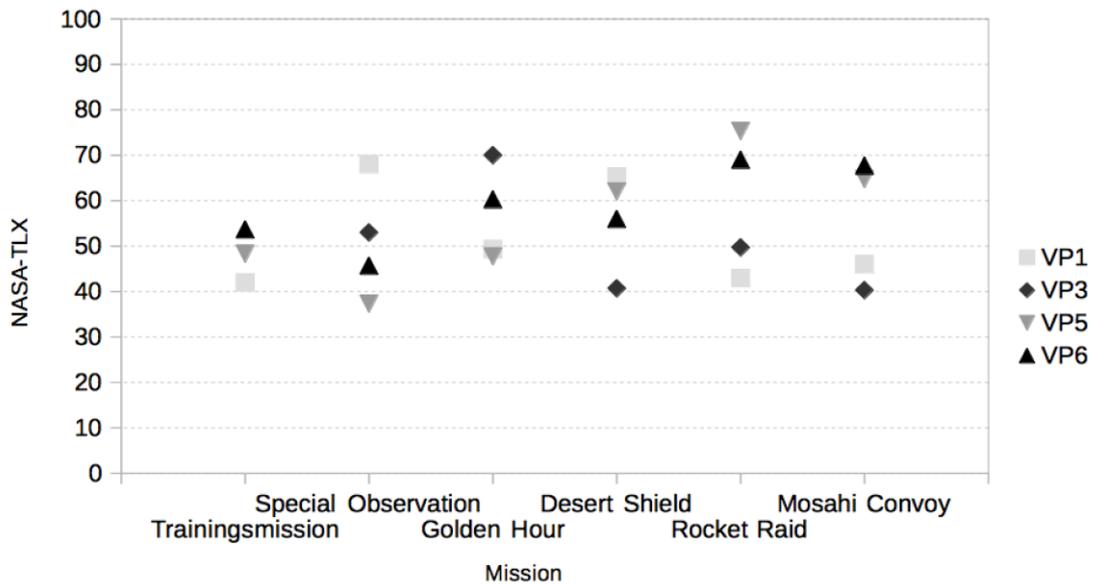


Abbildung 5-14: NASA-TLX Bewertung der Kommandanten

Die subjektive Belastung der Kommandanten war in allen Missionen vergleichbar. Der Wert des NASA-TLX bewegte sich für die einzelnen Missionen zwischen 37% und 75%. Die Schwierigkeit der Missionen wurde somit von allen Versuchspersonen in den mittleren Bereich eingeordnet. Es ist zu erkennen, dass die TLX-Werte nicht mit der Flugerfahrung korrelieren. Dies deutet auf ein neuartiges Einsatzspektrum der hier geflogenen Missionen hin, in dem es wiederum Erfahrung zu sammeln gilt.

5.2.4.3.2 Systemeignung für den Einsatz

Die Erfassung der Systemeignung für den Einsatz wurde durch mehrere Messgrößen operationalisiert. Der subjektive Eindruck der Kommandanten wurde mithilfe eines Fragebogens mit einem modifizierten Cooper-Harper-Rating nach (Cotting, 2011) ermittelt (siehe Abbildung 5-15).

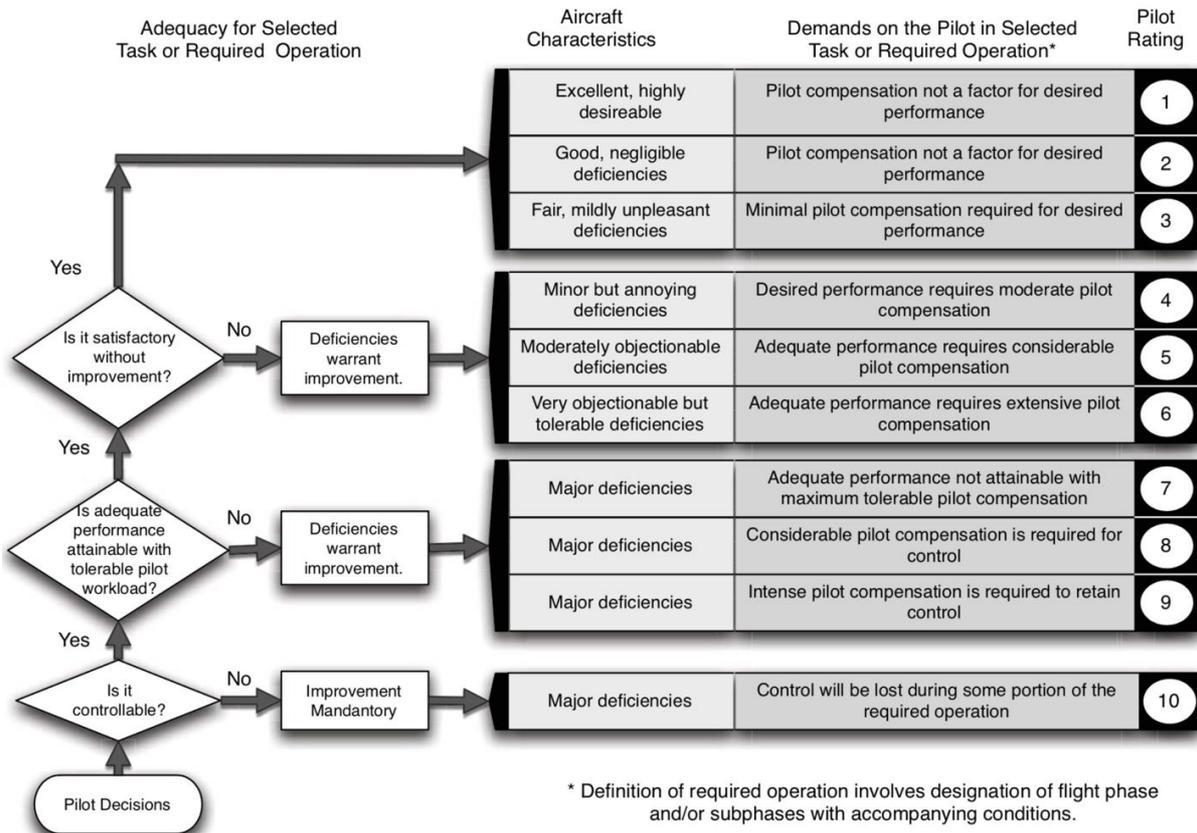


Abbildung 5-15: Modifiziertes Cooper-Harper-Rating nach (Cotting, 2011)

Die dafür notwendige Definition der adäquaten Missionsleistung wurde als “in der Lage die gegebenen Aufträge umzusetzen und die erwarteten Aufklärungsergebnisse zu erzielen” festgelegt. Die Störungseinflüsse wurden als “Unter Berücksichtigung des Terrains, der Luftraumstrukturen und der taktischen Elemente, sowie der zeitlichen Anforderungen des MUM-T Verbundes” festgelegt.

Die Kommandanten wurden nach jeder Mission gebeten das modifizierte Cooper-Harper-Rating für die Bereiche UAV-Flugführung, UAV-Sensorik, sowie für das UAV-Gesamtsystem auszufüllen. Zur zusätzlichen Kontrolle wurde der gleiche Fragebogen am Ende der Versuchswoche vorgelegt und die Teilnehmer sollten ihren Gesamteindruck angeben.

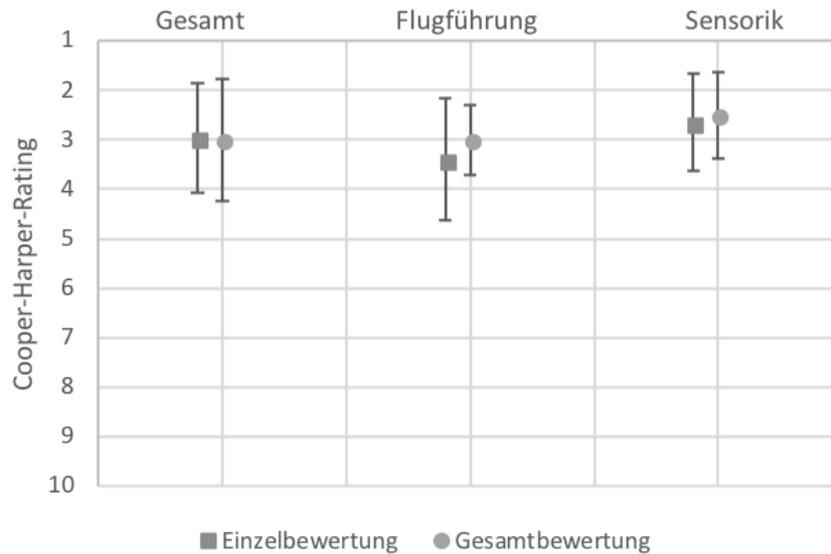


Abbildung 5-16: mod. Cooper-Harper-Rating Durchschnitt

Abbildung 5-16 zeigt den Durchschnitt der Missionsbewertungen für Flugführung, Sensorik und Gesamtsystem, sowie die Standardabweichung in Form von Fehlerbalken. Die abschließende Gesamtbewertung ist ebenfalls dargestellt. Zu erkennen ist eine leichte Verbesserung in der Bewertung, was auf einen noch vorhandenen Trainingseffekt und die steigende Vertrautheit mit dem System zurückzuführen sein könnte

5.2.4.3.3 Systembeurteilung

In Abbildung 5-17 sind die Wertungsfragen für das UAV-System zu sehen. Es ist zu erkennen, dass die Zufriedenheit der Kommandanten mit dem Gesamtsystem hoch ist und die Kommandierung der UAVs positiv bewertet wurde.

UAV-Führung war								
herausfordernd		○○	○	○			nicht herausfordernd	
langweilig					○	○○	○	interessant
nicht belastend			○	○○		○		belastend
unintuitiv		○	○		○	○		intuitiv
schwer			○○		○	○		einfach
zeitaufwendig				○○	○	○		zeitsparend
unangenehm				○	○○	○		angenehm

Abbildung 5-17: Bewertung UAV-Führung durch Kommandanten

Die Intuitivität wird neutral bewertet, wodurch die Durchführung des ausführlichen Tutorials zu Beginn der Messungen bestätigt wird. Ebenfalls wurde die durch die UAV-Führung verursachte Belastung nicht als niedrig angegeben. Dies entspricht dem beobachteten Verhalten in den hochkomplexen Missionen.

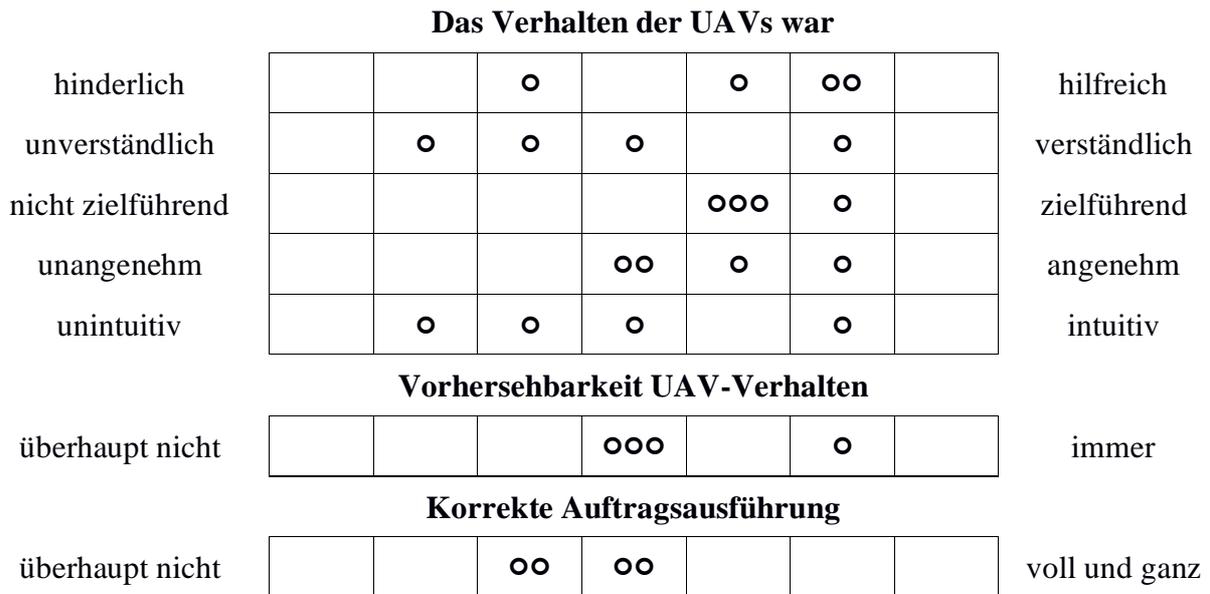


Abbildung 5-18: Bewertung UAV-Verhalten durch Kommandanten

Die Bewertungen des UAV-Verhaltens sind in Abbildung 5-18 dargestellt. Insgesamt tendierte die Bewertung des Verhalten der UAVs in Richtung hilfreich, zielführend, angenehm und vorhersehbar. Die Intuitivität und die Verständlichkeit wurden wiederum schlechter bewertet, was auf ein Verbesserungspotenzial hindeutet, jedoch in Relation zur Komplexität des Gesamtsystems gesehen werden muss. Auch die Korrektheit der Auftragsausführung wurde schlechter bewertet. Ein Grund bei Befragung waren lange Planungszeiten von über 15 Sekunden, vor allem in der Mission Desert Shield, die zum Abbruch der Planung durch die Kommandanten und einer erneuten Auftragsvergabe führten. Die genaue Untersuchung dieser Aussage folgt im nächsten Kapitel.

5.2.4.4 Verhaltensanalyse von System und Nutzer

Die bisher vorgestellten Leistungswerte haben ihre Ursache im Verhalten des UAV-Systems, dem Operateur und den Interaktionen zwischen beiden. Um ein besseres Verständnis der Vorgänge zu erlangen, sollen diese Aspekte nun im Sinne des explorativen Experiments genauer untersucht werden.

5.2.4.4.1 Systemverhalten

Das Systemverhalten setzt sich aus der Annahme, Planung und Ausführung von Aufträgen und der Darstellung von Informationen und Warnungen zusammen.

Auftragsarten:

Das UAV-System handelt erst nach der Eingabe eines Auftrags, wie es im vorherigen Kapitel dargelegt wurde. Aufträge sind also die Ursachen für alle weiteren Handlungen des Agenten. Deshalb soll hier zuerst ein Blick auf die erteilten Aufträge und deren Ausführung geworfen werden.

Auftragsverteilung (N=834)

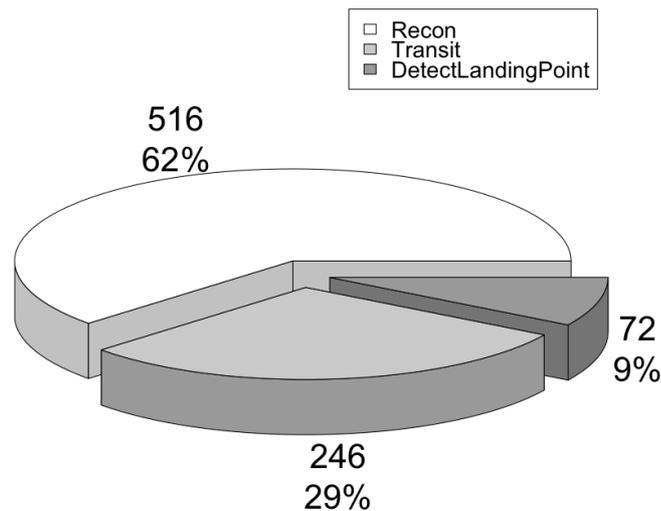


Abbildung 5-19: Auftragsverteilung

Abbildung 5-19 zeigt die Verteilung der Auftragsarten in absoluten Zahlen und in Prozent. Den größten Anteil, mit ca. 60%, haben die Aufklärungsaufträge. Dies ist zu erwarten, da das gesamte Fähigkeitspektrum der UAVs mit diesem Auftrag abgerufen werden kann. Als nächster großer Block folgen mit 30% die Transit-Aufträge, also das Verlegen eines UAVs ohne Aufklärungstätigkeit. Diese relativ hohe Zahl deutet auf eine häufige gezielte Positionierung der UAVs hin, da bei der Durchführung der Missionen lediglich für den Rückflug ein Transit-Auftrag eingesetzt werden muss. Demnach sind lediglich 20 der insgesamt 246 Verlegungen notwendig gewesen. Mit einer Anzahl von 72 entsprechen die Landezonendetektionen in etwa den notwendigen 48 für die Aufklärung aller Landezonen. Die zusätzlichen 24 sind auf erneute Aufklärung aufgrund einer technischen Fehlfunktion im Landezonenmodul oder für die Aktualisierung der Ergebnisse, also eine taktische Präferenz zurückzuführen.

Planungszeiten des Agenten:

Die Planungszeit ist für einen einzelnen Agenten definiert als Zeit zwischen Erhalt des Auftrags und Bereitstellung eines Plans. Im Durchschnitt betrug die Planungszeit für einen Auftrag 3,34 Sekunden mit einer hohen Standardabweichung von 3,23 Sekunden. Dies spiegelt sich auch in Abbildung 5-20, mit einer deutlichen Verschiebung des Histogramms nach links, wider.

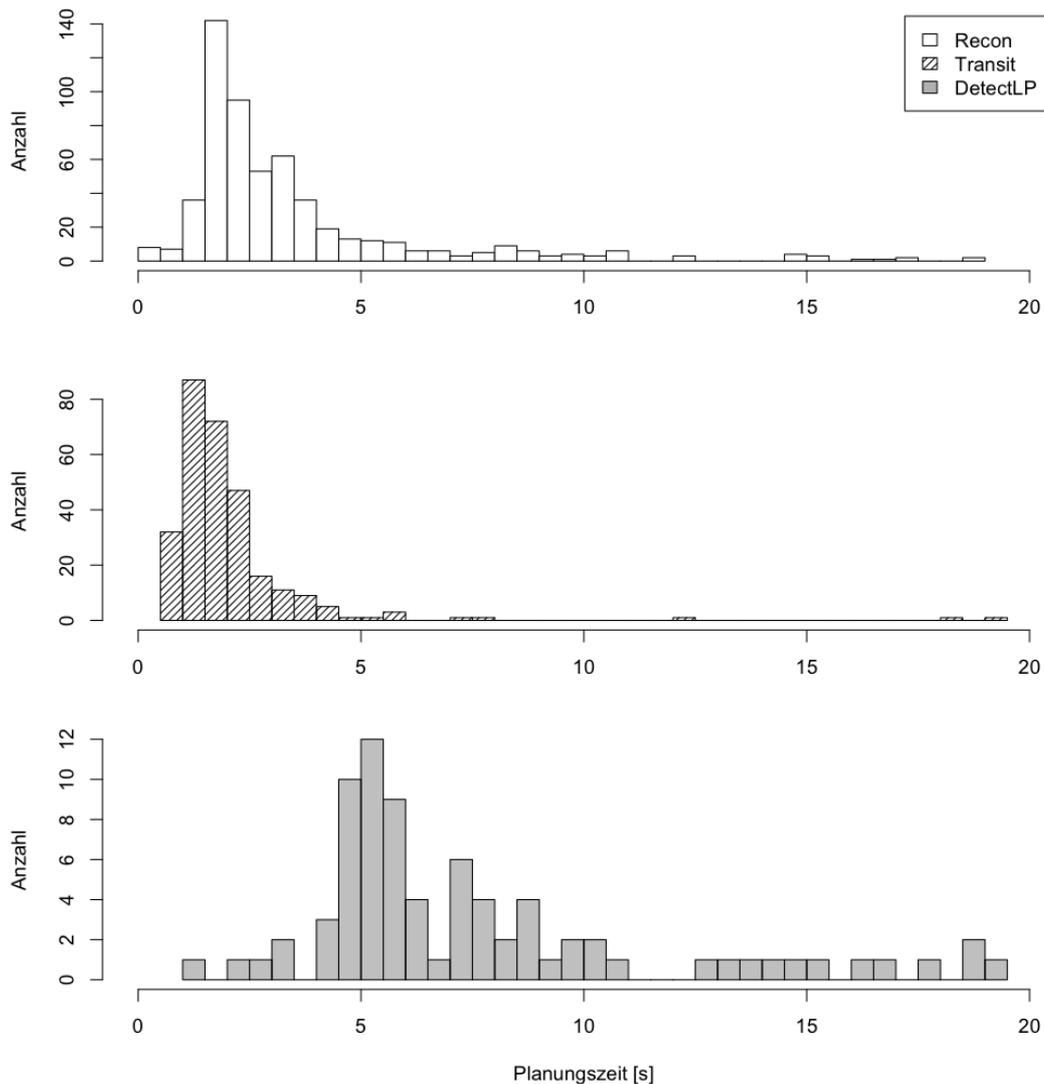


Abbildung 5-20: Histogramm der Planungszeit nach Auftragsart

Es sind deutlich unterschiedliche Planungszeiten der einzelnen Auftragsarten zu sehen. Transitaufträge sind eher im niedrigen Sekundenbereich zu finden während Landezonendetektionen ausschließlich im mittleren Sekundenbereich auftreten. Die meisten Aufklärungsaufträge haben eine kurze Planungszeit, was die Häufung im Bereich 2-3 Sekunden zeigt. Bei einzelnen Aufträgen war die Planungszeit jedoch deutlich länger, wie an der Verteilung über den gesamten Bereich zu erkennen ist. Die Unterschiede in den Planungszeiten je nach Auftrag sind vor allem dadurch zu erklären, dass Landezonendetektionen mehrere Aufklärungsaufträge und diese wiederum mehrere Transitaufträge beinhalten. Die Unterschiede innerhalb der Auftragsarten sind auf die unterschiedliche Komplexität der Umstände zurückzuführen. Im Falle eines Aufklärungsauftrags an ein UAV, welches sich direkt neben dem Ziel befindet, sind deutlich weniger Optionen in der Planung auszuwerten, als wenn sich UAV und Ziel in verschiedenen Luftraumordnungszonen mit mehreren Ein- und Ausflugmöglichkeiten befinden. Planungszeiten über 12 Sekunden traten ausschließlich in der Mission Desert Shield auf, deren Luftraumstruktur und durch das Szenario verlangte UAV-Positionierungen viele Optionen für die Planung eröffneten.

Warnungen:

Insgesamt zeigte das System dem Bediener 125 Warnungen an, also 6,25 Warnungen pro Mission. In Abbildung 5-21 und Abbildung 5-22 sind diese nach Crew und Mission, sowie nach Warnungsart aufgeführt.

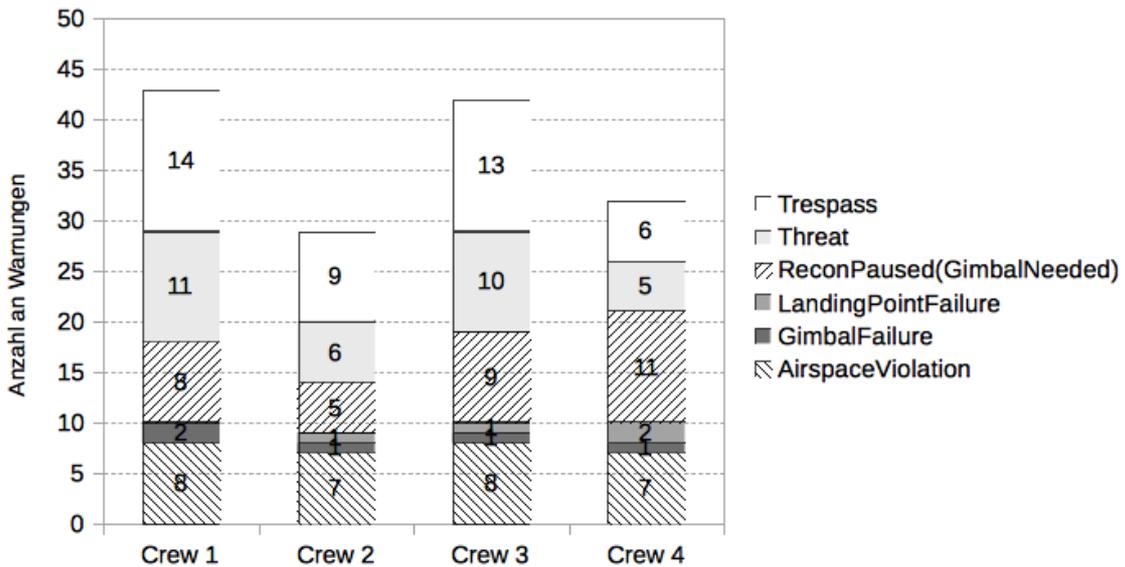


Abbildung 5-21: Anzahl an Warnungen nach Crew

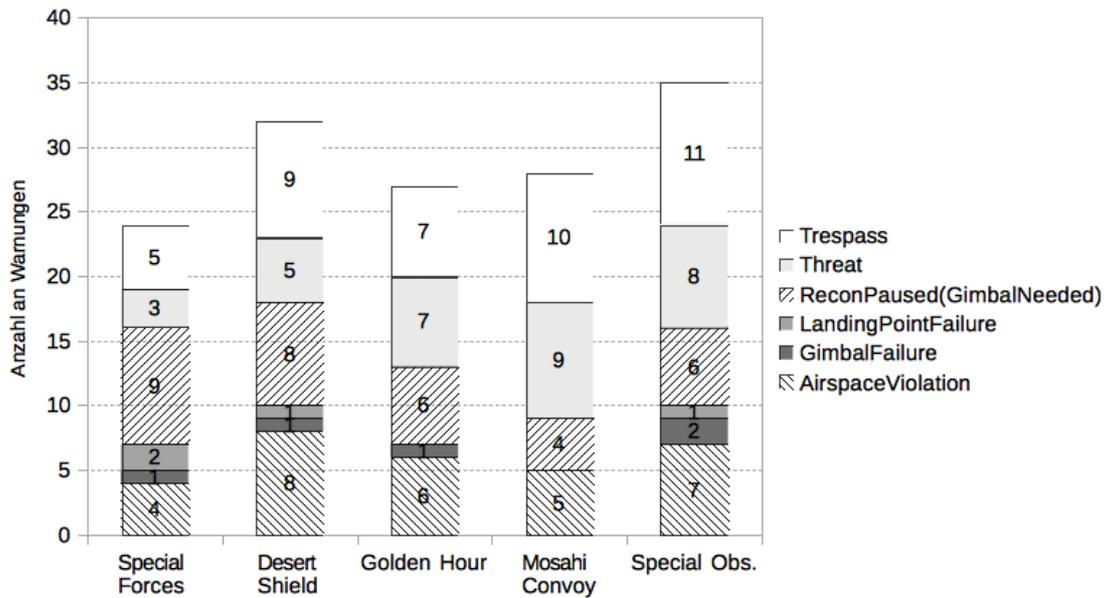


Abbildung 5-22: Anzahl an Warnungen nach Mission

Die Warnungen sind weitestgehend missions- und bedienerunabhängig. Die Mission Special Observation hat als zeitlich längste Mission die meisten Warnungen gefolgt von Desert Shield als zweitlängster. Dabei war die mittlere Zeit zwischen zwei Warnungen 8,8 Minuten, was die Kommandanten nicht übermäßig belastete (vgl. auch nachfolgende Bewertung). Von 30 drohenden Verletzungen von dem System bekannten Luftraumgrenzen durch UAVs führten lediglich 5 Fälle auch zu einer Übertretung. In allen anderen Fällen sorgten die Warnungen für einen rechtzeitigen Abbruch des Auftrags oder eine Neuplanung durch den Bediener, teilweise mit der angebotenen Unterstützung des Systems. In 33 Fällen sorgte die Warnung über die momentane Benutzung des Gimbals durch den Bediener für eine rechtzeitige Freigabe, so dass der anstehende Aufklärungsauftrag durchgeführt werden konnte. Obwohl 42 Warnungen vor einem Einflug der UAVs in bedrohtes Gebiet angezeigt wurden, wurde insgesamt 32 Mal in ein solches Gebiet eingeflogen. Dies deutet auf die Notwendigkeit zur Verbesserung der Agentenplanung und zu einer besseren Darstellung der Konfliktsituation hin.

Alle 125 Warnungen wurden durch die Crews im Interview nach der Mission, in der sie auftraten, auf einer Skala von 1 bis 7 hinsichtlich Hilfe, Störung und Verständlichkeit bewertet. Das Ergebnis ist in Abbildung 5-23 zu sehen.

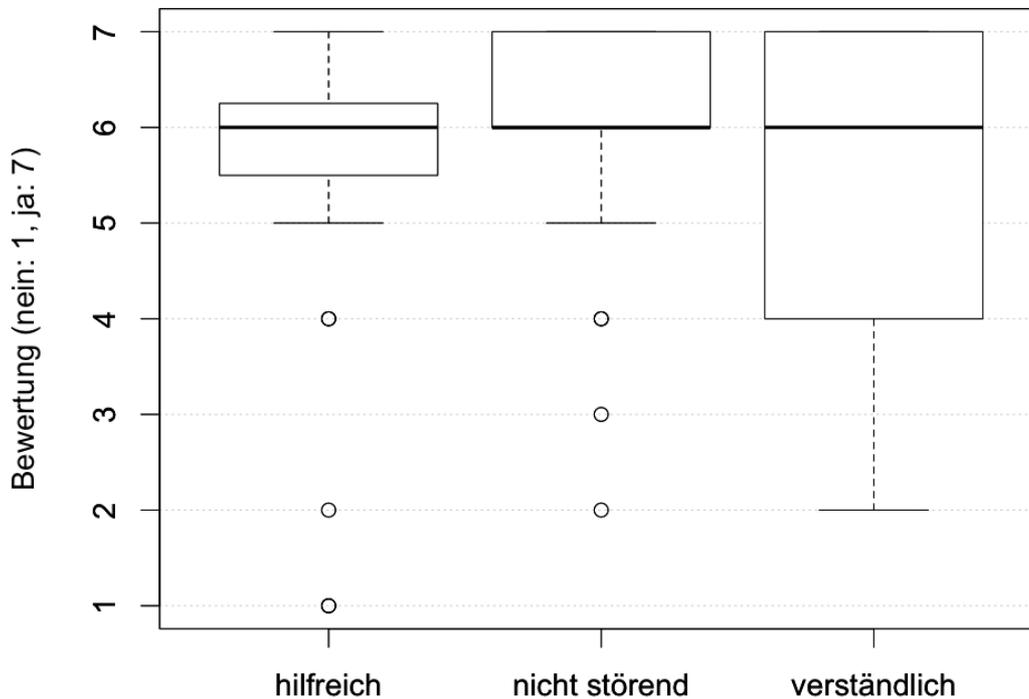


Abbildung 5-23: Bewertung Warnungen

Insgesamt wurden die Warnungen positiv bewertet. Die Ausreißer bei der Kategorie „hilfreich“ sind zwei Threat-Warnungen (Bewertung 1 und 2), eine Recon-Paused-Warnung (Bewertung 1) und eine AirspaceViolation-Warnung (Bewertung 4). Bei den ersten handelt es sich um Warnungen vor dem Aufenthalt eines UAVs in bedrohtem Gebiet, nachdem bereits länger eine Tresspass-Warnung angezeigt wurde. Die Recon-Paused-Warnung und die AirspaceViolation-Warnung traten jeweils bei einer durch den Kommandanten beabsichtigten Aktion auf und wurden deshalb als überflüssig bewertet. Entsprechend wurden diese Warnungen als störend empfunden.

5.2.4.4.2 Verhalten des Menschen

Das Verhalten des Menschen lässt sich in UAV-Einsatzstrategie und Benutzerinteraktionen aufteilen. Letztere sollen in diesem Abschnitt vor allem in Bezug auf den Interaktionsaufwand untersucht werden.

Einsatzstrategie UAVs:

Alle Kommandanten entschieden sich ein UAV für die Landezonenaufklärung einzusetzen und mit den beiden verbliebenen die Hauptanflugroute und die alternative Anflugroute aufzuklären. Im Anschluss an die Landezonenaufklärung entschieden sich 3 der 4 Kommandanten meist dafür das UAV dort zu behalten und Veränderungen zu beobachten.

Ein Pilot achtete darauf, stets ein UAV in der Nähe des Helikopters zu behalten, um flexibel auf unvorhergesehene Ereignisse reagieren zu können. Insgesamt wurden die UAVs in allen Missionen über das Einsatzgebiet verteilt und konnten somit ihre Aufklärungsleistung maximieren.

Interaktionsaufwand

Im Folgenden soll die Dauer der Beschäftigung mit dem System ausgewertet werden und anschließend der Anteil der Missionszeit, in der das System unter dem Einfluss des Nutzers handelte, ermittelt werden. Dazu wird das Konzept des Robot Attention Demand (RAD) nach (Olsen & Goodrich, 2003) herangezogen. Es stellt ein Maß für die Abhängigkeit eines Agenten vom Menschen dar und ist wie folgt definiert:

$$\text{RAD} = \text{IE} / (\text{IE} + \text{NT})$$

Dabei steht IE für den Interaktionsaufwand (engl. Interaction Effort) und NT für die Toleranz des Systems für Vernachlässigung durch den Bediener (engl. Neglect Tolerance). Der Interaktionsaufwand kann im einfachsten Fall mit der Zeit, in der der Bediener das System aktiv führt, gleichgesetzt werden und die Vernachlässigungstoleranz mit der Zeit, in der das System ohne Aufsicht produktiv funktioniert ohne eine Minimalleistung zu unterschreiten. Im Folgenden wird der Interaktionsaufwand als Interaktionszeit und die Vernachlässigungstoleranz als Planungs- und Ausführungszeit der UAVs für Aufträge angenommen.

Demnach ergibt sich die Notwendigkeit die Interaktionszeit mit den UAVs zu bestimmen. Dies ist nicht trivial, da neben der reinen Bedienung auch die mentale Beschäftigung mit der Führung hinzugezählt werden muss. Mit den erhobenen Blickbewegungs- und Bedienoberflächendaten lässt sich jedoch eine Abschätzung der Interaktionszeit unter bestimmten Annahmen treffen.

Es werden folgende notwendige Bedingungen aufgestellt, damit ein erfasster Zeitraum als Interaktionszeit mit den UAVs gilt:

- Der Blick des Bedieners ist auf die Karte im MFD gerichtet
- Ein UAV ist im Dock als aktives Luftfahrzeug ausgewählt

Zusätzlich wird ein Zeitraum zur Sensorbedienung und -auswertung und damit zur Interaktionszeit gezählt, wenn die folgende Bedingung zutrifft:

- Der Blick des Bedieners ist auf ein Sensorfenster im MFD gerichtet

Unter diesen Voraussetzungen erhält man eine Interaktionszeit über alle Flüge von 36285 Sekunden oder 10,08 Stunden. Dies entspricht im Durchschnitt 10,08 Minuten Interaktionszeit mit den UAVs pro UAV und Mission. Demnach beschäftigte sich der Bediener im Durchschnitt 65% der Missionszeit mit den UAVs. Abbildung 5-24 stellt die Werte für die Interaktionszeit nach Crew und Mission dar.

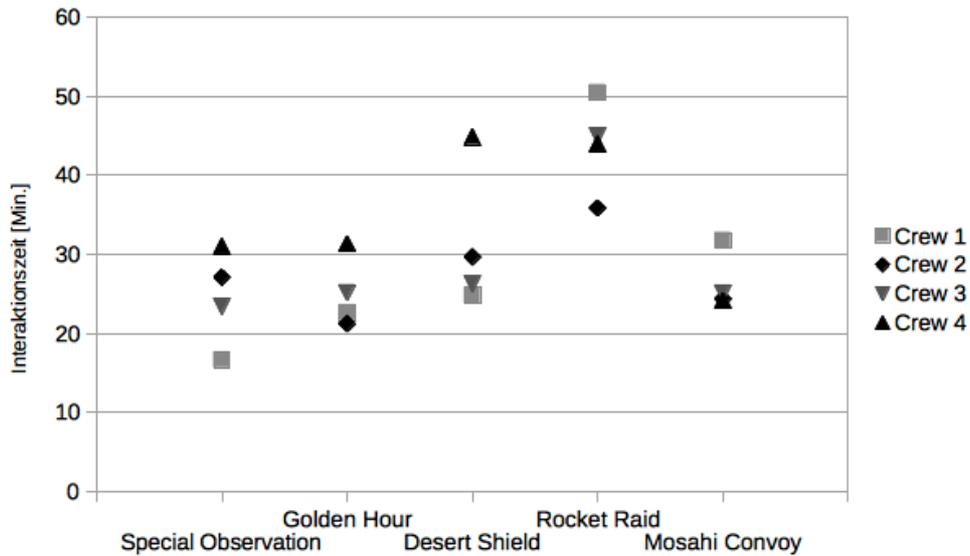


Abbildung 5-24: Verteilung Interaktionszeit nach Crew und Mission

Deutlich sichtbar ist eine Abhängigkeit der Interaktionszeit von der Mission. Rocket Raid als zeitlich längste Mission, ist auch in der höchsten Interaktionszeit zu erkennen. Hier nutzten die meisten Kommandanten die langen und eher ruhigen An- und Abflugstrecken des Hubschraubers zur intensiven Beschäftigung mit den UAVs. Außerdem wurde hier durch die Einsatzführung die Beobachtung eines Luftschlags angeordnet, was nur durch manuelle Eingriffe in die Sensorführung möglich war und entsprechend die Interaktionszeit vergrößerte. Die Interaktionszeit zwischen den Crews variiert wesentlich geringer. Diese Annahmen sind fehlerhaft, da sich der Bediener beim Betrachten der Karte mental auch mit anderen Themen beschäftigen kann, beispielsweise der Hubschrauberplanung. Demgegenüber steht die Zeit, in der sich der Bediener mental mit den UAVs beschäftigt und dabei den Hubschrauber als aktives Element ausgewählt hat. Die Genauigkeit des Blickbewegungsmesssystems stellt eine weitere Fehlerquelle dar. Jedoch sind diese Fehler für eine Abschätzung tolerabel.

Um die Vernachlässigungstoleranz zu ermitteln, wurden Planungs- und Ausführungszeit aller Aufträge addiert. Insgesamt führten die UAVs 92940 Sekunden oder 25,82 Stunden Tätigkeiten aus. Das entspricht im Durchschnitt 25,82 Minuten Tätigkeit pro UAV und Mission. Demnach war jedes UAV ca. 55% der Missionszeit aktiv. Abbildung 5-25 zeigt die Ergebnisse nach Crew und Mission aufgeteilt.

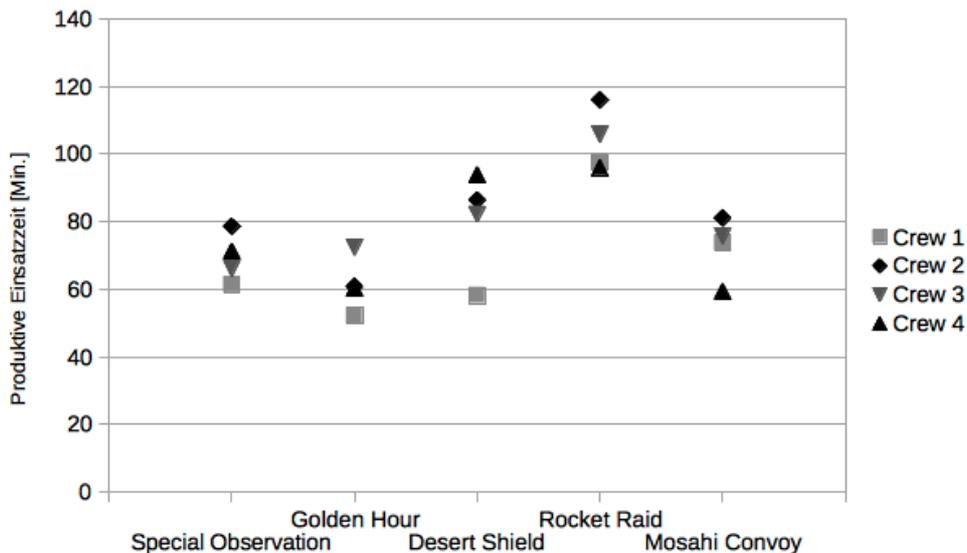


Abbildung 5-25: Verteilung der produktiven Einsatzzeit nach Crew und Mission

Auch hier ist eine deutliche Abhängigkeit der Vernachlässigungstoleranz von den Missionen sichtbar. Die Mission Rocket Raid ist wieder deutlich aus den vorher genannten Gründen als Ausreißer erkennbar. Die Werte zwischen den Crews unterscheiden sich nur leicht. Diese Werte stellen eine untere Abschätzung der Vernachlässigungstoleranz dar, da ein UAV, welches keinen Auftrag plant oder ausführt sehr wohl produktiv im Sinne der Mission sein kann. Dies ist beispielsweise der Fall, wenn der Bediener den Sensor eines wartenden UAVs nutzt, oder wenn ein wartendes UAV mithilfe des Sensors Feindpositionen in der taktischen Karte aktualisiert.

Die Anzahl der genutzten UAVs fließt ebenfalls in die Ermittlung von Interaktionszeit und Vernachlässigungstoleranz ein. In der Berechnung des RAD kürzt sich diese Zahl jedoch heraus und wird deshalb nicht weiter betrachtet. Aus den ermittelten Werten errechnet sich der RAD im Durchschnitt über alle Flüge mit 28%. Der Kehrwert des RAD wird als Fan-Out bezeichnet und stellt ein theoretisches Limit für die maximale Anzahl an gleichzeitig bedienbaren Systemen dieser Art. Er beträgt in diesem Fall 3,56. Daraus kann gefolgert werden, dass bei einem Verzicht auf die Tätigkeiten als Kommandant eine maximale Anzahl von 10 UAVs ($3 \text{ UAVs} * 3,56$) führbar sind.

Die Ergebnisse zur Nutzung variabler Automationsgrade können direkt mit den Ergebnissen Uhrmanns (Uhrmann & Schulte, 2012) zur Stringenz verglichen werden. Variable Automationsgrade als Generalisierung der Stringenz wurden in einem ähnlichen Nutzungsumfeld mit Helikopter und der gleichen Anzahl an UAVs eingesetzt. In beiden Fällen war eine intensive Nutzung durch die Kommandanten festzustellen. Die Art und Anzahl der Eingriffe war in beiden Fällen jedoch stark von der individuellen Bedienweise abhängig. In Uhrmanns Experimenten bevorzugten einige Kommandanten über alle Missionen hinweg viele Eingriffe und eine hohe Stringenz, während andere eher auf höherer Auftragsebene und niedriger Stringenz führten. Ein ähnliches Bild zeichnete sich in den Versuchen dieser Arbeit ab und wird im nächsten Abschnitt genauer betrachtet.

5.2.4.5 Untersuchung Variabler Automationsgrade

Variable Automationsgrade wurden regelmäßig eingesetzt und boten in mehreren Fällen Unterstützung bei der Missionsdurchführung. Diese sollen im Folgenden beschrieben werden.

5.2.4.5.1 Nutzung variabler Automationsgrade

Abbildung 5-26 zeigt die Häufigkeit der verschiedenen Eingriffsarten über alle Flüge.

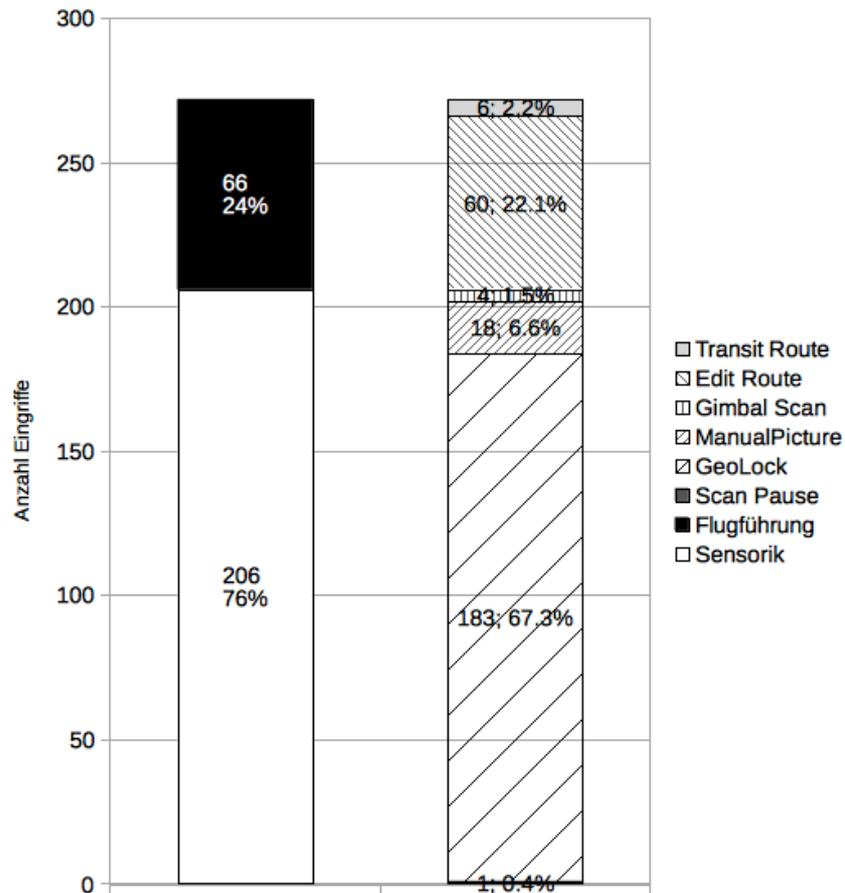


Abbildung 5-26: Einsatz von manuellen Eingriffen

Es ist zu erkennen, dass ca. 76% der Eingriffe auf die Sensorsteuerung angewendet wurden. Die restlichen 24% sind Eingriffe in die UAV-Flugführung. Dies entspricht den Erwartungen, da die Steuerung des Sensors, als vorgeschobenes Auge, über GeoLock unmittelbar die Intention des Bedieners widerspiegelt. Klammert man diese Eingriffsart aus, dreht sich das Verhältnis um. Jetzt bilden die Eingriffe in die Flugführung den Anteil von 75%.

Um individuelle Nutzungshäufigkeit der variablen Automationsgrade zu untersuchen, zeigt Abbildung 5-27 die Anzahl der Eingriffstypen für jeden Kommandanten.

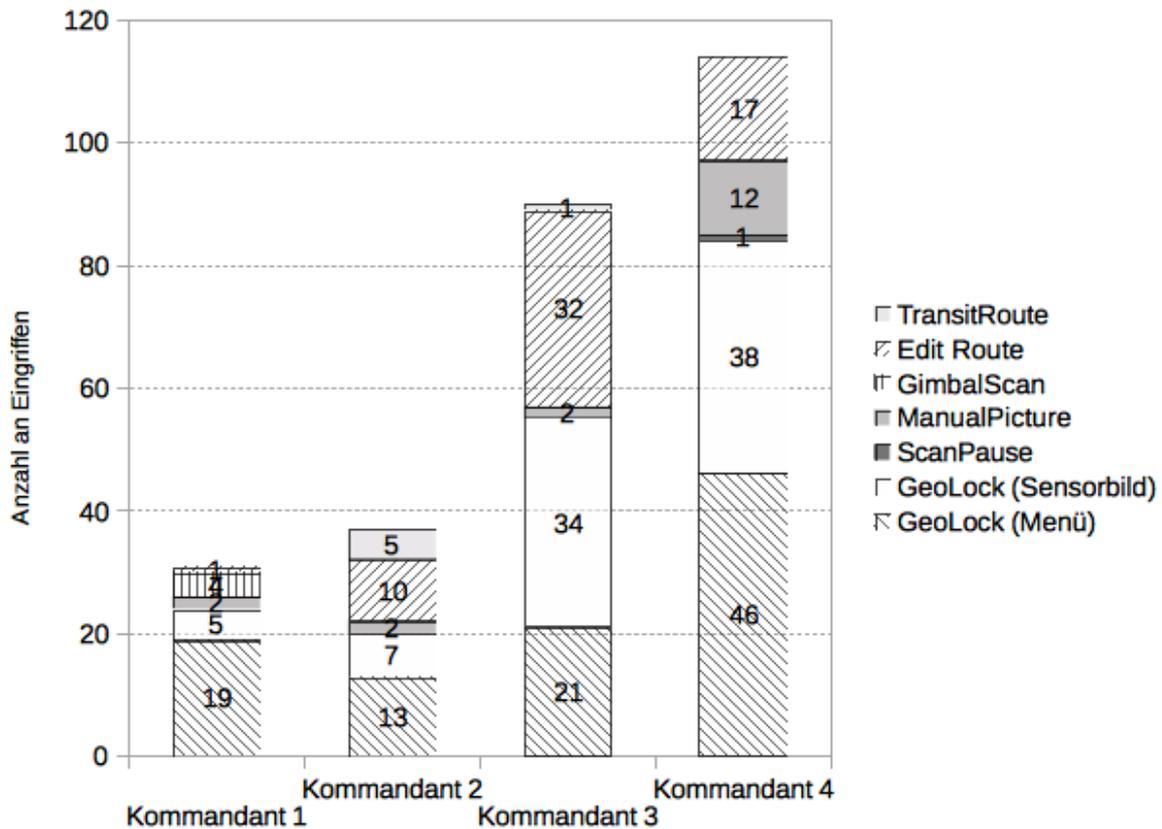


Abbildung 5-27: Anzahl an Eingriffen nach Kommandant

Sehr deutlich ist zum einen die Verteilung der Eingriffszahlen erkennen. Kommandant 3 benutzt variable Automationsgrade zwei- bis dreimal so oft wie Kommandant 1 oder Kommandant 2, während Kommandant 4 diese drei- bis viermal so oft einsetzt. Außerdem sind die Präferenzen der einzelnen Kommandanten für die unterschiedlichen Eingriffsarten zu erkennen. Kommandant 1 scheint automatisierte Funktionen zu bevorzugen, benutzt wenige Eingriffe und als einzige den automatisierten GimbalScan. Kommandant 2 verwendet überproportional oft die Möglichkeit in die UAV-Flugführung einzugreifen. Kommandant 3 nutzt variable Automationsgrade am zweithäufigsten und scheint an einer exakten Wegpunktsteuerung interessiert zu sein. Kommandant 4 verwendet die meisten Eingriffe und davon einen großen Anteil für die Sensorsteuerung, um beispielsweise manuell Sensorbilder anzufertigen.

Nutzungsbeispiel: Ausgleich von Automationsfehlern

Des Weiteren bietet ein System mit variablen Automationsgraden dem Bediener die Möglichkeit bei Automationsfehlern einzugreifen. Abbildung 5-28 zeigt eine Situation, in der durch einen Fehler in der Automation ein Routenteilstück nicht aufgeklärt wurde. Dies ist in an den fehlenden Bildkacheln entlang der grün markierten Route im hell hervorgehobenen Bereich zu sehen. Da sich der Helikopter nähert, wäre es zeitlich nicht möglich einen normalen Aufklärungsauftrag mit Verlegung des türkisen UAVs durchzuführen. Stattdessen wählte der Kommandant die Scanfunktion des Gimbals direkt aus, hier im unteren Bereich des Kontextmenüs zu sehen, und konnte dadurch das Routenstück rechtzeitig aufklären.

Information und der Schutz eigener Kräfte angegeben. Dadurch könne ein besseres Lagebild im Kopf des Kommandanten erzeugt werden.

5.2.4.5.2 Provozierte Nutzung variabler Automationsgrade

Um eine Nutzung von variablen Automationsgraden sicherzustellen, wurden in den Missionen Situationen eingefügt, die die deren Anwendung notwendig machen. Dazu gehören die Aufforderung durch die Flugsicherung ein Haus mit laufender Operation durch andere Truppenteile (Operation House) zu umfliegen und die Anweisung durch die Leitstelle einen Gefechtsschadensbericht mithilfe der UAVs zu erstellen. Diese Anwendungsfälle werden im Folgenden vorgestellt und untersucht.

Operation House

In Abbildung 5-30 ist die erfolgreiche Umsetzung einer Flugbeschränkung für die UAVs durch den Bediener zu sehen. Der Kommandant des Hubschraubers wird über einen Funkspruch darüber informiert, dass sich Luftverkehr oberhalb von Flugfläche 90 nördlich von einem taktischen Element (Operation House, grünes Quadrat) aufhalten muss. Die UAVs auf Flugfläche 100 sind davon direkt betroffen. Die Information ist jedoch beispielsweise aus Zeitgründen oder Inkompatibilitäten zu Systemen befreundeter Einheiten, wie sie in der Realität häufig vorkommen, nicht im System bekannt. Durch den manuellen Eingriff ist der Bediener in der Lage die Restriktion einzuhalten, indem er manuell die Flugroute anpasst, ohne den Plan wesentlich zu ändern.

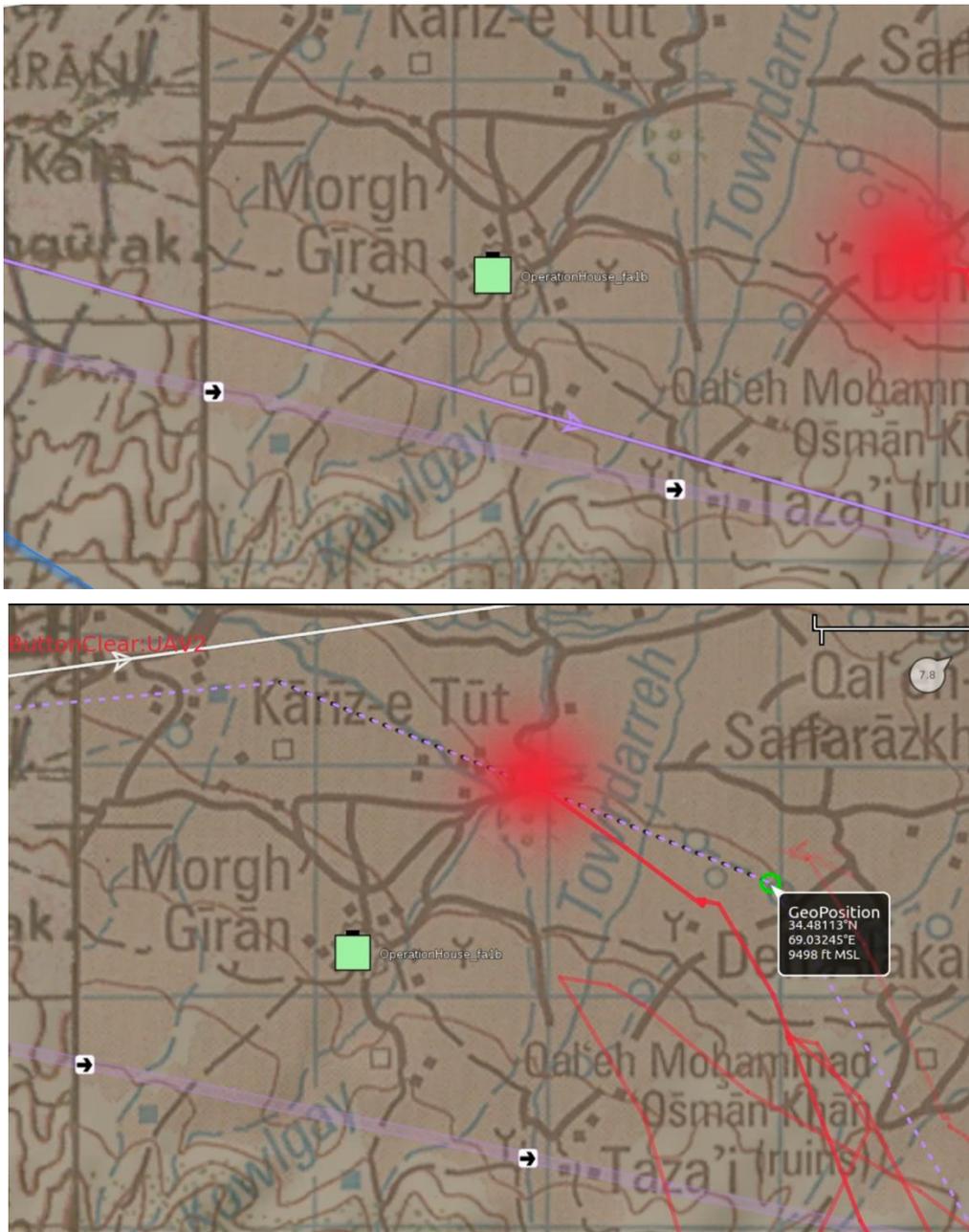


Abbildung 5-30: Verletzung des Mindestabstands zum Operation House (grünes Quadrat) durch violette UAV-Flugroute (oben), Manuelle Änderung der Route durch Kommandant (schwarz-violett gestrichelte Route, unten)

Abbildung 5-31 die Bewertung der für diesen Eingriff genutzten manuellen Routenveränderung durch die Piloten.

War die Möglichkeit einzugreifen hilfreich?

Nein			○	○	○○○ ○	ja
------	--	--	---	---	----------	----

Hat der Eingriff in diesem Fall die Missionsleistung erhöht?

Nein	○○				○	○○○	ja
------	----	--	--	--	---	-----	----

Abbildung 5-31: Bewertung der manuellen Routenveränderung

Die Funktionalität wird von den Kommandanten als hilfreich angesehen und trägt zur Erhöhung der Missionsleistung in einigen Situationen bei.

Gefechtsschadensbericht

In der Mission Rocket Raid wurden alle Kommandanten beim Rückflug nach abgeschlossener Mission durch die Leitstelle aufgefordert einen Gefechtsschadensbericht für einen Artillerieschlag auf einen Häuserkomplex zu geben. Dazu musste der Gimbal mithilfe des direkten Zugriffs auf die Gimbalsteuerung ausgerichtet werden und die Szene beobachtet werden. Abbildung 5-32 zeigt die Sensorsicht und die Position des UAVs in diesem Fall.

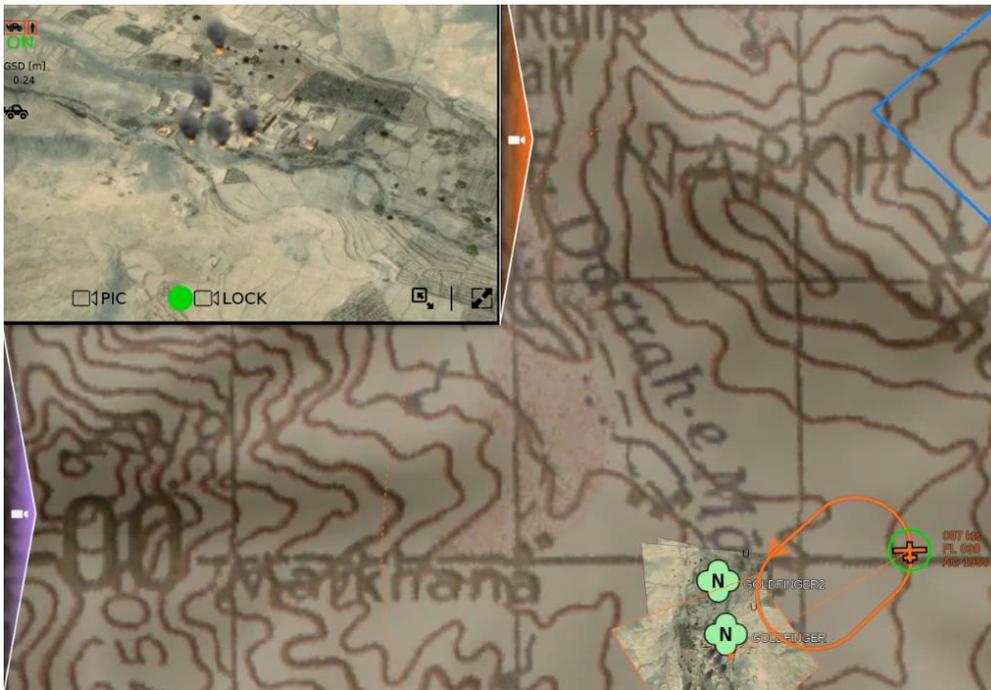


Abbildung 5-32: Nutzung eines UAVs zur Erstellung eines Gefechtsschadensberichts

Abbildung 5-33 zeigt die Bewertung der für diesen Eingriff genutzten manuellen Gimbalsteuerung durch die Piloten.

War die Möglichkeit einzugreifen hilfreich?

Nein	○	○	○	○○	○○○	○○○	○○○	ja
------	---	---	---	----	-----	-----	-----	----

Hat der Eingriff in diesem Fall die Missionsleistung erhöht?

Nein	○○	○	○	○○○	○○○	○○○	○○○	ja
------	----	---	---	-----	-----	-----	-----	----

Abbildung 5-33: Bewertung der manuellen Gimbalsteuerung

Die Funktionalität wird als hilfreich angesehen und trägt in vielen Fällen zur Erhöhung der Missionsleistung bei. Die beiden vorangegangenen Fälle stellen neben der Erweiterung des Einsatzspektrums auf eine neuartige Situation Beispiele für den Einsatz von implizitem Wissen dar.

5.2.4.5.3 Bewertung durch Kommandanten

Auch in der allgemeinen Befragung zu variablen Automationsgraden wurde die Erweiterung des Einsatzspektrums bestätigt. Abbildung 5-34 zeigt die Bewertung manueller Eingriffe in die

Flugführung der UAVs durch die Kommandanten. Diese Fragen wurden im Abschlussfragebogen gestellt als die Fähigkeiten der UAVs den Teilnehmern bereits vertraut waren. Auf dieser Grundlage sollten diese allgemeinen Aussagen zu manuellen Eingriffsmöglichkeiten bewertet werden und damit die Vorteile variabler Automationsgrade herausgestellt werden. Alle Aussagen wurden mit großer Zustimmung beantwortet.

Manuelle Eingriffe in die UAV-Flugführung ...

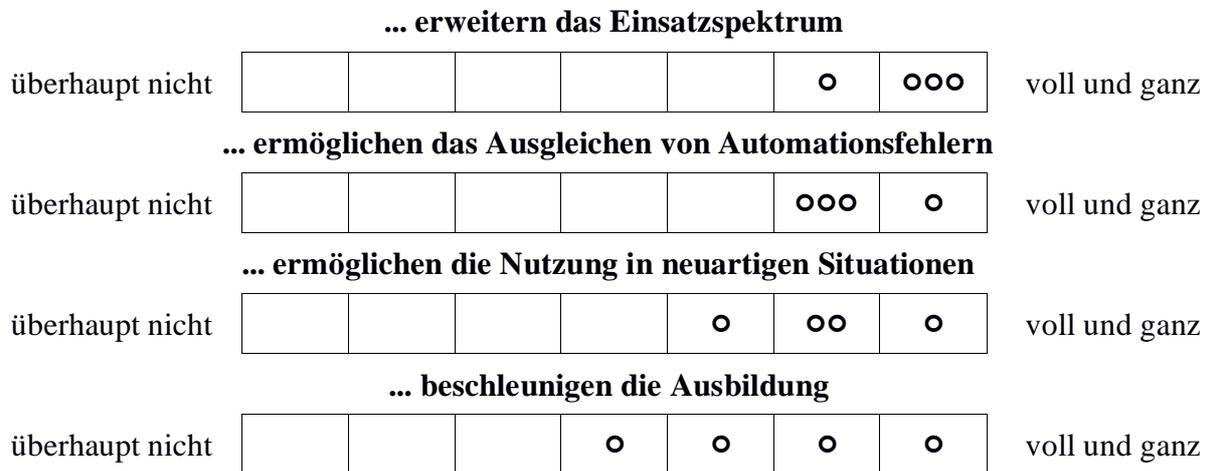


Abbildung 5-34: Bewertung manueller Eingriffe für den Einsatz

5.2.5 Ergebnis

Die gesteckten Ziele der Erprobung der Implementierung in einem explorativen Experiment wurden erreicht. Die Implementierung stellte sich prinzipiell und konzeptionell für das Experiment und die Bedienung von drei UAVs aus dem Hubschraubercockpit als geeignet heraus. Dies lässt sich an den Leistungsdaten ablesen und wurde ebenfalls von den Crews im Interview und in den Fragebögen bestätigt. Die eingesetzten Testpersonen bewerteten das System in den im Simulator dargestellten realitätsnahen Missionen als insgesamt geeignet.

Die Möglichkeit der variablen Automationsgrade wurde gut durch die Versuchsteilnehmer angenommen, was aus der starken Nutzung auch außerhalb der provozierten Einsätze zu schließen ist. Durch den variablen Automationsgrad lässt sich eine Steigerung der Missionsleistung in den beschriebenen Fällen feststellen. Dies lässt sich auch im subjektiven Eindruck der Piloten nachweisen. Auch die Kontrolle des Nutzers über das System wird dadurch gesteigert und erreicht letztendlich eine hohe Akzeptanz. Der geführte Zugriff ermöglicht dabei, durch die vorherige Eingabe des Auftrags, ein besseres Verständnis der Intention des Nutzers in der Maschine, was an den als geeignet und hilfreich bewerteten Warnmeldungen bei Planungskonflikten zu erkennen ist.

Bei der Interaktion zwischen den Piloten und dem System traten Unstimmigkeiten bei längeren Planungszeiten auf, was in zukünftigen Iterationen verbessert werden sollte. Dies führte jedoch nicht zu Einschränkungen des Experiments. Zudem waren nach dem Training die Versuchsteilnehmer noch nicht vollständig mit dem Umgang vertraut, was zu Erkennbaren Unterschieden in der vor allem in der ersten Messmission führte. Nach Abschluss der zweiten Mission waren jedoch alle Piloten in der Lage das System einzusetzen. Während der fünf Experimentaltage entwickelten sich zwei Präferenzen für die Führung der UAVs. Die eine Hälfte der Kommandanten bevorzugten sehr viele Eingriffe für eine stringenteren Führung. Die andere Hälfte vertraute eher auf die auftragsbasierte Führung und griff nur gezielt auf niedrigere Automationsgrade zu.

5.3 Evaluierung geführter Zugriff im Realflug

Neben dem Einsatz im Simulator wurde das Gesamtsystem und das Konzept des geführten Zugriffs im Realflug evaluiert. In diesem Kapitel werden der Experimentalaufbau, die Durchführung und die Ergebnisse beschrieben.

5.3.1 Versuchsdesign

Ziel des Experiments ist der Vergleich des Konzepts des geführten Zugriffs mit der Konfiguration des freien Zugriffs auf variable Automationsgrade. Zusätzlich sollte die rein auftragsbasierte Führung als Basisvergleich untersucht werden. Dabei wurden die Aspekte Missionsleistung, Workload und Nutzerbewertung herangezogen werden.

Die erste Konfiguration ermöglichte ausschließlich die Kommandierung des Agenten über die auftragsbasierte Führung ohne Eingriffe auf niedrigere Automationsfunktionen und stellt somit ein automatisiertes System ohne variablen Automationsgrad dar. Die zweite Konfiguration erlaubte den freien Zugriff auf alle Ebenen der Automationshierarchie und stellte somit einen variablen Automationsgrad ohne Einschränkung zur Verfügung. In der dritten Konfiguration wurde das Konzept des geführten Zugriffs umgesetzt, welches den Eingriff auf niedrigere Automationsgrade nur über Unteraufgaben des Gesamtplans zulässt. Tabelle 5-4 zeigt eine Übersicht über die Konfigurationen, welche im Folgenden hinsichtlich Missionsleistung, Workload und Benutzerbewertung untersucht werden sollen.

Tabelle 5-4: Untersuchte Versuchskonfigurationen

Konfiguration	Eigenschaften
Auftragsbasierte Führung	Führung auf hohem Automationsgrad
Freier Zugriff	Führung auf allen Automationsgraden möglich
Geführter Zugriff	Führung lediglich durch Eingriff in Aufträge

Weitere Untersuchungsgegenstände waren die Bewertung der Benutzeroberfläche, sowie die Realflugeigenschaften der Agentensoftware.

Zur Erhöhung der Aussagekraft der Ergebnisse, sollten die Versuche mit einem realen Fluggerät durchgeführt werden. Ein einzelner Operateur sollte dieses aus einer Bodenkontrollstation heraus steuern, um realitätsnahe Missionen durchzuführen. Es ist jedoch anzunehmen, dass in Standardmissionen, in denen sämtliche Situationen durch Automationsfunktionen gut abgedeckt sind, kein Unterschied zwischen den Konfigurationen festzustellen sein wird. Alle Konfigurationen verfügen über die Möglichkeit der auftragsbasierten Führung, welche in Standardfällen, für die die auftragsbasierte Führung entwickelt wird, die einfachste und schnellste Bedienungsart bei hoher Missionsleistung darstellt. Aus diesem Grund wurden für das Experiment gezielt Grenzfälle und Missionen ausgewählt, die so nicht im Design der Automation vorgesehen waren. Hierbei handelte es sich im Wesentlichen um vier unterschiedliche Missionsarten. Um eine größere Anzahl an Messungen zu ermöglichen, wurden die einzelnen Missionsarten in leichter Variation mehrmals verwendet.

5.3.1.1 Operationalisierung

Die abstrakten Konzepte Missionsleistung, Workload und Nutzerbewertung werden im Folgenden auf konkrete Messmethoden abgebildet.

5.3.1.1.1 Missionsleistung

Die Missionsleistung wird für diese Untersuchung unterteilt in Erreichung von Zielen und der dafür benötigten Missionszeit. Das Erreichen von Zielen unterteilt sich wiederum in den

Missionserfolg und das Vermeiden von Fehlern. Die Art und Anzahl der Fehler sind somit ein Teil der Operationalisierung der Missionsleistung und werden als Negativleistung gewertet. Dabei können im Wesentlichen folgende Fehler auftreten:

- Verletzung der minimalen Distanz zum aufgeklärten Objekt
- Einflug in durch feindliche Luftabwehr bedrohtes Gebiet
- Verletzung von Luftraumgrenzen

Der Missionserfolg ist abhängig von der Mission aus verschiedenen Komponenten zusammengesetzt. Er besteht bei Aufklärungsaufträgen aus Menge und Qualität der aufgeklärten Ziele und bei Abschreckungsaufträgen aus Einhaltung der Flughöhe. Die Aufklärungsqualität ist wiederum für jede Mission unterschiedlich definiert und wird später genauer beschrieben.

Die Missionszeit ist die Zeit zwischen Erteilung der Mission und erfolgreichem Abschluss der Mission. Eine kürzere Missionszeit wird als bessere Missionsleistung bewertet. Die Missionszeit ist zusammengesetzt aus Planungszeit und Ausführungszeit, wobei sowohl Planung als auch Ausführung aus der Zusammenarbeit zwischen Operateur und Agenten bestehen. Experimentell bedingte auftretende Unterbrechungen wurden von der jeweiligen Zeit abgezogen. Die Planungszeit wird zwischen der Erteilung der Mission und dem Ausführungsbefehl an den Agenten gemessen. Die Ausführungszeit ist die Zeit zwischen dem Ausführungsbefehl und dem erfolgreichen Abschluss der Mission.

5.3.1.1.2 Workload

Die Workload wurde auf zwei Arten erfasst. Die subjektive Workload in jeder Mission wurde durch einen NASA-TLX Fragebogen ermittelt. Die objektive Workload während jeder Mission wurde indirekt über eine Nebenaufgabe erfasst.

Erfassung der subjektiven Workload mit NASA-TLX

Wie im Simulatorexperiment beschrieben, ist der NASA-TLX Fragebogen ein gängiges Hilfsmittel, um subjektive Workload zu erfassen. Hierzu füllten die Probanden nach Abschluss aller Missionen einer Konfiguration diesen Fragebogen aus. Ziel war es den individuellen Unterschied der subjektiven Workload zwischen den Konfigurationen zu bestimmen.

Erfassung der objektiven Workload durch Nebenaufgabe

Neben der Erfassung der subjektiven Workload wurde durch eine Nebenaufgabe ein objektives Maß über möglicherweise noch vorhandene Reservekapazitäten des Operators angewendet. Hierbei handelt es sich eigentlich um ein Leistungsmaß, das herangezogen werden kann, um eine objektive Aussage über die Workload des Operators zu erhalten. Sind Reservekapazitäten vorhanden, d.h. der Operateur noch in der Lage die Nebenaufgabe zu bearbeiten, so kann die Annahme getroffen werden, dass die Workload des Operators nicht zu hoch war. Dabei muss jedoch sichergestellt sein, dass der Operateur die Nebenaufgabe nicht über seine primäre Aufgabe priorisiert hat

Nach (Knowles, 1963) eignet sich eine Nebenaufgabe als objektives Maß für die Reservekapazität für zusätzliche Workload, die der Proband verarbeiten kann. Die Nebenaufgabe sollte nur eine minimale Störung durch Interferenz mit der Hauptaufgabe darstellen. Dabei kann laut (O'Donnell & Eggemeier, 1986) zwischen einer sekundären und einer eingebetteten Nebenaufgabe unterschieden werden. Erstere ist eine zusätzliche Aufgabe und kann frei gewählt werden, während letztere im Aufgabenspektrums des untersuchten Arbeitsplatzes vorkommen muss, was die Möglichkeiten der Gestaltung einschränkt. Jedoch wird die eingebettete Nebenaufgabe meist als weniger störend empfunden. Außerdem sollte die

Nebenaufgabe selbst den Rhythmus der Bearbeitung vorgeben, also von sich aus eine Aktion des Versuchsteilnehmers anfordern, und eine eindeutige Bewertung der Leistung ermöglichen, was beispielsweise über ein vordefiniertes Punkteschema geschehen kann. Nach (Ogden, Levine, & Eisner, 1979) ist es essentiell, dass der Proband auf die Priorisierung der Hauptaufgabe über die Nebenaufgabe informiert wird und diese auch einhält.

Sind die angegebenen Voraussetzungen erfüllt, können folgende Aussagen getroffen werden. Ist die Leistung in der Nebenaufgabe niedrig, so ist eine hohe Beanspruchung in der Hauptaufgabe anzunehmen. Bei hoher Leistung in der Nebenaufgabe kann eine niedrige Beanspruchung in der Hauptaufgabe angenommen werden.

Die Nebenaufgabe für dieses Experiment bestand aus der korrekten Angabe der aktuellen UAV-Position relativ zum nächsten der drei vorgegebenen Bezugspunkte in Himmelsrichtung und Entfernung, einer abgewandelten Form der sog. Bulls-Eye-Methode. Diese Bezugspunkte sind in Abbildung 5-35 dargestellt.



Abbildung 5-35: Drei Bezugspunkte (weiße Dreiecke im Kreis) und Maßstab (rechts oben) in Bedienoberfläche

Für die Angabe der Position wird eine eigene Benutzeroberfläche (siehe Abbildung 5-36) verwendet, die oberhalb der UAV-Bedienfläche angebracht ist.

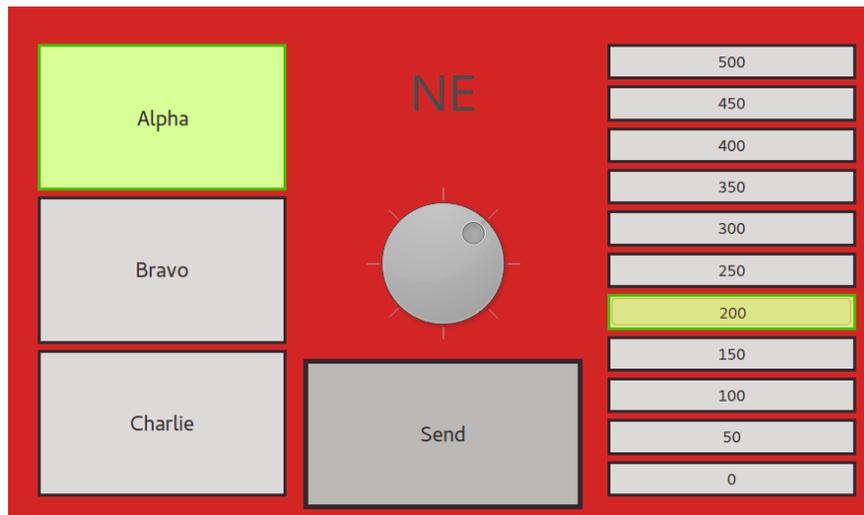


Abbildung 5-36: Bedienoberfläche Nebenaufgabe mit Bezugspunktauswahl, Kurswahlrad und Entfernung in Metern

Die Anweisung zur Nebenaufgabe enthält die folgende Vorgehensweise. Die Bedienoberfläche signalisiert eine neue Anfrage nach der Position durch Wechsel der Hintergrundfarbe nach rot. Zuerst soll der dem UAV am nächsten gelegene Bezugspunkt durch Betätigung der entsprechenden Schaltfläche ausgewählt werden. Anschließend soll die Himmelsrichtung vom Bezugspunkt zum UAV in acht Quantisierungsstufen auf dem Drehregler eingestellt werden. Die Entfernung zwischen den Positionen misst der Proband aus der Karte mithilfe des dort angezeigten Maßstabs und stellt sie in den vorgegebenen Stufen auf der Knopfleiste rechts ein. Durch Betätigung der Transmit-Schaltfläche wird die Meldung versandt und die Hintergrundfarbe wechselt wieder nach grau. Um die verstrichene Zeit seit der letzten Anfrage zu visualisieren wird der Rotton der Hintergrundfarbe bei bestehender Anfrage immer dunkler bis ein sehr dunkles Rot erreicht ist. Dies dient auch dem visuellen Stimulieren der Aufmerksamkeit, da bei nicht beantworteten Anfragen die Hintergrundfarbe nicht auf grau zurück wechselt. Die Veränderung von Dunkelrot auf Rot ist auch aus dem Augenwinkel gut erkennbar, was bei der räumlichen Versuchsanordnung auf zwei Bildschirmen notwendig war. Der zeitliche Verlauf ist in Abbildung 5-37 dargestellt.

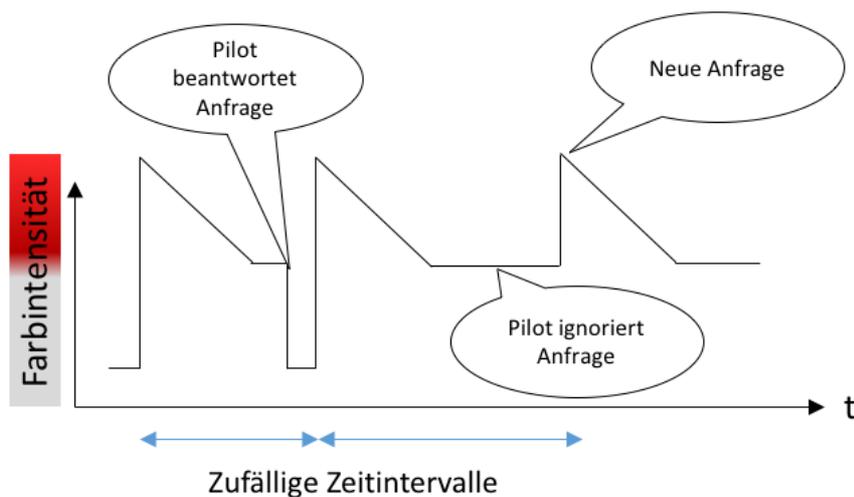


Abbildung 5-37: Hintergrundfarbverlauf der Bedienoberfläche für die Nebenaufgabe

Die Anweisung zur Nebenaufgabe enthält auch den klaren Hinweis, dass die eigentliche UAV-Führungsaufgabe Priorität hat und die Positionsanfragen nur bei freier Kapazität beantwortet werden sollen. Somit wird die Forderung in der Literatur nach eindeutiger Priorisierung erfüllt. Außerdem stellt sie eine auch in realen UAV-Missionen vorkommende Aufgabe dar, um die Immersion nicht zu stören. Dies entspricht einer eingebetteten Nebenaufgabe.

Die zeitliche Abfolge der Anfragen erfolgt zufällig, jedoch ist die Rate im Durchschnitt auf 2 Anfragen pro Minute festgesetzt. Um verwirrende Situationen von Anfragen mit sehr kurzem zeitlichen Abstand auszuschließen wurde ein Mindestabstand zwischen zwei Anfragen von 10 Sekunden sichergestellt.

Die Leistung in der Nebenaufgabe wird über eine Wertung operationalisiert, welche die Reaktionszeit und die Qualität der Lösung beinhaltet. Der Reaktionszeit ist die Zeit zwischen Erscheinen der Anfrage und Versenden der Lösung. Die Qualität wird über die Auswahl des richtigen Referenzpunktes, die korrekte Himmelsrichtungsangabe und die korrekte Entfernung bestimmt. Reaktionszeit und Qualität sind mit jeweils 6 von 12 möglichen Punkten gewichtet. Die Reaktionszeit wird wie in Tabelle 5-5 dargestellt bewertet.

Tabelle 5-5: Bewertung Reaktionszeit

Zeit	Wertung
0-1s	6
1-2s	4
2-3s	2
3-4s	1
über 4s	0

Die überproportional hohe Punktezahl für schnelle Reaktionszeiten dient der klareren Trennung von Phasen mit niedriger Beanspruchung, da in dieser die Nebenaufgabe schneller bearbeitet wird.

Die Wertung der Qualität setzt sich aus der Summe der in Tabelle 5-6 angegebenen Bewertungsschemata zusammen.

Tabelle 5-6: Bewertungsschema Nebenaufgabe

Aspekt	Kriterium	Wertung
Referenzpunkt	Auswahl des nächsten Referenzpunktes	2
	Auswahl des zweitnächsten	1
	sonst	0
Himmelsrichtung	Auswahl der korrekten Himmelsrichtung	2
	Auswahl der benachbarten Himmelsrichtungen	1
	sonst	0
Entfernung	Auswahl der korrekten Entfernung	2
	Auswahl der benachbarten Entfernungen	1
	sonst	0

Kalibrierung

Da die Nebenaufgabe, ebenso wie die Hauptaufgabe eine Lernkurve beinhaltet, erfolgte für jeden Versuchsteilnehmer eine Kalibrierung, um diesen Effekt beim Experiment auszuschließen. Die Kalibrierung bestand aus der Durchführung der Nebenaufgabe ohne weitere Ablenkungen, bis ein konstant hoher Wert erreicht wurde. Als ausreichender Wert wurde ein Durchschnitt von 10 Punkten über die letzten 6 Anfragen angenommen.

5.3.1.2 Szenario und Missionen

Als Szenario wurde die Kommandierung eines einzelnen UAVs zu Aufklärungszwecken aus einer mobilen Bodenkontrollstation gewählt. Insgesamt wurden im Rahmen von (Fritzsche, 2016) und (Wehrmann, 2016) vier unterschiedliche Missionsvignetten erstellt. Tabelle 5-7 zeigt eine Übersicht

Tabelle 5-7: Übersicht Missionsvignetten

Missionsvignette	Auftragsart	Dauer [Min.]	Besonderheit
Höhle	Aufklärung	3	Beobachtungsrichtung eingeschränkt
Tiefflug	Abschreckung	2	Flughöhe unterhalb des Limits
Falsche SAM	Aufklärung	3	Fehlerhafte Informationen im System
Detection Level	Aufklärung	4	Autom. Flugplanung unzureichend

Die Missionsvignette „Höhle“ umfasste einen Aufklärungsauftrag bei dem das Fluggerät an einer bestimmten Stelle positioniert werden musste um das Innere eines Höhleneingangs beobachten zu können.

In der Missionsart „Tiefflug“ sollte in einem vorgegebenen Bereich sehr tief geflogen werden, um dortigen feindlichen Einheiten zur Abschreckung Präsenz zu demonstrieren.

Bei der Missionsvignette „Falsche SAM“ sollte ein Aufklärungsauftrag durchgeführt werden, wobei eine bereits neutralisierte feindliche Luftabwehrstellung fehlerhaft weiterhin als aktiv im System verblieb und die Planung beeinflusste.

Die Missionsart „Detection Level“ stellte die Operateure vor die Herausforderung in einer Aufklärungsmission mit komplexen räumlichen Einschränkungen den Mindestabstand zum Aufklärungsziel, also das Detection Level, zu wahren.

Die Missionsvignetten wurden von jedem Teilnehmer in jeder Konfiguration in leichten Variationen mehrmals absolviert um eine größere Datenmenge zu erhalten. Eine detailliertere Darstellung der Missionsvignetten findet sich im Anhang.

5.3.2 Versuchsanordnung

Der größte Teil des Implementierungsaufwands entstand aus der Auswahl und dem Aufbau der fliegenden Plattform als Versuchsträger, sowie der Experimentalinfrastruktur. Im Folgenden werden die Anforderungen für das Experiment und anschließend die verwendeten Hard- und Softwarekomponenten beschrieben.

5.3.2.1 Bodenkontrollstation

Als zentrales Element zur Durchführung der Experimente und zur Überwachung des Fluggeräts diente eine Bodenkontrollstation (BKS). Diese bestand aus einem umgerüsteten Mercedes-Sprinter, wie in Abbildung 5-38 zu sehen ist, und enthielt zwei Arbeitsplätze mit jeweils zwei Rechnern und zwei Touchbildschirmen mit den gleichen Maßen wie die Bildschirme im Cockpit des Hubschraubersimulators.



Abbildung 5-38: Bodenkontrollstation

Dadurch war ein Betrieb der bereits vorgestellten MFD-Benutzerschnittstelle nach Anpassungen an die gegebenen Experimentalbedingungen möglich. Abbildung 5-39 zeigt einen der beiden Arbeitsplätze mit MFD auf dem unteren Bildschirm und Nebenaufgabe auf dem oberen Bildschirm.



Abbildung 5-39: Operateurarbeitsplatz in der Bodenkontrollstation

Die BKS war mit Batterien und einem Generator ausgestattet und erlaubte dadurch einen unabhängigen Betrieb der Systeme für bis zu 5 Tage. Im reinen Batteriebetrieb war eine Stromversorgung aller Systeme bis zu 8 Stunden möglich. Zusätzlich war die BKS mit Werkzeug und Arbeitsflächen zur kurzfristigen Instandsetzung und Umrüstung von Fluggeräten ausgestattet.

5.3.2.2 Datenlink

Die Anforderungen an den Missionsdatenlink waren die Übertragungsmöglichkeit eines Sensorbildes mit einer Latenz von weniger als 0,5 Sekunden. Eine größere Verzögerung ist ansonsten vor allem bei der manuellen Steuerung des Gimbals störend. Die Datenrate sollte für die Übertragung des Videobildes und der Missionsdaten mehr als 1,5 MBit/s betragen.

Insgesamt sollte außerdem eine sichere Versuchsdurchführung durch den Datenlink nicht gefährdet werden.

Insgesamt stellten drei unterschiedliche Datenlinks die Verbindung zum Fluggerät sicher. Als Missionsdatenlink wurde eine kommerzielle LTE-Verbindung eingesetzt, um das Fluggerät mit der BKS zu verbinden. Deren Reichweite ist theoretisch sehr groß, da das gesamte Mobilfunknetz mit LTE-Abdeckung zur Übertragung geeignet ist. Für die Umsetzung wurden in der BKS ein LTE-Modem und an Bord des Fluggeräts ein LTE-Stick eingesetzt, welche jeweils mit SIM-Karte ausgestattet waren. Da in LTE-Netzen eine direkte Kommunikation der teilnehmenden Geräte untereinander vom Netzbetreiber technisch ausgeschlossen wird, war es notwendig die Daten über ein eigenes VPN durch das Internet zu leiten. Der VPN-Server wurde im Rechenzentrum der Universität der Bundeswehr eingerichtet, was zu der paradoxen Situation führte, dass die Daten des Fluggeräts erst den Weg durch das Internet zur Universität nahmen, um von dort wieder zur Bodenkontrollstation auf dem Versuchsgelände übertragen zu werden (siehe Abbildung 5-40).

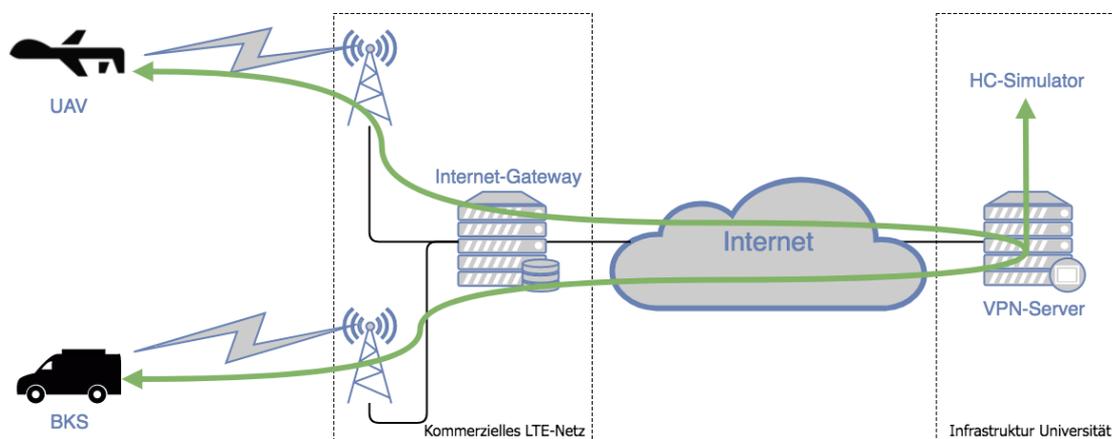


Abbildung 5-40: VPN-Tunnel

Die Latenzzeiten überstiegen jedoch nie den Wert von 200ms, was für leitende Kontrolle zu jeder Zeit und für die direkte Steuerung eines Gimbals bei guten Bedingungen ausreichend ist. Die geringen Latenzzeiten sind vor allem auf die LTE-Technologie zurückzuführen. Zusätzlich sind im Bild zwei Funkmasten dargestellt. Sind Bodenkontrollstation und UAV räumlich nahe beieinander, so verwenden beide mit großer Wahrscheinlichkeit den gleichen Funkmast, was bei ausgelastetem Netz zu einer zusätzlichen Einschränkung der Bandbreite führen kann. Bei unterschiedlichen Funkmasten wäre die Last über die doppelte Bandbreite verteilt. Über den Missionsdatenlink wurden Kommandos und Lageinformationen von der Bodenkontrollstation zum Fluggerät und Sensor- und Statusinformationen, sowie die Position zur BKS übertragen.

Ein RC-Link (Frequenz 2,4GHz) aus dem Modellbau mit einer Fernbedienung als Sender wurde zur manuellen Kontrolle des Fluggeräts eingesetzt. Er zeichnet sich durch Robustheit und eine ausreichende Reichweite von bis zu 2 Kilometern für den manuellen Flug im Sichtbereich aus und bietet dem Sicherheitspiloten die Möglichkeit jederzeit die Kontrolle zu übernehmen, wie es gesetzlich vorgeschrieben ist. Dieser Sicherheitsdatenlink stellt demnach die wichtigste Verbindung zum Fluggerät für die Flugsicherheit dar und ist vor allem aufgrund des experimentellen Charakters der Automationsfunktionen und deren nicht auszuschließendem Fehlverhalten notwendig.

Mithilfe eines zusätzlichen Telemetriemodems (Frequenz 2,4GHz) konnte der Autopilot direkt über die Open-Source Software APMPlanner⁶ überwacht und gegebenenfalls gesteuert werden.

⁶ ArduPilot.org. (2015). Ardupilot. <https://ardupilot.org/>

Diese Software ermöglichte eine Darstellung der Position, der aktuellen Wegpunkte, sowie der eingestellten Parameter in der Bodenkontrollstation und erlaubte den direkten Zugriff auf diese Parameter. Außerdem war ein Flugabbruch und eine Rückkehr zum Startpunkt über diese Schnittstelle kommandierbar. Dies war unabhängig von der Missionssoftware möglich und stellt eine zusätzliche Redundanz dar. Die Reichweite des Telemetriemodems beträgt ca. 1km.

Durch die Kombination der drei Datenlinks wurde ein redundantes System geschaffen, das die Sicherheit des Flugbetriebes stark erhöhte.

5.3.2.3 *Fluggerät und Sensorik*

Die Versuchszeit für eine Konfiguration wurde auf 20 Minuten festgelegt. Als Reaktionsmöglichkeit auf eventuelle Startschwierigkeiten und um nach abgeschlossenem Versuch mit einer Sicherheitsreserve landen zu können, wurde für das Fluggerät eine Mindestflugdauer von 30 Minuten gefordert, was entsprechende Auswirkungen auf die Dimensionierung des Akkus hatte. Außerdem sollte der Versuchsträger robust gegen eventuelle harte Landungen und eine geringe Komplexität für Start und Landung besitzen, um die Versuche dadurch nicht zu verzögern. Als kritische Komponente des Versuchsablaufs wurde auch das Vorhalten von mehreren identischen Fluggeräten befürwortet, da Totalausfälle oder größere Beschädigungen im Realflug niemals ganz auszuschließen sind. Da bereits mehrere Abhängigkeiten bei der Durchführung der Experimente vom Zeitplan der Versuchsteilnehmer bis hin zu geeignetem Wetter vorhanden waren, sollten solche Zwischenfälle die Messungen nicht einschränken.

Tabelle 5-8: Masse der Komponenten

Komponente	Gewicht [g]
Akku (12000mAh)	1200
Rechnerboard	330
Autopilot	100
Telemetriemodem	100
RC-Ausrüstung	100
Verkabelung	100
Kamera mit Objektiv	80
LTE-Stick	60

Aus den einzelnen Komponenten aus Tabelle 5-8 ergibt sich eine Gesamtnutzlast von 2,07kg die durch das auszuwählende Fluggerät für die geforderten 30 Minuten transportiert werden musste.

Die Anforderungen für das Fluggerät ließen die Wahl zwischen einem großen Multikopter, welcher mit der angegebenen Payload von 2,07kg sehr knapp die geforderten 30 Minuten Missionszeit erfüllen konnte und einem Flächenflieger mit entsprechend hoher minimaler Fluggeschwindigkeit. Aufgrund der höheren Priorisierung von Flugzeit gegenüber Minimalgeschwindigkeit wurde für das Experiment ein Flächenflieger ausgewählt. Ein Nurflügler vom Typ Skywalker X8 erfüllte die Anforderungen nach Payload, Robustheit und Stauraum. Abbildung 5-41 zeigt den fertig eingerüsteten X8.



Abbildung 5-41: Skywalker X8

Er übertraf die geforderte Flugzeit mit 45-60 Minuten, was während des Experiments mehr Spielraum bei auftretenden Fehlern erlaubte. Die minimale Fluggeschwindigkeit von ca. 15 m/s erforderte allerdings Anpassungen an das Experiment. Auch die Start- und Landekomplexität übertraf die eines Multikopters. Die Anforderungen beim Starten wurden mithilfe eines Katapults (siehe Abbildung 5-42) reduziert, was einen einfachen, zuverlässigen und schnellen Start ermöglicht.



Abbildung 5-42: X8 auf Katapult

Als Landemöglichkeit bot das Fluggerät nur einen regulären Landeanflug mit Ausgleiten auf dem Boden, was auf der mit Wiese bedeckten Versuchsfläche sicher durchführbar war und durch die Installation von Landekufen unterstützt wurde.

Es wurden drei Fluggeräte aufgebaut, um auch bei Defekten einen reibungslosen Experimentalbetrieb sicherstellen zu können. Der große Innenraum erwies sich als vorteilhaft bei der Entwicklung der optimalen Payloadkonfiguration. Abbildung 5-43 zeigt die Komponenten im Innenraum.

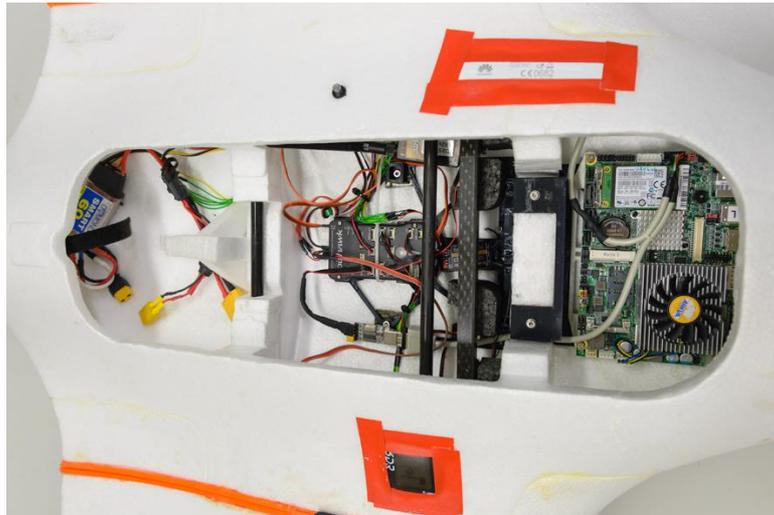


Abbildung 5-43: Innenaufbau X8

Im Mittelteil des Fliegers, nahe am Schwerpunkt, war der Autopilot vom Typ Pixhawk⁷ untergebracht. Dieser Open-Source-Autopilot stellt eine große Menge an Funktionalitäten bei gleichzeitig guter Dokumentation und unterstützender Soft- und Hardware zur Verfügung. Im vorderen Teil des Rumpfes war der Missionssensor nach unten ausgerichtet montiert. Durch das Weitwinkelobjektiv konnte bei geradem Streckenflug der gesamte Bereich unterhalb des Experimentalträgers bis zum Horizont erfasst werden. Lediglich nach hinten blockierte der Rumpf einen kleinen Teil des Sichtbereichs.

Der Onboard-Rechner sollte sowohl leistungsfähig genug für den gleichzeitigen Betrieb der Agentensoftware und der Bildverarbeitungsalgorithmen des Gimbals sein, als auch eine geringe Masse besitzen, was die Auswahl auf ein integriertes Rechnerboard einschränkte.

Im vorderen Rumpfbereich war daher ein Rechnerboard mit Intel i7 Prozessor auf einem speziell angefertigten Rahmen befestigt. Eine serielle Schnittstelle verband das Rechnerboard mit dem Autopiloten. Der LTE-Stick für den Missionsdatenlink war per USB-Kabel am Rechnerboard angeschlossen und im Mittelbereich auf der Außenseite des Rumpfes positioniert. Vorhergehende Versuche hatten eine starke Erhitzung des Gerätes gezeigt und diese Position stellte eine optimale Kühlung durch den Fahrtwind sicher. Ebenfalls zentral war der Akku befestigt. Aufgrund der großen Masse dieses Bauteils konnte der Schwerpunkt des Fluggerätes durch kleine Verschiebungen des Akkus optimal eingestellt und angepasst werden. Im hinteren Bereich des Rumpfes waren der Motor mit dem Pusherpropeller und der vom Autopiloten gesteuerte Motorregler angebracht. Ebenfalls an den Autopiloten angeschlossen waren die beiden Servos für die Elevons des Nurflüglers.

Die Anforderungen für die Missionssensorik waren die Übermittlung eines Kamerabildes und eine Gimballfähigkeit, da ansonsten das Detection-Level nicht hätte eingehalten werden können. Zudem sollten alle Komponenten eine geringe Masse besitzen, was einen mechanischen Gimbal als Missionssensor ausschloss. Aufgrund dessen wurde eine Electronic-Gimbal Lösung nach (Boehm, Schneemilch, & Schulte, 2013) mit Weitwinkelobjektiv gewählt. Dadurch erhöhte sich die Anforderung an die Auflösung der Kamera auf mindestens 4MP. Als Missionssensorik wurde eine Kamera der Firma ELP mit 180° Fischaugenobjektiv eingesetzt (siehe Abbildung 5-44).

⁷ PX4 Dev Team. (2019). Pixhawk 4. https://docs.px4.io/v1.9.0/en/flight_controller/pixhawk4.html



Abbildung 5-44: Missionssensor mit Fischaugenobjektiv

Diese zeichnet sich durch ihre hohe Auflösung von 8 Megapixeln bei einem geringen Gewicht von 80g und einer einfachen Anbindung per USB aus. Durch die hohen Datenraten war die Bildwiederholrate auf 15 Hz beschränkt, was jedoch keinen Einfluss auf das Experiment hatte.

5.3.2.4 Integration Agent und UAV-System

Ein großer Teil der Softwaremodule aus dem Simulatorexperiment konnte mit leichten Anpassungen erneut eingesetzt werden. Es waren jedoch auch zusätzliche Komponenten notwendig. Abbildung 5-45 zeigt eine Übersicht über die Module und deren Zuordnung auf die vorhandenen Rechner.

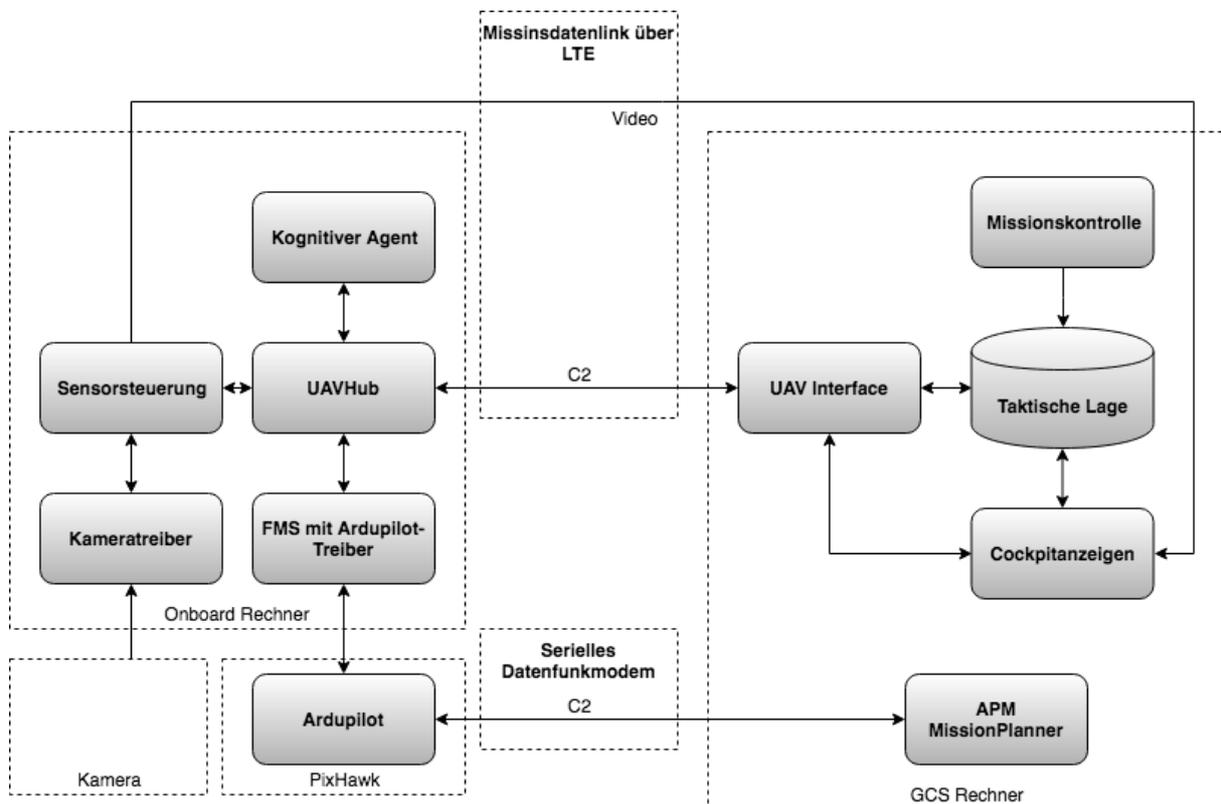


Abbildung 5-45: Übersicht Softwaremodule im Realflug

5.3.2.4.1 Softwaremodule auf dem UAV

Sowohl der kognitive Agent, als auch das UAVHub als dessen Anbindung an die restlichen Module waren identisch mit den Versionen im Simulator. Das FMS wurde mit durch die Nutzung einer anderen Treiberkomponente angepasst, wodurch eine Steuerung des

OpenSource Autopiloten Ardupilot⁸ für Flächenflugzeuge und Multikopter möglich war. Der Autopilot selbst lief auf dem eigenständigen Mikrokontrollerboard PixHawk⁹ und war direkt die Motorsteuerung und Servos des Fluggeräts angeschlossen. Außerdem wurde das FMS mit einer Höhenbegrenzung ausgestattet, welches Wegpunkte mit einer Höhe außerhalb eines vordefinierten Höhenbandes zwischen 50m und 100m über Grund nicht zuließ und dadurch die Flugsicherheit erhöhte.

Im Gegensatz zum Simulationsbetrieb, in welchem eine virtuelle Kamera an einem simulierten Gimbal genutzt wurde, sollte nun eine reale Kamera eingesetzt werden. Diese sollte, ähnlich wie im Simulator, schwenkbar und über die Benutzeroberfläche direkt steuerbar sein. Demnach mussten Funktionen wie Bodenstabilisierung und das Abfahren von vorgegebenen Bodenpunkten implementiert werden. Das Modul Sensorsteuerung übernahm diese Aufgabe.

Der Kameratreiber erfasste die Videodaten und leitete sie an die Sensorsteuerung weiter. Hier wurde aus dem verzerrten Bild der gewünschte Teil mithilfe von Teilkomponenten aus (Boehm et al., 2013) entzerrt. Die komprimierten Videodaten wurden anschließend zur Darstellung an die Sensoransicht in der Benutzerschnittstelle geschickt. Durch die Sensorsteuerung wurden auch höhere Automationsfunktionen zur Gimbalsteuerung sowohl durch dem Agenten, als auch der Benutzerschnittstelle zur Verfügung gestellt. Darunter fielen das Fixieren des Gimbals auf eine Bodenkoordinate, das Abfahren einer Route oder eines Gebietes mit dem Gimbal und die Zugriffsverwaltung zwischen Agent und Operateur. Dabei wurden Eingaben durch den Menschen stets höher gewertet und überschrieben die Eingaben durch den Agenten.

Die Module Kognitiver Agent, UAVHub, Sensorsteuerung und FMS waren auf dem i7 Rechnerboard untergebracht. Durch dessen ausreichende Rechenleistung war ein Parallelbetrieb ohne Einschränkungen möglich. Die größte Rechenlast in der Spitze wurde durch den planenden Agenten mit einer Auslastung von zwei CPU-Kernen erzeugt. Nach Abschluss der Planung sank die Rechenlast wieder auf unter einen Kern. Der Einsatz des Electronic-Gimbals führte zu erheblichen Gewichtseinsparungen und vereinfachter Mechanik. Die Umrechnung des Bildes von der Fischaugenansicht in eine verzerrungsfreie Darstellung erforderte jedoch einen eigenen Kern der CPU während des Betriebes. Die Videokompression wurde auf der im Chip integrierten Grafikeinheit durchgeführt und hatte einen vernachlässigbaren Einfluss auf die CPU-Leistung.

5.3.2.4.2 Softwaremodule in der Bodenkontrollstation

Die Module UAVInterface, Taktische Lage und Missionskontrolle waren identisch mit den Versionen aus dem Simulator. Letztere wurde lediglich mit anderen Konfigurationsdateien für die jeweilige Mission ausgeführt, wodurch auch der Inhalt der Taktischen Lage entsprechend verändert wurde. Zur Überwachung des Autopiloten wurde die oben beschriebene OpenSource-Software APM MissionPlanner eingesetzt.

Zum Einsatz kam außerdem die beschriebene Bedienoberfläche mit leichten Veränderungen. Das Kartenmaterial wurde auf das Fluggebiet in Deutschland angepasst und zusätzlich mit Satellitenbildern der Gegend ergänzt. Außerdem wurden die Darstellung der Informationen über den Helikopter und die Darstellung der anderen UAVs in der Karte entfernt. Abbildung 5-46 zeigt die Bedienoberfläche in dieser Fassung.

⁸ ArduPilot.org. (2015). Ardupilot. <https://ardupilot.org/>

⁹ PX4 Dev Team. (2019). Pixhawk 4. https://docs.px4.io/v1.9.0/en/flight_controller/pixhawk4.html



Abbildung 5-46: Bedienoberfläche für Realflugexperimente

Die drei Konfigurationen wurden ausschließlich durch Beschränkungen der Bedienoberfläche realisiert. Da die Steuerung des UAVs nur über das Kontextmenü auf der Karte und die Gimbalsteuerung in der Sensoransicht erfolgen kann, war es lediglich notwendig diese anzupassen.

Für die Konfiguration Auftragsbasierte Führung wurden sämtliche Eingriffe auf tiefere Automationsfunktionen deaktiviert. Abbildung 5-47 zeigt das Kontextmenü an einem freien Punkt auf der Karte, sowie bei der Auswahl einer zu einem Auftrag zugehörigen Route.



Abbildung 5-47: Kontextmenü in der Konfiguration Auftragsbasierte Führung

Für die Konfiguration freier Zugriff wurde die Manipulation von zu Aufträgen gehörenden Routen deaktiviert und dafür die Funktion Follow-Route hinzugefügt, welche den Agenten eine vorher manuell erstellte Route abfliegen ließ. Abbildung 5-48 zeigt das Kontextmenü an einem freien Punkt auf der Karte, sowie bei der Auswahl einer zu einem Auftrag zugehörigen Route. Bei ersterem ist die Möglichkeit zur Erstellung einer neuen Route (Draw Route) und zur Kameraausrichtung (Geo Lock) zu sehen. Bei letzterem steht ein Auftrag zum Abfliegen (Follow Route) und zum Abscannen (Gimbal Scan) der Route zur Verfügung.

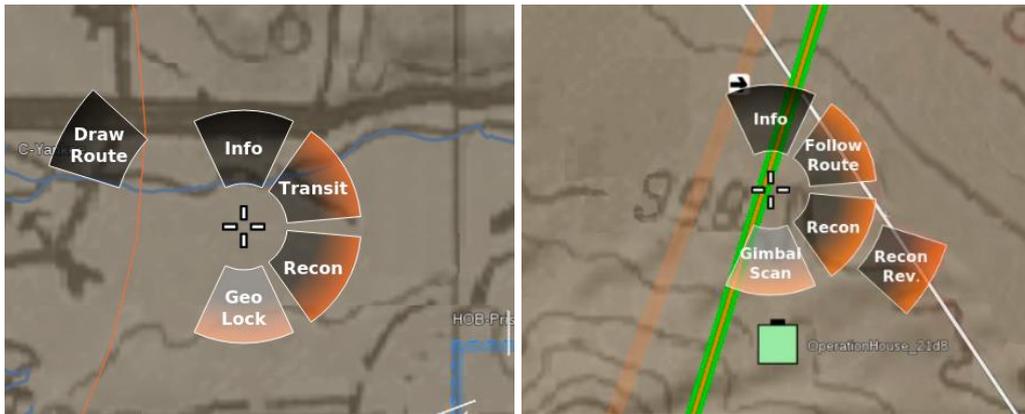


Abbildung 5-48: Kontextmenü in der Konfiguration Freier Zugriff

Für die Konfiguration geführter Zugriff wurde die Follow-Route-Funktion nicht und die manuelle Ansteuerung des Kameragimbals nur während eines Aufklärungsauftrages angeboten. Abbildung 5-49 zeigt das Kontextmenü an einem freien Punkt auf der Karte, sowie bei der Auswahl einer zu einem Auftrag zugehörigen Route. Bei letzterem ist die Möglichkeit zur Editierung der Route (Redraw Leg, Edit Route) zu sehen.



Abbildung 5-49: Kontextmenü in der Konfiguration Geführter Zugriff

Tabelle 5-9 fasst die Konfigurationen zusammen.

Tabelle 5-9: Umsetzung der Konfigurationen

Konfiguration	Bedienoberfläche
Auftragsbasierte Führung	Zugriff auf niedrigere Funktionen ist ausgeblendet
Freier Zugriff	Follow Route aktiv, Editieren von Auftragsrouten ausgeblendet, Gimbalzugriff frei
Geführter Zugriff	Follow Route ausgeblendet, Editieren von Auftragsrouten aktiv, Gimbalzugriff nur während Aufklärungsauftrag

5.3.3 Versuchsdurchführung

In diesem Abschnitt soll die Durchführung der Experimente vorgestellt werden. Dazu gehört die Auswahl der Versuchsteilnehmer sowie der Ablaufplan mit der Aufteilung zwischen Training und Messmissionen. Außerdem werden das Flugsicherheitskonzept und aufgetretene Zwischenfälle beschrieben.

5.3.3.1 Versuchsteilnehmer

Für die Experimente wurden fünf Versuchsteilnehmer ausgewählt. Es handelte sich dabei um Offiziere der Bundeswehr, die bereits erste Luftfahrterfahrung durch Lehrgänge oder Studium besaßen. Leider war es nicht möglich Versuchspersonen mit Erfahrung im Umgang mit unbemannten Luftfahrzeugen zu gewinnen. Um die Auswirkungen des auftretenden Lerneffekts auf das Messergebnis zu verringern wurden mehrere Maßnahmen getroffen. Zum einen erfolgte ein ausführliches Training des Gesamtsystems vor Beginn der Versuche. Zum anderen wurden vor dem Versuchsabschnitt jeder Konfiguration deren besondere Inhalte noch einmal zusätzlich trainiert. Außerdem wurde die den Versuchspersonen zugeteilte Reihenfolge der Konfigurationen randomisiert. Tabelle 5-10 zeigt den Überblick über Versuchsteilnehmer und Zuteilungen. Es handelt sich demnach um einen klassischen Versuchsplan mit Messwiederholung (Within-Subject-Design) nach (Hussy, Schreier, & Echterhoff, 2013).

Tabelle 5-10: Versuchspersonen und Reihenfolge der Konfigurationen

Versuchsperson	Konfigurationsreihenfolge	Alter
VP1	geführt, frei, auftragsbasiert	22
VP2	frei, auftragsbasiert, geführt	22
VP3	auftragsbasiert, frei, geführt	22
VP4	geführt, auftragsbasiert, frei	23
VP5	auftragsbasiert, geführt, frei	22

5.3.3.2 Ablauf

Der Ablaufplan für jeden Versuchsteilnehmer ist in Abbildung 5-50 dargestellt.

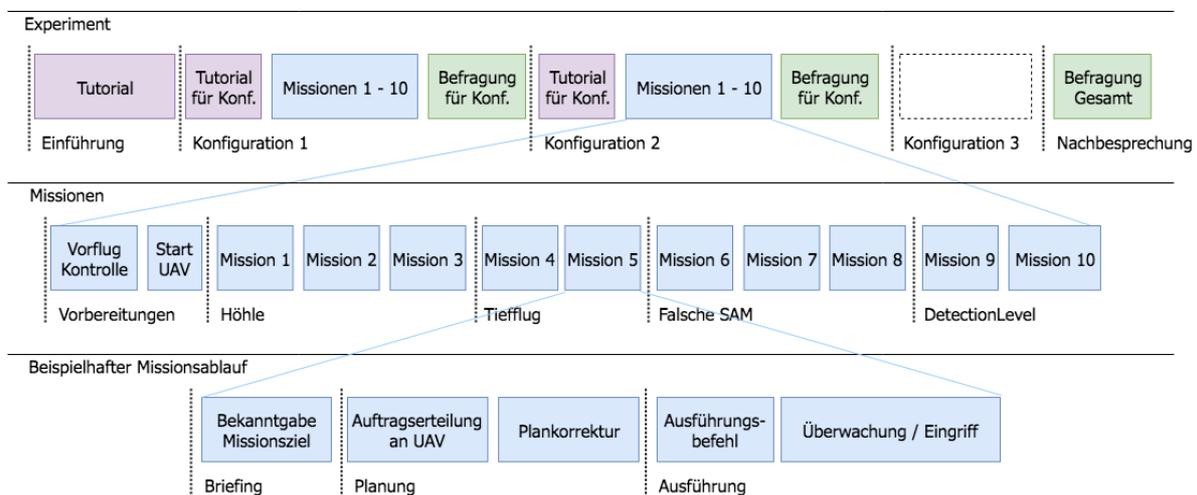


Abbildung 5-50: Ablauf Experiment

Das zu Beginn durchgeführte Tutorial setzte sich aus mehreren Blöcken zusammen. Nach der Einführung in die Ziele und den Aufbau des Experiments erfolgte eine allgemeine Einweisung in die Bedienoberfläche und das zugrundeliegende Konzept. Anschließend erfolgten eine Einweisung und ein kurzes Training für die UAV-Bedienung in einer Simulation. Nach Klärung der wichtigsten Fragen wurde den Teilnehmern die Nebenaufgabe erklärt und daraufhin die Kalibrierung der Nebenaufgabe durchgeführt. Nach einer kurzen Pause konnten sich die Teilnehmer mithilfe von zwei ausführlichen Trainingsmissionen noch einmal mit dem System vertraut machen. Die Durchführung der ersten Trainingsmission fand in der Simulation

statt während für die zweite das Fluggerät gestartet und die Mission mit dem realen UAV durchgeführt wurde.

Für den ersten Teil des Tutorials wurde die Flugdynamiksimulation des UAVs aus dem Helikoptersimulator eingesetzt. Parameter wie Fluggeschwindigkeit, Steigleistung und Wenderaten wurden auf die Werte des echten Fluggerätes eingestellt. Bei ruhiger Wetterlage verhielt sich die Simulation nahezu identisch zum realen Flug. Durch diese einfache Trainingsmöglichkeit konnten die Versuchsteilnehmer ohne Risiko den Umgang mit der Bedienoberfläche und das Verhalten des Agenten kennenlernen und vertiefen.

Für jede Konfiguration wurden vor Durchführung der Mission noch einmal die Besonderheiten erklärt und kurz trainiert. Im Anschluss absolvierten die Versuchsteilnehmer zehn Missionen. Diese bestanden in jeder Konfiguration aus drei Missionen der Missionsart Höhle, zwei Missionen der Missionsart Tiefflug, drei Missionen der Missionsart Falsche SAM und zwei Missionen der Missionsart DetectionLevel. Diese Reihenfolge wurde in allen Konfigurationen stets gleich gehalten. Anschließend füllten die Teilnehmer die Fragebögen für die gerade absolvierte Konfiguration aus. Nach einer weiteren Pause wurde die nächste Konfiguration gestartet.

Insgesamt führten die Teilnehmer demnach 30 Missionsflüge durch. Nach Abschluss aller Konfigurationen füllten die Teilnehmer die Abschlussfragebögen aus.

5.3.3.3 Flugsicherheitskonzept und Zwischenfälle

Das Flugsicherheitskonzept sah mehrere Stufen zur Minimierung der Wahrscheinlichkeit größerer Schäden vor. Zum einen fanden die Flugversuche auf dem räumlich abgetrennten Versuchsgelände der Universität der Bundeswehr in Neubiberg statt. Zu diesem hatte nur ein begrenzter Personenkreis Zutritt, welcher zusätzlich durch ein zentrales Belegungssystem über sämtliche Versuchszeiträume informiert wurde.

Technisch wurde die Flugsicherheit durch ein redundantes Steuerungssystem erhöht, das einerseits über den Autopiloten und einen der zwei Missionsdatenlinks per LTE oder Funkmodem und andererseits über das RC-Empfängersystem und den RC-Sender des Sicherheitspiloten erfolgen konnte. Über das RC-System hat der Sicherheitspilot außerdem jederzeit die Möglichkeit den Autopiloten zu übersteuern und somit die Kontrolle zu übernehmen.

Zusätzlich wurden die kritischen Phasen Start und Landung ausschließlich vom Sicherheitspiloten durchgeführt und erst in der Luft die Kontrolle an den Autopiloten und damit den Agenten sowie den Versuchsteilnehmer übergeben.

Wie bei einem realen Flug nicht anders zu erwarten, traten Zwischenfälle auf, die teilweise eine Unterbrechung des Experiments erzwangen oder sogar einen Missionsneustart erforderlich machten.

Wind: Aufgrund von starkem Wind während der Experimentalwoche, der die Fähigkeiten des Fluggerätes überstieg, und eingeschränkter Verfügbarkeit der Teilnehmer musste ein Teil der Missionen mit der Trainingssimulation durchgeführt werden. Die in Simulation durchgeführten Anteile wurden bei der Auswertung nicht berücksichtigt, so dass statt der geplanten 150 Missionen nur 139 Messungen ausgewertet wurden.

Unkontrollierter Flugabschnitt: Bei der Durchführung einer Mission wurde das Fluggerät durch eine starke Böe vom Kurs abgebracht und war nicht in der Lage diesen wieder einzufangen. Deshalb wurde das Experiment unterbrochen und die gleiche Mission neu gestartet.

5.3.4 Auswertung

In der Auswertung wird erst die Eignung des Gesamtsystems für den Realflug bewertet. Anschließend werden die Ergebnisse der Konfigurationen in den Bereichen Missionsleistung, Workload und Nutzerbewertung verglichen. Außerdem werden Beobachtungen beim Verhalten der Operateure vorgestellt.

5.3.4.1 Eignung des Systems für den Realflug

Insgesamt wurden 139 Missionen real geflogen. Die Flugzeit innerhalb der Missionen betrug 3 Stunden und 20 Minuten. Dazu ist die Wartezeit zwischen den Messungen zur Vorbereitung und für Erklärungen zu rechnen, während der das Fluggerät in der Luft kreiste. Dadurch beträgt die Gesamtflugzeit ca. 4 Stunden.

Das Softwaresystem mit dem Agenten als zentraler Einheit lief sehr stabil. Es gab keine Ausfälle in den Softwaremodulen. Der Agent errechnete in allen Fällen eine gültige Lösung. Auch die Eingriffe der Operateure wurden korrekt in die Planungsüberwachung übernommen. Bei Abweichungen vom geplanten Flugpfad durch Wind oder ungenaue Modellierung der Flugleistung im Planungsmodell traten keine Instabilitäten oder Oszillationen auf.

Die Rechenleistung des i7 Boards war stets ausreichend. Die maximal erreichte Auslastung betrug 86%, was jedoch nur in kurzen Lastspitzen bei der Initialplanung von komplexen Aufträgen auftrat. Abbildung 5-51 zeigt eine Übersicht über die Rechenzeiten des Agenten für Aufträge.

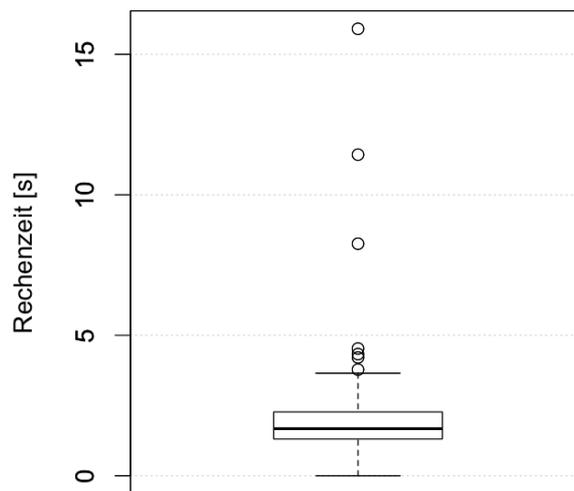


Abbildung 5-51: Rechenzeit für Aufträge

Die überwiegende Mehrheit der 200 erteilten Aufträge konnte in weniger als 4 Sekunden (Mittelwert 2,2 Sekunden) berechnet werden. In drei Fällen betrug die Planungszeit aufgrund hoher Interaktion mit dem Benutzer während der Planung bis zu 16 Sekunden.

Insgesamt kann das System als ausreichend geeignet für den Einsatz im Realflug betrachtet werden.

5.3.4.2 Vergleich der Konfigurationen

Die drei untersuchten Konfigurationen sollen in diesem Abschnitt in den Bereichen Missionsleistung, Workload und Nutzerbewertung verglichen werden.

5.3.4.2.1 Missionsleistung

Die Missionsleistung wird im Folgenden in den Bereichen Missionszeit und Zielerreichung untersucht. Für letzteres wird Gütemaß definiert, welches die unterschiedlichen Missionsziele berücksichtigt.

Missionszeit:

Die Missionszeit wird in die Bereiche Planungszeit und Ausführungszeit unterteilt. Dabei ist die Planungszeit als Zeitraum zwischen Freigabe der Mission durch den Experimentator und Ausführungsbefehl des Operators an das UAV festgelegt. Sie beinhaltet die Analyse der Situation durch den Operator, sowie die Interaktionen mit dem System zur Übermittlung der Aufträge. Die Ausführungszeit ist die Zeit zwischen Ausführungsbefehl und Missionsabschluss durch Erreichen des Missionsziels. Die Summe aus Planungszeit und Ausführungszeit ist die Missionszeit.

Insgesamt wurden in der auftragsbasierten Konfiguration 47 Missionen und in den Konfigurationen freier Zugriff und geführter Zugriff 46 Missionen durchgeführt. Die Auswertung der Missionszeit führt zu einem Durchschnitt über alle Konfigurationen von 86 Sekunden (Standardabweichung 38 Sekunden). Die Aufteilung nach Konfiguration ist in Abbildung 5-52 abgebildet und zeigt einen klaren Vorteil für die rein auftragsbasierte Konfiguration (ABF), welche als Basisvergleich diente. Dies ist durch die notwendige längere Planungszeit mit den anderen Konfigurationen zu erklären, wie im Folgenden gezeigt wird, da diese zusätzlichen Interaktionsaufwand für Zugriffe auf Automationsfunktionen benötigten.

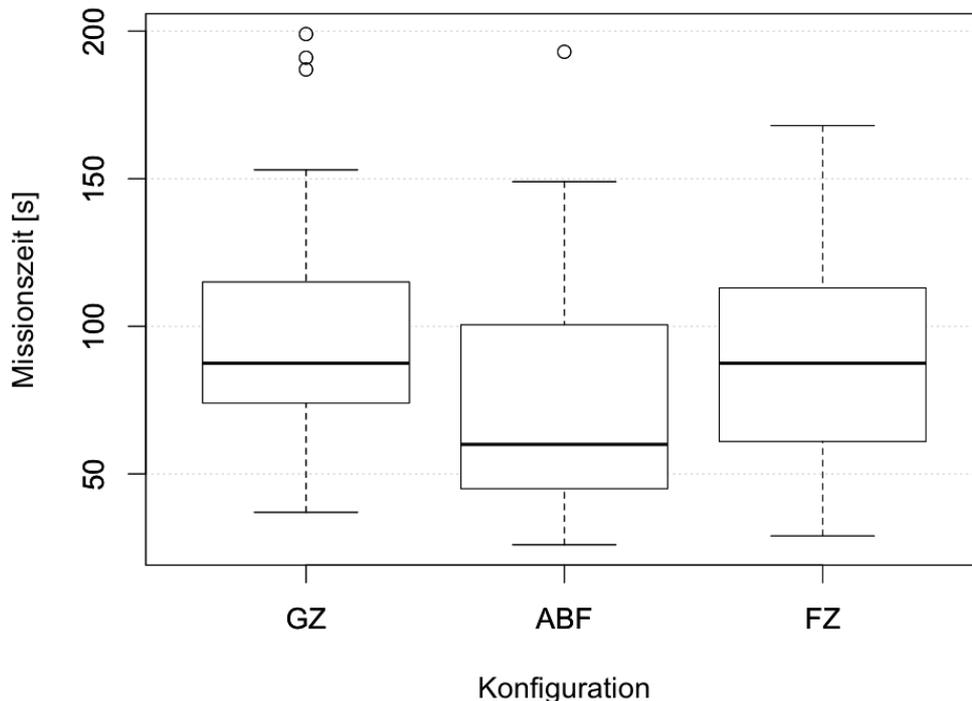


Abbildung 5-52: Missionszeitverteilung nach Konfiguration

Bei der Ausführungszeit ist hingegen nur ein vernachlässigbarer Unterschied zwischen den Konfigurationen beobachtbar. Dies ist in Abbildung 5-53 dargestellt.

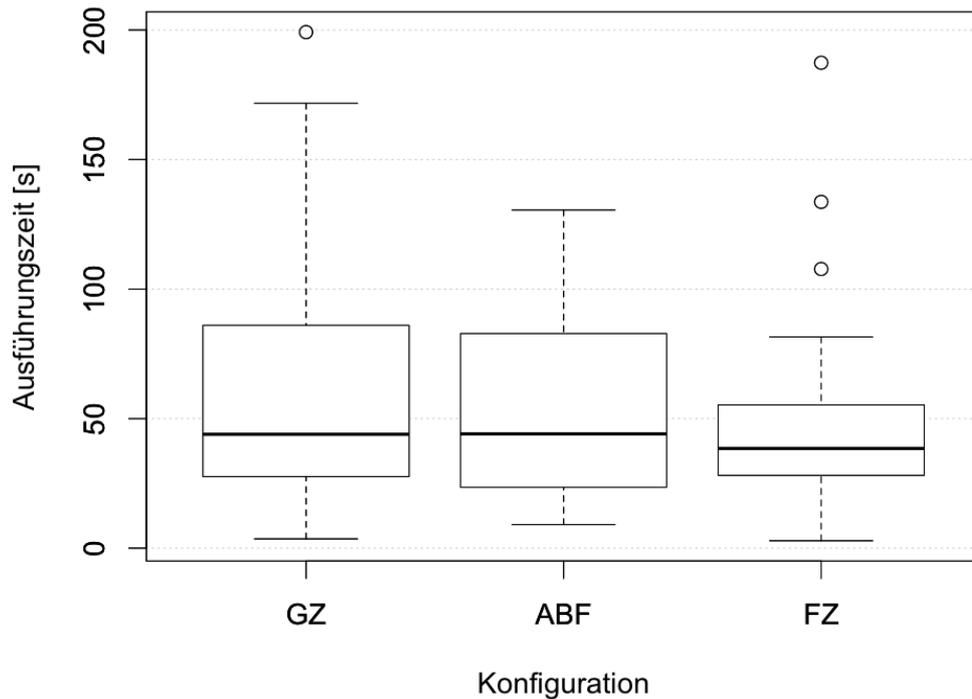


Abbildung 5-53: Ausführungszeitverteilung nach Konfiguration

Da sich die Ausführungszeit im Verhältnis zur Gesamtmissionszeit in Missionen mit längerer Dauer erhöht, können die Konfigurationen als gleichwertig hinsichtlich der Missionszeit gewertet werden.

Zielerfüllung:

Da in den einzelnen Missionen unterschiedliche Bewertungskriterien gültig sind, wurde ein gemeinsames Gütemaß mit mehreren Kategorien entwickelt, um die Missionsleistung ermitteln zu können. Dabei sind die drei Bewertungskategorien Ressourcen, Risiken und Ergebnis vertreten. Tabelle 5-11 zeigt die Missionsleistungsanteile und deren Anwendbarkeit für jeden Missionstyp.

Tabelle 5-11: Einfließende Missionsleistungsanteile für Zielerfüllung der Missionsvignetten

Anteil	Art	Höhle	Tiefflug	Falsche SAM	Detection Level
Missionszeit	Ressource			+	
Bedrohungszeit	Risiko	+	+	+	+
Ziel im Sichtbereich	Ergebnis	+		+	+
Ziel aus vorgeg. Winkel	Ergebnis	+			
Detection Level Verletzung	Risiko	+		+	+
Flughöhe erreicht	Ergebnis		+		

Die Missionszeit ergibt sich aus der Summe der Planungszeit und der Ausführungszeit. Als Bedrohungszeit wird der Zeitraum gezählt, in denen sich das UAV innerhalb der Wirkreichweite feindlicher Einheiten befindet. Ist das Aufklärungsziel nicht im Sichtbereich des Sensors aufgetaucht, so werden Aufklärungsmissionen als nicht erfüllt angenommen. Ebenfalls als Zeit wird der Wert „Ziel aus vorgeg. Winkel“ angegeben. Hierbei wird gezählt wie lange das UAV mit aktiver Kamera und einer maximalen Winkelabweichung von 45° das Ziel im Blickfeld hatte. Die Verletzung des Detection Level wird aus der Summe der Zeit gebildet, in denen sich das UAV näher als die erlaubte DL2-Distanz von 200 m an einem

Aufklärungsziel befand. Der Anteil „Flughöhe erreicht“ ermittelt sich aus der mittleren Abweichung von der vorgegebenen Zielhöhe in der Nähe des Zielpunkts.

Die jeweiligen erreichten Werte in den einzelnen Konfigurationen wurden über alle Teilnehmer und Missionen gemittelt und auf den erreichten Wert des geführten Zugriffs (GZ) normiert. Außerdem wurde das Vorzeichen so gewählt, dass ein größerer Wert ein besseres Ergebnis darstellt. Daraus ergibt sich Abbildung 5-54.

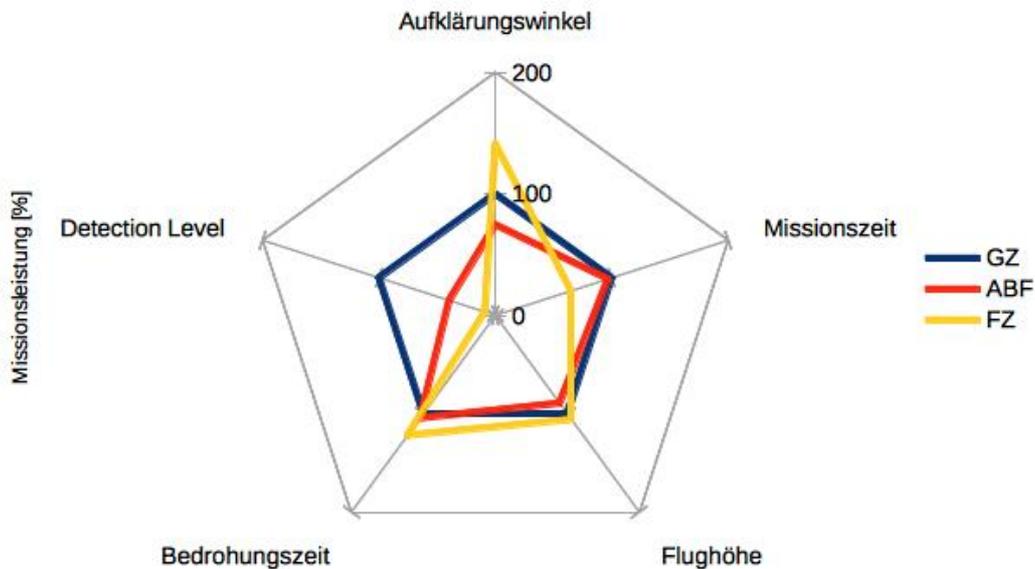


Abbildung 5-54: Gemittelte Missionsleistung auf Konfiguration GZ bezogen

Die Zeit innerhalb des vorgesehenen Aufklärungswinkels ist beim freien Zugriff (FZ) am größten. Die auftragsbasierte Führung (ABF) erreicht nur 75% des Wertes des geführten Zugriffs. Die Missionszeit des freien Zugriffs ist deutlich länger, was auf die kompliziertere Steuerung zurückzuführen ist. Die beiden anderen Konfigurationen unterscheiden sich nur minimal. Der freie Zugriff ist allerdings beim Einhalten einer niedrigen Flughöhe leicht besser als der geführte Zugriff, welcher wiederum besser abschneidet, als die auftragsbasierte Führung. Bei der Zeit innerhalb der Reichweite feindlicher Einheiten erreicht der geführte Zugriff einen leicht niedrigeren Wert, als die auftragsbasierte Führung. Dies lässt sich vor allem durch die sehr ungünstig auftretenden Schwierigkeiten des Fluggerätes mit starkem Wind erklären. Das Detection Level hingegen wird von der auftragsbasierten Konfiguration weniger oft und vom freien Zugriff sehr selten eingehalten. Insgesamt lieferte der freie Zugriff in zwei der fünf Kategorien die beste Leistung. Das Konzept des geführten Zugriffs erbrachte nur in einer der Kategorien die beste Leistung, erlitt jedoch im Gegensatz zum freien Zugriff in keiner der übrigen Kategorien Leistungseinbrüche im Vergleich mit der auftragsbasierten Führung.

5.3.4.2.2 Workload

Abbildung 5-55 zeigt die Werte der Workload für die drei Konfigurationen auftragsbasierte Führung (ABF), freier Zugriff (FZ) und geführter Zugriff (GZ) aus der Nebenaufgabe.

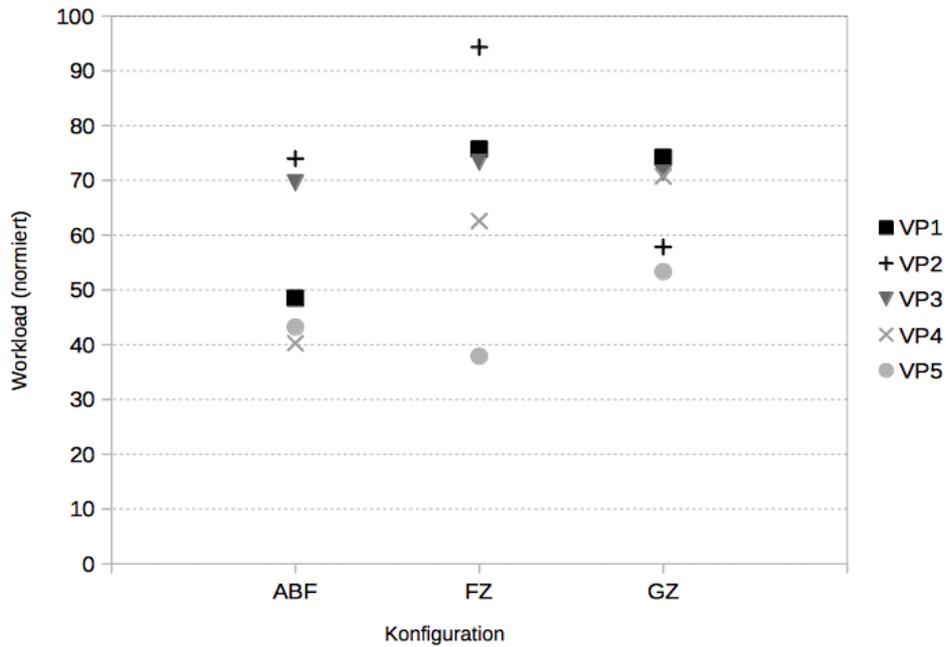


Abbildung 5-55: Workloadwerte nach Nebenaufgabe

Wie zu erwarten, ist die Workload der auftragsbasierten Konfiguration niedriger als die der anderen Konfigurationen. Jedoch ist auch eine Reduzierung des Wertes vom freien Zugriff zum geführten Zugriff beobachtbar.

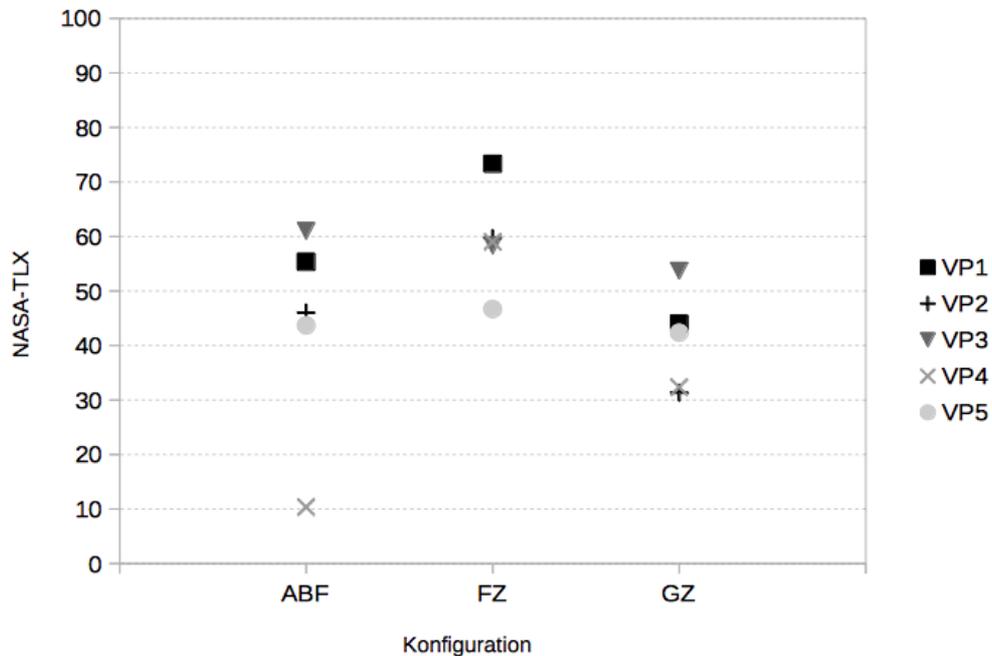


Abbildung 5-56: Workloadwerte nach NASA-TLX

Abbildung 5-56 stellt die Ergebnisse des NASA-TLX Fragebogens, also die subjektiv empfundene Workload dar. Ein Trend zu niedrigeren TLX-Werten des geführten Zugriffs ist erkennbar. In der durch den Fragebogen ermittelten subjektiven Einschätzung der Versuchsteilnehmer wird anscheinend die gefühlte Belastung in dieser Konfiguration als niedrig eingestuft.

5.3.4.2.3 Bewertung durch die Operateure

In den Fragebögen hatten die Teilnehmer die Möglichkeit die drei Konfigurationen anhand einer Likert-Skala zu bewerten und hinsichtlich der Eignung für den Einsatz anzuordnen. Zusätzlich konnten sie die Benutzeroberfläche und das Gesamtsystem bewerten. Zur Validierung des experimentellen Vorgehens wurde außerdem die Qualität des Tutorials erfragt. Die Ergebnisse werden in diesem Abschnitt vorgestellt.

Nutzerbewertung und Eignung für den Einsatz

Die Nutzerbewertung für die unterschiedlichen Konfigurationen wurde über einen Fragebogen mit Likert-Skala und über eine direkte Einordnung für die Eignung in realen Einsätzen ermittelt. Dazu wurde nach Abschluss aller Missionen einer Konfiguration der nachfolgende Fragebogen zur Bewertung vorgelegt. Die Ergebnisse der einzelnen Fragebögen sind in Abbildung 5-57 gesammelt dargestellt. Für jeden Eintrag eines Teilnehmers in den Fragebogen ist hier der Anfangsbuchstabe der entsprechenden Konfiguration aufgeführt (A: Auftragsbasierte Führung, F: Freier Zugriff, G: Geführter Zugriff).

Mit dieser Konfiguration war die UAV-Führung:

umständlich		A F		F	FF GG	A F G	AAA GG	einfach
unverständlich		F	F	A	AA FFF GG	AA G	GG	selbsterklärend
unzweckmäßig	A	A	AA F	A FF	FF G	GG	GG	zweckmäßig

Bestehende Aufgaben bzw. Routen umzuplanen war

umständlich	AA F	A	A	F	A FFF G	GG	GG	einfach
unverständlich	A	A	A F	AA F	FFF G	GG	GG	selbsterklärend
unzweckmäßig	A	F	AAA	A F	FFF	GG	GGG	zweckmäßig

Trat bei ihnen Unterforderung mit plötzlich hoher Belastung auf?

ja, oft			F G	F G	A F	AAA F G	A F GG	nein, nie
---------	--	--	--------	--------	--------	---------------	--------------	-----------

Trat bei ihnen kurzfristige Überforderung auf?

ja, oft			F G	A F G	F	AA FF G	AA GG	nein, nie
---------	--	--	--------	-------------	---	---------------	----------	-----------

Trat bei ihnen länger andauernde Überforderung/Ermüdung auf?

ja, oft				F	A F GG	A FF G	AAA F GG	nein, nie
---------	--	--	--	---	--------------	--------------	----------------	-----------

Das Planen und Durchführen der Mission fiel mir schwer.

ja		A F		F	FF G	A F GG	AAA GG	nein
----	--	--------	--	---	---------	--------------	-----------	------

Ich bin mit dem Gesamtsystem zufrieden.

nein		A	A	AA FF	F	A FF GGGG	G	ja
------	--	---	---	----------	---	-----------------	---	----

Abbildung 5-57: Bewertung der Konfigurationen durch die Operateure

Tendenziell wurde der geführte Zugriff als einfacher, selbsterklärender und zweckmäßiger sowie besser in den Bereichen Missionsplanung, Missionsdurchführung und Gesamtzufriedenheit als die anderen Konfigurationen bewertet. Nicht überraschend ist die bessere Bewertung des geführten Zugriffs bei der Umplanung von Aufträgen und Routen, da diese Eingriffsarten in der Bedienoberfläche einfacher zu bewerkstelligen waren als in den anderen Konfigurationen. Interessant ist, dass beim freien und geführten Zugriff gegenüber der

auftragsbasierten Führung eher Phasen der höheren Belastung empfunden werden, was zu erwarten war, jedoch alle drei Konfigurationen insgesamt nicht als überfordernd oder ermüdend eingeschätzt wurden. Die vollständigen Fragebögen sind im Anhang abgebildet.

Die Einsortierung der Konfigurationen in eine Reihenfolge für die Eignung in realen Einsätzen erfolgte nach Absolvierung aller Konfigurationen durch die Teilnehmer. Abbildung 5-58 stellt die Empfehlung der Versuchsteilnehmer für den realen Einsatz dar. Die rein auftragsbasierte Konfiguration ist von allen Teilnehmern am schlechtesten bewertet worden. Dies ist nicht verwunderlich, da die Missionen absichtlich gewählt wurden, um die Schwächen dieses Ansatzes herauszustellen und nur als Basisvergleich dienen sollten. Die Konfiguration des freien Zugriffs wurde von 4 Teilnehmern an zweiter Stelle eingeordnet und die des geführten Zugriffs an erster. Lediglich ein Teilnehmer bevorzugte den freien vor dem geführten Zugriff, da ersterer ihm, laut Kommentar im Fragebogen, flexibler erschien.

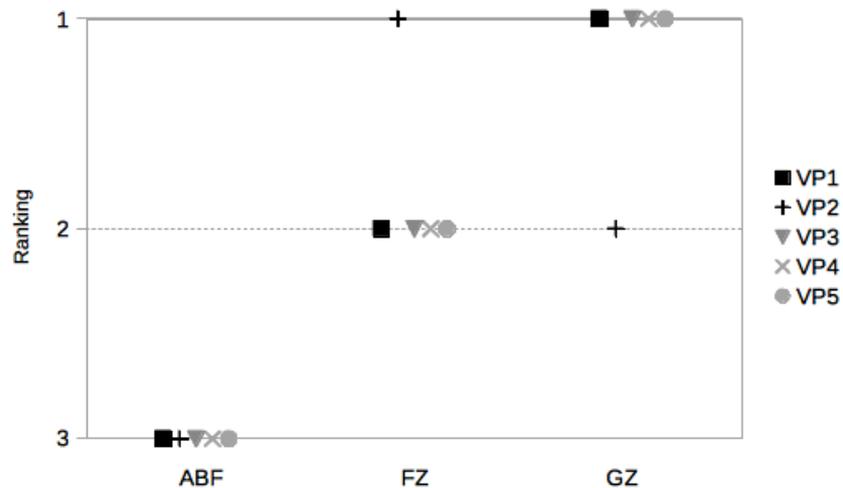


Abbildung 5-58: Einsortierung in bevorzugte Reihenfolge für den realen Einsatz

Bewertung des Tutorials

Das von jedem Teilnehmer zu Anfang des Versuchs durchgeführte Tutorial wurde als förderlich und größtenteils angemessen bewertet, wie in Abbildung 5-59 zu sehen ist. Eine Versuchsperson bevorzugte ein ausführlicheres Training.

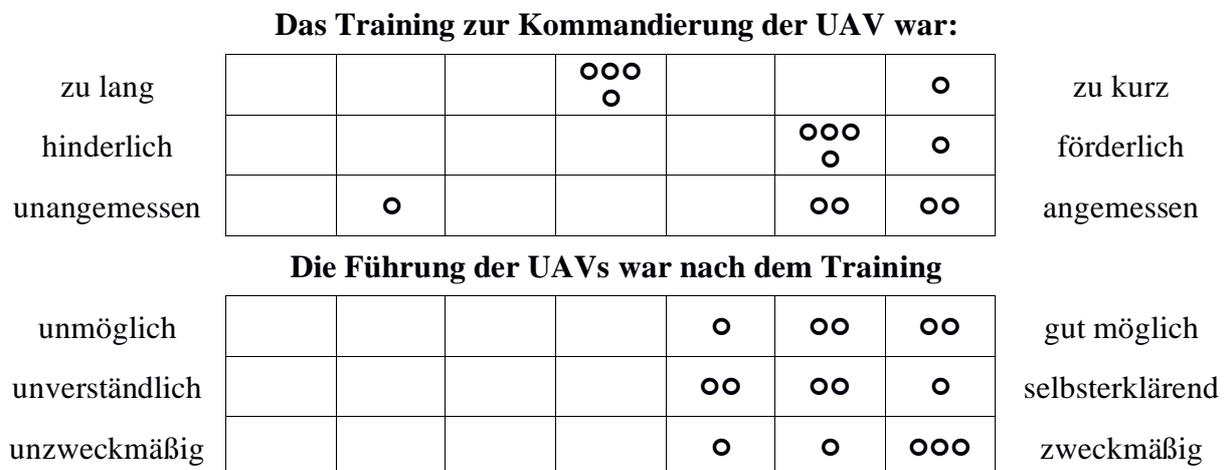


Abbildung 5-59: Bewertung Tutorial

Trotz dieses Umstands wurde die Führung der UAVs mit den zur Verfügung stehenden Funktionen nach dem Tutorial laut Aussage aller Versuchsteilnehmer gut möglich, selbsterklärend und zweckmäßig.

Bewertung der Benutzeroberfläche

Die Benutzeroberfläche wurde sehr positiv bewertet. Sowohl die Darstellung der Informationen als auch die Systembedienung erlangten fast ausschließlich hohe Bewertungen (siehe Abbildung 5-60).

Die Darstellung der Informationen ist							
unübersichtlich				○	○○○	○	übersichtlich
abschreckend				○	○○○	○	ansprechend
Der Inhalt der dargestellten Informationen ist							
hinderlich				○	○○	○○	hilfreich
unverständlich				○	○	○○○	verständlich
Die Systembedienung ist							
unintuitiv		○		○	○○○		intuitiv
unverständlich				○	○○	○○	verständlich
schwer				○	○	○○○	einfach
aufwendig				○	○○	○○	zeitsparend
unangenehm				○	○○	○○	angenehm

Abbildung 5-60: Bewertung Systembedienung

Bewertung des Gesamtsystems

Wie in Abbildung 5-61 zu erkennen ist, wurde die Experimentalumgebung und das Gesamtsystem überwiegend positiv bewertet.

	nein			ja		
Realitätsnahe Darstellung			○	○○	○○	
Keine Verhaltensänderung aufgrund Beobachtung		○	○	○		○○
UAV-Verhalten vorhersehbar	○			○	○○	○
Korrekte Auftragsausführung				○○	○○	○
Zufriedenheit mit Gesamtsystem				○	○○○	○

Abbildung 5-61: Bewertung Gesamtsystem

Die Vorhersehbarkeit des UAVs wurde leicht niedriger bewertet als das restliche System, jedoch übertrafen die Ergebnisse des Realfluges die Ergebnisse des Simulatorexperiments. Dies kann auf die entfallenden Kommandantentätigkeiten und die fehlenden weiteren UAVs

zurückgeführt werden. Bei steter Beobachtung des UAVs entfallen Überraschungseffekte, die durch den Wechsel zwischen den UAVs auftreten können.

5.3.4.2.4 Operateurverhalten

Trotz der Einschränkungen der rein auftragsbasiert geführten Konfiguration, gelang es einigen Operateuren die Mission Detection-Level fehlerfrei abzuschließen. Durch geschicktes Ausnutzen der Hold-Funktion, in der der Agent die Ausführung des Auftrags pausiert und einen Loiterkreis fliegt, konnten die Operateure den bedrohten Teil der Route mit dem Gimbal abfahren ohne in den gefährdeten Bereich einzufliegen. Zwar wurde beim Pausieren des Auftrags auch der Gimbal angehalten, allerdings konnte durch Abwarten des Zeitpunkts, an dem das UAV den halben Loiterkreis zurückgelegt hatte, und anschließendem Fortsetzen des Auftrags erreicht werden, dass das UAV den Kreis beendete und sich damit nicht vorwärts bewegte, während der Gimbal weiter der aufzuklärenden Route folgte. Dies konnte solange wiederholt werden, bis die Route vollständig aufgeklärt war. Dieses Vorgehen geschah auf Kosten der Aufklärungsqualität, die durch die größere Entfernung entsprechend reduziert wurde. Da die Benennung des Aufklärungsabstand als wichtiger Teil der Missionserfüllung im Briefing gefehlt hatte, war die Vorgehensweise jedoch legitim. Dies zeigt die Improvisationsfähigkeit menschlicher Operateure und ist als weiterer Grund aufzufassen, dem Menschen einen Zugriff auf niedrigere Automationsfunktionen zur Steigerung der Flexibilität und Anpassung an neue Situationen in der Mission zu ermöglichen. Letztlich wurde durch diesen Fall auch eine Schwäche des Experimentaldesigns gezeigt. Hätte die aufzuklärende Route mehrere Bedrohungen enthalten, oder wäre die Bedrohung mittig in der Route positioniert gewesen, wäre das Vorgehen gescheitert, da bei zu großer Entfernung zwischen Gimbal und Ziel das automatisierte Abfahren der Route ebenfalls pausiert wird.

5.3.5 Ergebnis

Die Eignung des Gesamtsystems für den Realflug wurde mit dem erfolgreichen Abschluss der Experimente bestätigt. Durch ca. 60 Missionen mit einer Gesamtflugdauer von zwei Stunden und Vorbereitungsflügen mit einer Gesamtflugdauer von ca. sechs Stunden, in denen die unterschiedlichen Fähigkeiten des Systems eingesetzt wurden, ist der Nachweis mehr als ausreichend erbracht. Jedoch zeigten sich Schwächen des Fluggerätes vor allem in der hohen Windanfälligkeit, was einen Einsatz bei Windgeschwindigkeiten von 6 m/s erschwerte und ab 10 m/s unmöglich machte. Dabei ist die Agentensoftware sehr robust gegen Abweichungen vom vorab berechneten Flugplan. In allen Situationen wurde der Plan zuverlässig durchgeführt und die Situation korrekt bewertet.

Das Konzept des geführten Zugriffs hat in den Experimenten verlässlich funktioniert und wurde von den Operateuren gut angenommen. Im Vergleich mit der rein auftragsbasierten Führung erlaubt es eine ähnlich hohe Flexibilität bei der Durchführung von Missionen und damit eine ähnlich und teilweise höhere Missionsleistung als der freie Zugriff auf alle Automationsfunktionen. In diesem Vergleich erzeugt das Konzept des geführten Zugriffs eine geringere Workload. Auch die subjektive Bewertung der Konfigurationen spricht für den Einsatz variabler Automationsgrade insgesamt und für den geführten Zugriff als Implementierungskonzept im Speziellen.

Die Einschränkungen der auftragsbasierten Führung mögen in diesen Versuchen künstlich erscheinen, da fehlende Automationsfunktionen für die entsprechenden Fälle nachimplementiert werden hätten können. Sie demonstrieren jedoch, wie ein System gestaltet werden kann, um in realen Szenarien auch im n+1 Fall eine maximale Missionsleistung zu ermöglichen.

6 Zusammenfassung und Ausblick

In dieser Arbeit wurde ein Systemkonzept zur Nutzung variabler Automationsgrade für hochautomatisierte technische Systeme mit besonderem Schwerpunkt auf unbemannten Luftfahrzeugen für militärische Aufklärung vorgestellt und untersucht. Dabei wurde die Notwendigkeit für variable Automationsgrade in diesem Anwendungsbereich und deren Vorteile, sowie die Herausforderungen hinsichtlich Eingliederung in das Arbeitssystem, der Mensch-Maschine-Schnittstelle und der Implementierung erarbeitet. Zur Vermeidung der Nachteile eines freien Zugriffs durch den Nutzer auf Automationsfunktion beinhaltet das Konzept den Zugriff auf Automationsfunktionen nur geführt über einen Plan als Kommunikationsmittel. Es vermeidet oder reduziert dadurch die angesprochenen Probleme bei der Nutzung von variablen Automationsgraden und die damit verbundenen Nachteile. Der Operateur wird durch die Eingabe eines Auftrages in das System zur Preisgabe seiner Intention gezwungen, was es dem System ermöglicht, besser bei der Umsetzung zu unterstützen.

Der für das Konzept notwendige kognitive Softwareagent wurde als regelbasiertes System mit einer HTN-Planungsfähigkeit innerhalb der Drools-Engine umgesetzt. Diese wurde aus mehreren Softwarelösungen für kognitive Architekturen aufgrund ihrer Flexibilität und einfachen Bedienbarkeit ausgewählt. In den finalen Agenten fanden Konzepte aus anderen kognitiven Architekturen, wie beispielsweise Beliefs-Desires-Intentions (BDI) oder der OODA-Loop Eingang. Die Analysefähigkeit des regelbasierten Systems erwies sich als geeignet zukünftig auftretende Probleme durch die Voraussimulation der Umgebung zu erkennen und den Operateur zu warnen, bzw. sogar Handlungsvorschläge zu generieren. Dies entspricht der angestrebten Fähigkeit die Preisgabe der Intention des Operateurs optimal zu dessen Unterstützung zu nutzen. Dabei war die Implementierung performant genug, um auch auf einem Onboard-Rechner eines UAVs nahezu Echtzeitergebnisse zu erzielen.

Der Softwareagent wurde mit den notwendigen Teilsystemen in einen Helikoptersimulator und in einen Experimentalflieger integriert. Das Systemkonzept wurde im Simulatorexperiment bei einem Einsatz von drei UAVs aus einem Helikoptercockpit mit Piloten der Bundeswehr erprobt. Die Führung der UAVs übernahm dabei der Kommandant des Hubschraubers (Manned-Unmanned-Teaming). Bei der Nutzung in fünf Missionen unterschiedlicher Einsatzarten wurden verschiedene Aspekte des Systemkonzepts untersucht. Das Gesamtsystem und das Konzept des geführten Zugriffs wurde durch die Operateure als tauglich für die Nutzung in realistischen Missions- und Simulationsumgebungen bewertet. Zusätzlich wurde das Konzept im Realflugexperiment beim Einsatz einer Aufklärungsdrohne aus einer Bodenkontrollstation heraus erprobt. Ziel war die Untersuchung der Eignung für den realen Betrieb und der Vergleich mit den Nutzungskonfigurationen auftragsbasierter Führung und freiem Zugriff auf alle Automationsfunktionen. Die Probanden absolvierten dazu aus vier unterschiedlichen Missionsarten zehn Missionen je Konfiguration. Dabei konnte ein Trend erkannt werden, dass der geführte Zugriff unter den gegebenen Bedingungen sowohl die Missionsleistung erhöhen kann als auch die Workload der Nutzer reduzieren kann. Auch die technische Eignung der Softwarearchitektur für reale Flüge wurde bestätigt.

Für zukünftige Untersuchungen bieten sich interessante Punkte, die in der vorliegenden Arbeit nicht berücksichtigt werden konnten. Darunter fallen eine bessere Integration in ein Assistenzsystem, das beispielsweise mit einer Absichtserkennung aus aktueller Situation und Operateurverhalten bei der korrekten Eingabe der Aufträge unterstützt, um diese kritische Voraussetzung des Konzepts zu sichern. Zusätzlich wäre es interessant über die Möglichkeit der Workloadanpassung dem Operateur je nach Belastung mehr oder weniger Eingriffsmöglichkeiten zu bieten und die Auswirkungen zu untersuchen. Die Einsortierung des Agenten auf der Seite der Tools im Arbeitssystem erlaubt diesem nur eingeschränkt selbständig zu handeln. Eine interessante Fragestellung wäre die Aufweichung dieser Prämisse und die

Untersuchung der Auswirkungen eines selbständig handelnden Agenten auf die Zusammenarbeit mit dem Operateur.

Diese Arbeit hat dargestellt, dass ein variabler Automationsgrad eine Grundvoraussetzung für in der Realität eingesetzte hochautomatisierte militärische Systeme ist. Der geführte Zugriff bietet dazu ein geschlossenes Systemkonzept.

A Literaturverzeichnis

- Air Accident Investigation Unit (Belgium). (2017). Safety Investigation Report. Accident to a UAV navigation Atlantic /Oculus at Dizy-Le-Gros, France. Federal Public Service Mobility and Transport, Brüssel.
- Annett, J. (2003). Hierarchical Task Analysis. In: Hollnagel, E. (Hrsg.), Handbook of Cognitive Task Design. Erlbaum, Mahwah.
- Behymer, Kyle, Clayton Rothwell, Heath Ruff, Michael Patzek, Gloria Calhoun, Mark Draper, Scott Douglass, Derek Kingston, and Doug Lange. 2017. Initial Evaluation of the Intelligent Multi-UxV Planner with Adaptive Collaborative/Control Technologies (IMPACT). Beavercreek.
- Billings, C. E. (1991). Human-centered aircraft automation: A concept and guidelines. Technical Memorandum. NASA Ames Research Center, Moffett Field.
- Billings, C. E. (1997). Aviation Automation: The Search for a Human-Centered Approach. Lawrence Erlbaum Associates, Mahwah.
- BMVg. (1998) C2-221/0-0-2891 Tarnen und Täuschen (ehemals ZDv 3/710). Amt für Heeresentwicklung I 1, Berlin.
- Boehm, F., Schneemilch, S., & Schulte, A. (2013). The Electronic Camera Gimbal. AIAA Infotech@ Aerospace Conference, Boston.
- Brand, Y. (2013). Konzipierung und Implementierung einer Mensch-Maschine-Schnittstelle für einen Transporthubschraubersimulator. Masterarbeit. Universität der Bundeswehr München, Neubiberg.
- Brand, Y., & Schulte, A. (2018). Design and Evaluation of a Workload-Adaptive Associate System for Cockpit Crews. In Engineering Psychology and Cognitive Ergonomics. HCI International 2018, Las Vegas.
- Brüggenwirth, S. (2014). Entwicklung einer kognitiven Systemarchitektur mit zentraler Ontologie und spezifischen Algorithmen. Dissertation. Universität der Bundeswehr München, Neubiberg.
- Clauß, S., & Schulte, A. (2014). Task Delegation in an Agent Supervisory Control Relationship. Capability Awareness in a Cognitive Agent. In 2014 IEEE International Conference on Systems, Man, and Cybernetics (SMC), San Diego.
- Clough, B. T. (2002). Unmanned aerial vehicles: Autonomous control challenges, a researcher's perspective. In Cooperative Control and Optimization. Applied Optimization, vol 66. Springer, Boston.
- Cotting, M. C. (2011). UAV Performance Rating Scale Based on the Cooper-Harper Piloted Rating Scale. In 49th AIAA Aerospace Sciences Meeting Including the New Horizons Forum and Aerospace Exposition, Orlando.
- Debernard, S., Vanderhaegen, F., & Millot, P. (1992). An Experimental Investigation of Dynamic Allocation of Tasks between Air Traffic Controller and A.I. Systems. In IFAC Symposia Series, Analysis, Design and Evaluation of Man-Machine Systems 1992, Pergamon.

- Denk, E., Clauß, S., Borchers, A., Werner, J., & Schulte, A. (2015). Experimental Evaluation of Varying Feedback of a Cognitive Agent System for UAV Mission Management. In 18th International Symposium on Aviation Psychology, Dayton.
- DIN 19233. (1998). DIN V 19233:1998-07, Leittechnik - Prozeßautomatisierung - Automatisierung mit Prozeßrechensystemen, Begriffe.
- Dorai, C., & Venkatesh, S. (2003). Bridging the Semantic Gap with Computational Media Aesthetics. *Multimedia, IEEE*, vol. 10 (2).
- Endsley, M. R. (1996). *Automation and Situation Awareness. Automation and Human Performance: Theory and Applications*, Mahwah.
- Farr, T. G., et al. (2007), The Shuttle Radar Topography Mission, *Rev. Geophys.*, 45, RG2004.
- Fitts, P. M. (Ed.). (1951). *Human engineering for an effective air navigation and traffic control system*. Ohio State University, Columbus.
- Forgy, C. L. (1982). Rete: A fast algorithm for the many pattern/many object pattern match problem. *Artificial Intelligence*, vol. 19(1). Department of Computer Science, Carnegie-Mellon University, Pittsburgh.
- Friedell, M. (1967). *On the Structure of Shared Awareness. Working Papers of the Center for Research on Social Organization #27*, Baltimore.
- Fritzsche, T. (2016). *Experimentelle Untersuchung von Bedienkonfigurationen mit variablen Automationsgraden hinsichtlich Workload. Masterarbeit. Universität der Bundeswehr München, Neubiberg.*
- Greensteins, J. S., & Lam, S. T. (1985). An experimental study of dialogue-based communication for dynamic human-computer task allocation. In *International Journal of Man-Machine Studies*, vol. 23(6), Virginia.
- Gurney, K. (1997). *An Introduction to Neural Networks*. UCL Press Limited, London.
- Honecker, F., & Schulte, A. (2017). *Kognitive und Workload-adaptive Unterstützung von Hubschrauberpiloten in Multi-UAV Missionen. Kognitive Systeme 2017-1*, Neubiberg.
- Huang, H. (2004). *Autonomy Levels for Unmanned Systems (ALFUS) Framework Volume I: Terminology*. National Institute of Standards and Technology, Gaithersburg.
- Huang, H., & Messina, E. (2007). *Autonomy Levels for Unmanned Systems (ALFUS) Framework Volume II: Framework Models*. National Institute of Standards and Technology, Gaithersburg.
- Hussy, W., Schreier, M., & Echterhoff, G. (2013). *Forschungsmethoden in Psychologie und Sozialwissenschaften*. Springer, Berlin.
- IBM Corporation. (2012). *IBM Watson : Next Generation Cognitive System. White Paper*. Somers.
- Johannsen, G. (1993). *Mensch-Maschine-Systeme*. Springer, Berlin Heidelberg.
- Kaber, D. B., & Endsley, M. R. (1997). Out-of-the-loop performance problems and the use of intermediate levels of automation for improved control system functioning and safety. *Process Safety Progress*, vol. 16(3).

- Kaber, D. B., & Endsley, M. R. (2004). The effects of level of automation and adaptive automation on human performance, situation awareness and workload in a dynamic control task. *Theoretical Issues in Ergonomics Science*, vol. 5(2).
- Kingston, G., & Martell, C. (2004). Degrees of Shared Awareness. Naval Postgraduate School Dept. of Computer Science, Monterey.
- Knowles, W. B. (1963). Operator Loading Tasks. *Human Factors: The Journal of Human Factors and Ergonomics Society*, vol. 5(2).
- Kriegel, M. (2012). Wissensbasierte Konfiguration eines unbemannten Fluggerätes als Architekturansatz zur kognitiven Flugführung. Dissertation. Universität der Bundeswehr München, Neubiberg.
- 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 Conference*. Boston.
- Meister, D. (1987). Systems design, development and testing. In G. Salvendy (Ed.), *Handbook of Human Factors*. Wiley, New York.
- Meitinger, C. (2008). Kognitive Automation zur kooperativen UAV-Flugführung. Dissertation. Universität der Bundeswehr München, Neubiberg.
- Miller, C., Goldman, R., & Funk, H. (2004). A playbook approach to variable autonomy control: Application for control of multiple, heterogeneous unmanned air vehicles. *Proceedings of FORUM 60, the Annual Meeting of the American Helicopter Society*, vol. 3, Baltimore.
- NASA. (1986). NASA TLX: Task Load Index.
- National Transportation Safety Board. (1973). Aircraft Accident Report File No. 1-0016. Washington DC.
- Nau, D. S., Au, T.-C., Ilghami, O., Kuter, U., Murdock, J. W., Wu, D., & Yaman, F. (2003). SHOP2 : An HTN Planning System. *Journal of artificial intelligence research*, vol. 20.
- O'Donnell, R. D., & Eggemeier, F. T. (1986). Workload assessment methodology. In *Handbook of perception and human performance*, vol.2. John Wiley & Sons , Oxford.
- Ogden, M. G. D., Levine, M. J. M., & Eisner, M. E. J. (1979). Measurement of Workload by Secondary Tasks. *Human Factors*, vol. 21(5), 529–548.
- Olsen, R. O., & Goodrich, M. A. (2003). Metrics for Evaluating Human-Robot Interactions. In *NIST Performance Metrics for Intelligent Systems Workshop*. Brigham Young University, Provo.
- Onken, R., & Schulte, A. (2012). System-Ergonomic Design of Cognitive Automation: Dual-Mode Cognitive Design of Vehicle Guidance and Control Work Systems. Springer, Berlin Heidelberg.
- Polanyi, M. (1985). *Implizites Wissen*. Suhrkamp, Frankfurt M.
- Putzer, H., & 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*, vol. 1.

- Pyshkin, D. (2014). Entwurf und prototypenhafte Implementierung eines exemplarischen Szenarios einer militärischen Hubschraubermission. Bachelorarbeit. Universität der Bundeswehr München, Neubiberg.
- Rao, A. S., & Murray, G. (1994). Multi-Agent Recognition and its to Air-Combat Modelling. In Proceedings of the 13th International Workshop on Distributed Artificial Intelligence.
- Rauner, F. (Ed.). (2006). Handbuch Berufsbildungsforschung. Bertelsmann, Bielefeld.
- Richards, C. (2011). Boyd's OODA Loop. Proceedings of Lean Software and Systems Conference 2011. Blue Hole Press, Sequim.
- Riley, V. (1989). A General Model of Mixed-Initiative Human-Machine Systems. Proceedings of the Human Factors and Ergonomics Society Annual Meeting, vol. 33(2).
- Rouse, W. B. (1977). Human—Computer Interaction in Multitask Situations. IEEE Transactions on Systems, Man and Cybernetics, vol. 7(5).
- Rudnick, G., & Schulte, A. (2016). Scalable autonomy concept for reconnaissance UAVs on the basis of an HTN agent architecture. In 2016 International Conference on Unmanned Aircraft Systems (ICUAS). IEEE, Arlington.
- Ruf, C., & Stütz, P. (2017). Model-driven sensor operation assistance for a transport helicopter crew in manned-unmanned teaming missions: Selecting the automation level by machine decision-making. In Advances in Intelligent Systems and Computing vol. 499. Orlando.
- Ruf, C., von der Mülbe, S., & Stuetz, P. (2017). Assistenz beim Einsatz von Aufklärungssensorik für die Crew eines Transporthelikopters in MUM-T-Missionen: Gestaltung eines Automationssystems zur gezielten Reduktion der Mental Workload. Kognitive Systeme 2017-1, Neubiberg.
- Russell, S. J., & Norvig, P. (1996). Artificial Intelligence A modern Approach. Englewood Cliffs, NJ: Cambridge University Press.
- Schmitt, F. (2021). Adaptive Mixed-Initiative Missionsplanung für Multi-Vehikel Szenarien. Universität der Bundeswehr München, Neubiberg.
- Schulte, A., Brand, Y., Honecker, F., Rudnick, G., Schmitt, F., & Donath, D. (2018). Abschlussbericht Hubschrauber – abgesetzte Sensorplattform „CASIMUS“. Universität der Bundeswehr München, Neubiberg.
- Schulte, A., Donath, D., & Lange, D. S. (2016). Design patterns for human-cognitive agent teaming. In Engineering Psychology and Cognitive Ergonomics. EPCE 2016. Lecture Notes in Computer Science, vol. 9736. Springer, Cham.
- Sheridan, T. B. (1992). Telerobotics, automation, and human supervisory control. MIT Press, Cambridge.
- Sheridan, T. B. (2002). Humans and automation: System design and research issues. John Wiley & Sons, New York.
- Sheridan, Thomas B., & Verplank, W. L. W. (1978). Human and Computer Control of Undersea Teleoperators. ManMachine Systems Lab Department of Mechanical Engineering MIT, Cambridge.
- Smart Eye AB. (2002). Smart Eye Pro 5.0 User Manual. Smart Eye, Gothenburg.

- Suck, S., & Fortmann, F. (2016). Aircraft Pilot Intention Recognition for Advanced Cockpit Assistance Systems. In *Foundations of Augmented Cognition: Neuroergonomics and Operational Neuroscience*. Springer, Cham.
- Süddeutsche Zeitung. (2018). Frau stirbt bei Unfall mit autonomen Auto von Uber. Süddeutsche Zeitung vom 19. März 2018, München.
- Tagesspiegel. (2018). Bundeswehr will mit neuer Software Krisen früher erkennen. Tagesspiegel vom 2. Juni 2018, Berlin.
- Theißing, N., & Schulte, A. (2016). Designing a support system to mitigate pilot error while minimizing out-of-the-loop-effects. *Lecture Notes in Computer Science (Including Subseries Lecture Notes in Artificial Intelligence and Lecture Notes in Bioinformatics)*, vol. 9736.
- Tvaryanas, A. P. (2004). USAF UAV mishap epidemiology, 1997-2003. In *Human Factors of Uninhabited Aerial Vehicles First Annual Workshop*, Phoenix.
- Uhrmann, J. (2013). Auftragsbasierte Multi-UAV-Führung aus dem Helikoptercockpit durch kognitive Automation. Dissertation. Universität der Bundeswehr München, Neubiberg.
- Uhrmann, J., & Schulte, A. (2011). Task-based guidance of multiple uav using cognitive automation. *COGNITIVE 2011, The Third International Conference on Advanced Cognitive Technologies and Applications*.
- Uhrmann, J., & Schulte, A. (2012). Concept, Design and Evaluation of Cognitive Task-based UAV Guidance. *International Journal On Advances in Intelligent Systems*, vol. 5(1).
- US Army. (2011). *Shadow Troop Handbook*. Combat Aviation Brigade, 1st Infantry Division, Washington DC.
- Wehrmann, P. (2016). Experimentelle Untersuchung von Bedienkonfigurationen mit variablen Automationsgraden hinsichtlich Benutzerbewertung. Masterarbeit. Universität der Bundeswehr München, Neubiberg.
- Wickens, C. D. (1981). *Processing Resources In Attention, Dual Task Performance, and Workload Assessment*. Illinois University at Urbana Engineering-Psychology Research Lab, Illinois.
- Chemla, J. (2003). *Automation in UAV systems - The IAI MALAT approach*. ISRAEL Aircraft Industries, Tel Aviv.
- Williams, K. W. (2004). *A Summary of Unmanned Aircraft Accident / Incident Data: Human Factors Implications*. FAA Civil Aerospace Medical Institute, Oklahoma City.
- Winnefeld, J. A., & Kendall, F. (2010). *Unmanned Systems integrated roadmap: FY 2011-2036*. Office of the under Secretary of Defense, Washington, DC.
- Wohler, M., & Schulte, A. (2013). On Board Assistant System for UAS Integration into Civil Airspace. In *AIAA Infotech@Aerospace Conference*, Boston.
- Woods, D., & Hollnagel, E. (2006). *Patterns in Cognitive Systems Engineering*, Chapter: Automation Surprises. CRC Press, Boca Raton.

B Abkürzungsverzeichnis

ABF	Auftragsbasierte Führung
AFS	Auto Flight System
BDI	Beliefs-Desires-Intentions
BKS	Bodenkontrollstation
CDU	Cockpit-Display-Unit
CP	Control Panel
CPL	Cognitive Programming Language
CPU	Central Processing Unit
DL	Detection Level
FG	Flight Guidance
FMC	Flight Management Computer
FMS	Flight Management System
FZ	Freier Zugriff
GZ	Geführter Zugriff
HKF	Höhere kognitive Fähigkeit
HOA	Helicopter Operating Area
HOB	Helicopter Operating Box
HTN	Hierarchical Task Network
IE	Interaction Effort
KCV	Knowledge Configured Vehicle
LHS	Left Hand Side
LP	Landepunkt
MABA-MABA	Men are better at - machines are better at
MFD	Multifunktionsdisplay
MUM-T	Manned-Unmanned-Teaming
NASA-TLX	NASA Task Load Index
NT	Neglect Tolerance
OODA	Observe-Orient-Decide-Act
PFD	Primary Flight Display
RAD	Robot Attention Demand
RC	Remote Control
RHS	Right Hand Side
SAM	Surface to Air Missile

B Abkürzungsverzeichnis

SEAD	Suppression of Enemy Air Defense
SRTM	Shuttle Topographie Radar Mission
UAS	Unmanned Aerial System
UAV	Unmanned Aerial Vehicle
UUID	Universally Unique Identifier
VBS	Virtual Battle Space
VP	Versuchsperson
VPN	Virtuelles Privates Netz

C Missionsvignetten

Missionselemente

Im Folgenden werden die Missionselemente auf der taktischen Karte beschrieben. Diese sind in Abbildung C-1 dargestellt und bieten die Möglichkeit den Missionsverlauf im Experiment zu steuern. Größtes Missionselement ist die Helicopter Operating Area (HOA), eine Luftraumordnungsstruktur, innerhalb derer keine anderen Luftfahrzeuge außer dem ihr zugewiesenen Hubschrauberverband operieren darf. Die HOA entspricht in den Experimenten dem geplanten Operationsgebiet. Alle anderen taktischen Areale liegen innerhalb der HOA. Die HOA ist als türkisfarbener Rahmen dargestellt. Zur Vereinfachung des Experiments ist die HOA ebenfalls das Gebiet, auf das sich die feindliche Aktivität beschränkt. Das bedeutet, dass außerhalb des Gebiets keine Voraufklärung des Flugwegs notwendig ist. Innerhalb einer HOA können sich eine oder mehrere Helicopter Operating Boxes (HOB) befinden. Die HOB wird als grün umrandetes Polygon dargestellt.

Sind in einer Mission Landungen geplant, existieren laut Vorschrift im entsprechenden Gebiet Landing Zones (LZ). Da im Rahmen der Missionen nur ein bemannter Hubschrauber vorkommt und die UAVs nicht landen können, entfällt das taktische Element der LZ für die weitere Gestaltung. Diese Vereinfachung trägt insbesondere dazu bei, die taktische Lage übersichtlich zu halten und ist aufgrund lediglich eines bemannten, landefähigen Luftfahrzeugs im Operationsgebiet auch plausibel dem Sinn der aktuell gültigen Vorschrift nachempfunden. Innerhalb einer LZ gibt es mindestens eine Landing Site (LS) und eine Alternative Landing Site (ALS), die jeweils durch einen Approach-(AP) und einen Departurepoint (DP) anzufliegen bzw. zu verlassen sind. Landing Sites sind in Abbildung C-1 durch den rosafarbenen Rahmen definiert. Aufgrund der Annahme, dass die LZ entfällt, werden die ALS und LS direkt in die HOB eingetragen.

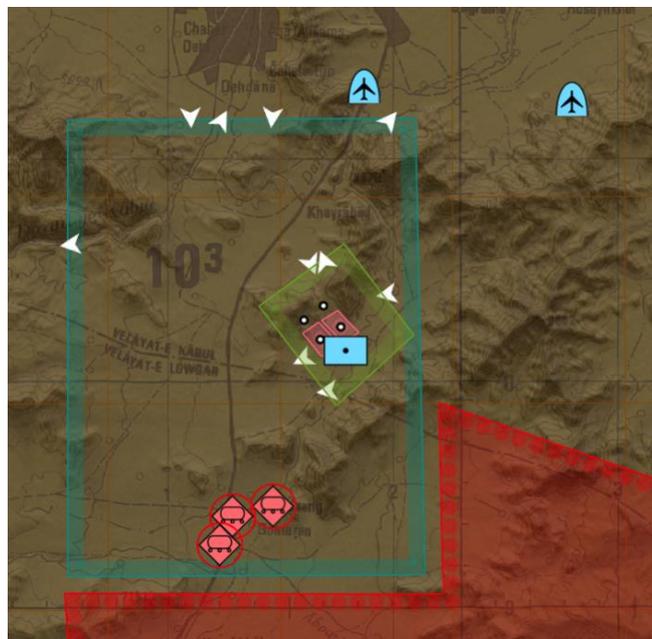


Abbildung C-1: Missionselemente

Innerhalb der LS und ALS wiederum gibt es mehrere, vorgeplante Landing Points (LP), an denen die tatsächliche Landung des Hubschraubers stattfinden kann. Im Gegensatz zur heutigen Situation werden diese LPs erst während des Experiments durch die Fähigkeit der UAVs zur Landzonenaufklärung generiert und in die digitale Karte eingetragen. Luftraumordnungsmittel, die bestimmten Räume definieren, können nur durch Ingress- bzw. Egresspoints betreten oder

verlassen werden. Die Darstellung der In-/Egresspoints erfolgt durch einen Pfeil entsprechend der Ein-/Ausflugrichtung. Ein weiteres Element zur Luftraumordnung sind Flugverbotszonen (engl. No-Fly-Zones, NFZ), deren Grenzen nicht überflogen werden dürfen. Die Gründe zur Einrichtung dieser Zonen können vielfältig sein, beispielsweise wenn das enthaltene Gebiet besonders gefährlich ist, dort keine Funkverbindung besteht oder mit eigenem Feuer durch Bomber oder Artillerie zu rechnen ist. Das rot schraffierte Gebiet im unteren Teil der Abbildung C-1 stellt eine NFZ dar. Zusätzlich zu den beschriebenen Luftraumordnungsmitteln werden durch die Verwendung taktischer Zeichen gemäß Vorschrift einheitliche und standardisierte Symbole verwendet. Diese taktischen Zeichen sind einerseits nach ihrer Farbe geordnet, blaue Symbole sind eigene, rote Symbole feindliche, gelbe unbekannte und grüne neutrale Entitäten. Andererseits stehen die Symbole je nach äußerer Form und im Inneren abgebildetem Symbol für verschiedene Klassen von Entitäten. Zusätzlich können die Symbole mit einem Bedrohungsradius, wie in Abbildung C-1 dargestellt, versehen werden, um Sicherheitsabstände, insbesondere zu feindlichen Einheiten, einhalten zu können.

Missionensvignetten Simulator

Trainingsmission

Lage: In Afghanistan kontrollieren feindliche Kräfte weite Gebiete. Ein ziviler Hubschrauber mit 5 Personen ist in feindlich kontrolliertem Gebiet bei Alasay abgestürzt. Es liegen Informationen vor, dass sich feindliche Kräfte der Absturzstelle nähern.

Auftrag: Ziel ist die eindeutige Lokalisierung des Hubschraubers und die Rettung der Besatzung, bevor mögliche feindliche Kräfte die Absturzstelle erreichen.

Idealablauf: Der Abflug aus der vorgelagerten Operationsbasis (FOB Chineh) erfolgt nach Osten. Der Einflug in die HOA erfolgt über einen von zwei möglichen Punkten. Die UAV1 und UAV2 klären innerhalb der HOA den Hauptflugweg und einen alternativen Flugweg für den Hubschrauber auf. UAV3 fliegt direkt in die HOB zur vermuteten Absturzstelle und lokalisiert sowohl den abgestürzten Hubschrauber als auch die Besatzung. Nach erfolgreicher Lokalisierung findet UAV3 in der HOB mehrere geeignete Landepunkte. Der bemannte Hubschrauber landet und evakuiert die überlebenden Zivilisten. Die geretteten Zivilisten werden zur Drop-Zone außerhalb der HOA geflogen. Der Ausflug aus der HOA erfolgt dabei nach Norden. Nach Landung in der Drop-Zone nehmen befreundete Kräfte die evakuierten Zivilisten entgegen. Der Hubschrauber fliegt zurück zur FOB.

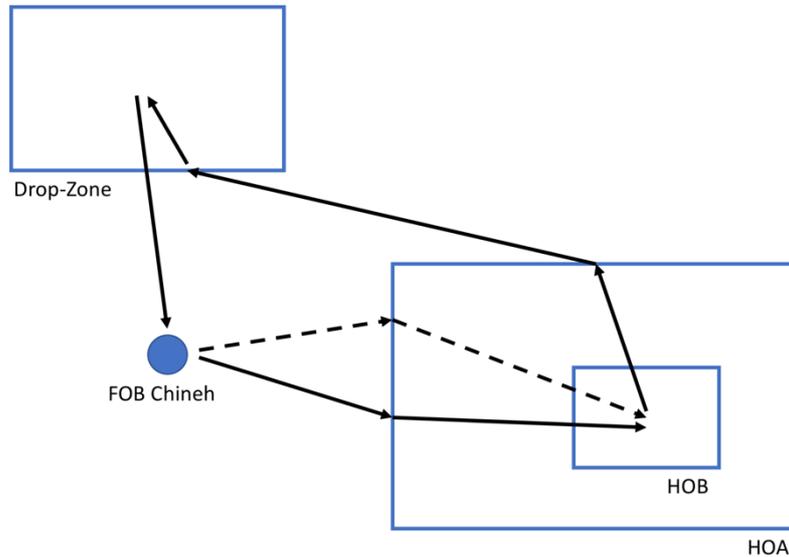


Abbildung C-2: Idealablauf Trainingsmission

Special Observation

Lage: Ein Konvoi bestehend aus eigenen Truppen ist in einem durch feindliche Kräfte bedrohten Gebiet auf eine unkonventionelle Sprengfalle (engl.: IED – Improvised Explosive Device) gestoßen und benötigt Unterstützung. Ein Kampfmittelräumteam (engl.: EOD - Explosive Ordnance Disposal) befindet sich an der MOB SHOCKCENTER.

Auftrag: Der bemannte Hubschrauber, ebenfalls stationiert am MOB SHOCKCENTER, hat den Auftrag das EOD-Team, zur Entschärfung der Sprengfalle, einzufliegen.

Idealablauf: Nach Einflug in das Operationsgebiet und vor Anflug auf den Landeplatz wird die primäre Route des Hubschraubers bedroht. Nach Aufklärung der Bedrohung, weicht der Hubschrauber aus. In mehreren Ortschaften südwestlich der Landezone befinden sich feindliche Kräfte. Diese bedrohen den Absetzvorgang des EOD Trupps nicht unmittelbar. Auf dem Rückflug wird die alternative Flugroute bedroht. Bei der Landung am MOB SHOCKCENTER muss einem anderen anfliegenden Hubschrauber Vorrang gewährt werden.

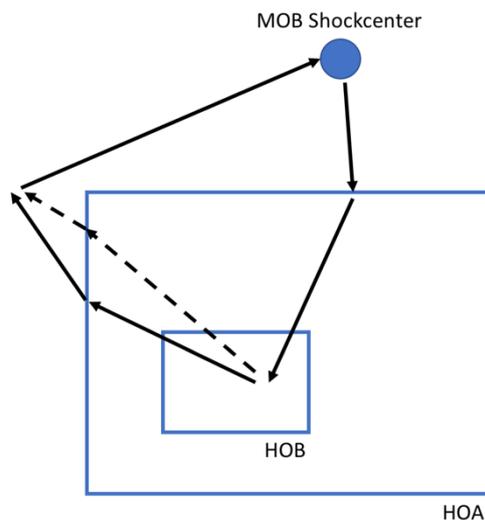


Abbildung C-3: Idealablauf Special Observation

Golden Hour

Lage: Es befinden sich drei eigene Patrouillen im Gebiet. Der bemannte Hubschrauber hat MedEvac-Bereitschaft. Bei einem Feuergefecht mit Aufständischen werden eigene Kräfte der Patrouille Viper verwundet.

Auftrag: Die Crew des Hubschraubers wird alarmiert und erhält den Auftrag, die verwundeten Kräfte aus der Gefechtszone zu evakuieren und zurück zur MOB CHINEH zu transportieren. Luftraumordnungsmaßnahmen sind dabei einzuhalten.

Idealablauf: Nach Einflug in die HOA ist die Hauptflugroute bedroht. Der bemannte Hubschrauber weicht darauf hin aus. Während der Landung bei Viper ist die Landezone feindfrei. Feindliche Kräfte befinden sich allerdings unmittelbar südlich der Landezone. Die feindlichen Truppen rücken nach Norden vor, sobald der bemannte Hubschrauber die verwundeten Truppen eingeladen hat. Der Hubschrauber muss daher schnellstmöglich die Landezone verlassen. Auf dem Rückflug erfolgt eine Auftragsänderung. Der bemannte Hubschrauber muss den Patientierten nun nach Westen zur MOB SHOCKCENTER transportieren. Eine vollständige Umplanung der Mission ist dadurch erforderlich. Auf dem Flug zur MOB treten unbekannte (neutrale Kräfte) auf der Hauptflugroute auf, die Alternativroute wird durch feindliche Kräfte bedroht.

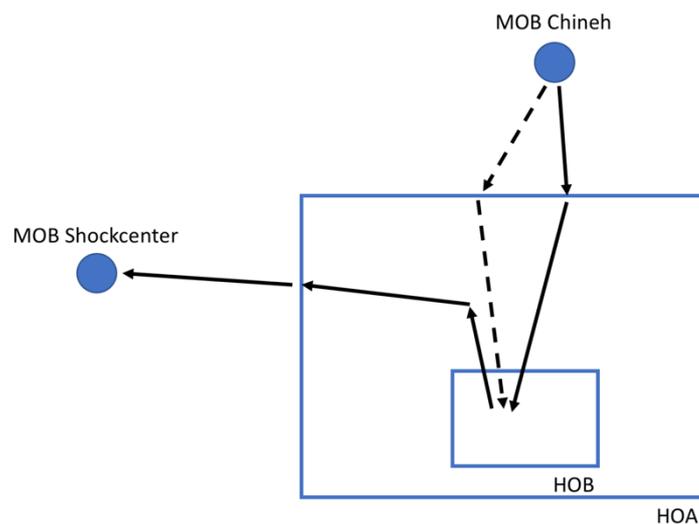


Abbildung C-4: Idealablauf Golden Hour

Desert Shield

Lage: Im Raum Zaydabad südlich von Kabul findet im Rahmen einer größeren Operation Kämpfe zwischen dem Aufständischen und eigenen Kräften statt.

Auftrag: Der bemannte Hubschrauber, stationiert in Kabul, erhält den Auftrag Truppen zur Verstärkung der eigenen Kräfte an die Nähe der Gefechtszone zu transportieren.

Idealablauf: Nach dem Einflug in das Operationsgebiet ist der östliche Anflug durch feindliche Truppen bedroht. Unbekannte (neutrale Einheiten) befinden sich zusätzlich auf der primären Flugroute. Die Landezone wird nicht bedroht. Nach dem Absetzen der Verstärkung und dem Verlassen der Landezone ändert sich das Missionsziel. Eigene Truppen wurden im Gefecht mit Aufständischen verletzt. Der bemannte Hubschrauber erhält den Auftrag, die verletzten Soldaten südwestlich der aktuellen Position aus einer Gefechtszone zu evakuieren. Der Schauplatz der Hauptkampfhandlungen muss dabei weiträumig umflogen werden. Nach Aufnahme der Verletzten kehrt Boomer nach Kabul zurück. Auf dem Rückflug wird die

primäre Flugroute durch feindliche Kräfte bedroht. Der bemannte Hubschrauber weicht daraufhin aus. Auf der alternativen Flugroute befinden sich unbekannte (neutrale) Fahrzeuge.

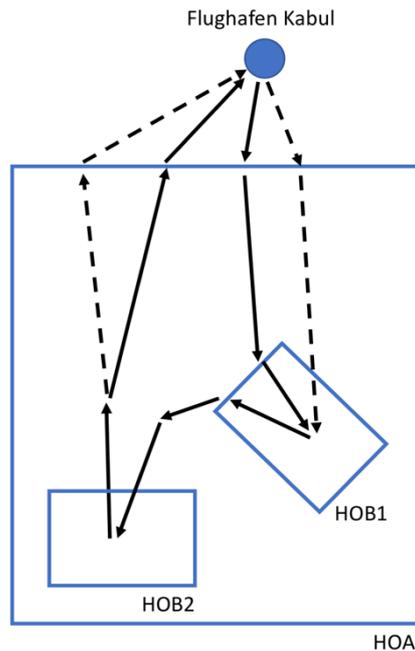


Abbildung C-5: Idealablauf Desert Shield

Rocket Raid

Lage: Der militärische Geheimdienst vermutet einen Verkauf von Luftabwehrraketen voraussichtlich an einem Punkt Vargas südwestlich von Kabul. Die Lieferung der Raketen wird in einem Truck vermutet. Ein Trupp spezialisierter Kräfte (Tiger) soll bei dem Verkauf eingreifen.

Auftrag: Der Auftrag für den bemannten Hubschrauber besteht darin, Tiger an einer vorgelagerten Operationsbasis aufzunehmen und zu Vargas zu transportieren. Der Anflug an das Ziel sollte verdeckt erfolgen, der Überflug des direkten Anflugs über C-Alpha ist zu vermeiden.

Idealablauf: Der bemannte Hubschrauber fliegt über den östlichen Einflugpunkt in die HOA ein und nutzt dabei die Deckung einer Bergkette. Nach dem Einflug in die HOA tauchen mehrere unbekannte Einheiten auf, welche keine Bedrohung darstellen. Kurz vor dem Erreichen der Landezone (HOB1) erfordert eine Auftragsänderung eine Umplanung der Mission. Neue Nachrichtendienstliche Erkenntnisse sorgen für eine Verschiebung des Zielpunkts in ein nahegelegenes Tal (Goldfinger, HOB2). Der bemannte Hubschrauber führt eine Umplanung durch und liefert Tiger bei Goldfinger ab. Im Anschluss fliegt er über den direkten Weg zurück nach Kabul. Eine zweite Auftragsänderung erfolgt noch innerhalb des Operationsgebietes und macht eine erneute Missionsumplanung erforderlich. Das Team spezialisierter Kräfte (Tiger) ist auf schwere Gegenwehr gestoßen und muss umgehend evakuiert werden (HOB3). Ein durch Tiger angeforderter Luftschlag erfolgt, kurz nachdem der bemannte Hubschrauber Tiger evakuiert hat. Auf dem Rückflug erhält er noch den Zusatzauftrag, mit einem UAV einen Gefechtsschadensbericht (engl.: Battle Damage Assessment, BDA) durchführen. Der bemannte Hubschrauber ist davon aber nicht betroffen und setzt sein Rückflug nach Kabul fort.

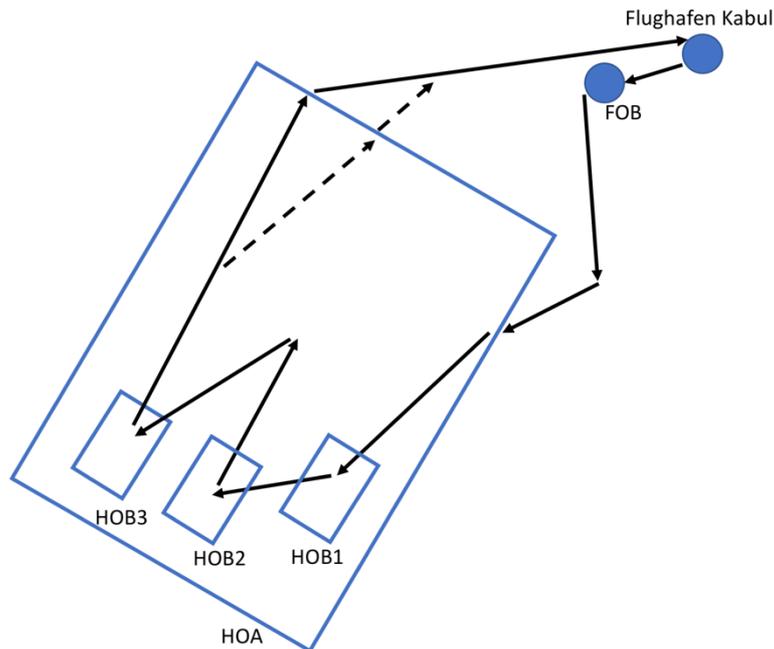


Abbildung C-6: Idealablauf Rocket Raid

Mosahi Convoy

Lage: Das Gebiet um MOSAHI ist von strategischer Bedeutung, da eine der wichtigsten Versorgungsrouten hindurchführt. Im Gebiet um MOSAHI sind vermehrt feindliche Aktivitäten festgestellt worden. Um diese Aktivitäten einzudämmen, soll in der Nähe von MOSAHI ein Checkpoint eingerichtet werden. Dazu verbringt der Konvoi COBRA, bestehend aus insgesamt aus 6 Sicherungsfahrzeugen, Truppen und Material zum Zielpunkt.

Auftrag: Der bemannte Hubschrauber hat den Auftrag, den Aufbau des Checkpoints zu unterstützen, indem ein Trupp luftbeweglicher Infanterie als Vorhut ins Zielgebiet verlegt wird, welche vor dem Konvoi eintreffen soll.

Idealablauf: Nach dem Einflug ins Operationsgebiet treten vereinzelt auf den Routen unbekannte Kräfte auf. Die primäre Flugroute wird durch eindeutig feindliche Kräfte bedroht. Auf dem Rückflug erfolgt ein Folgeauftrag. Ein Kampfflugzeug ist in der Nähe von Boomers Position abgestürzt. Der bemannte Hubschrauber erhält den Auftrag, die genaue Absturzstelle zu lokalisieren und die überlebenden Piloten zu retten. Auf dem Flug zur Absturzstelle wird die sekundäre Flugroute bedroht.

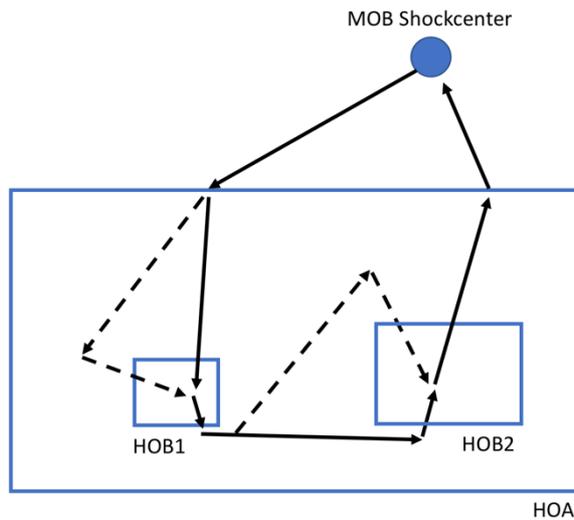


Abbildung C-7: Idealablauf Mosahi Convoy

Missionen Realflug

Mission: Höhle

Ziel der Mission ist die Aufklärung eines Höhleneingangs. Da das Konzept Höhle nicht in der Automation hinterlegt ist, besteht eine hohe Wahrscheinlichkeit, dass das Ziel aus einer ungünstigen Richtung aufgeklärt wird. Dadurch sind der Höhleneingang und die ersten Meter der Höhle nicht erkennbar. Durch Eingriffe in tiefere Automationsfunktionen, wie beispielsweise der Wegpunktplanung, ist es dem Operateur trotzdem möglich die Mission zu erfüllen. Abbildung C-8 stellt die Ausgangslage dar.



Abbildung C-8: Mission Höhle

Ideale Durchführung: Rein auftragsbasierte Führung: Der Operateur bewegt das UAV mit Transitaufträgen zur richtigen Seite und führt anschließend einen Aufklärungsauftrag durch, um die Automation zur korrekten Aufklärungsrichtung zu zwingen.

Mission: Tiefflug

Mit dem Ziel feindliche Einheiten abzuschrecken oder Präsenz zu zeigen soll in einem bestimmten Gebiet sehr tief geflogen werden. Die eigentliche Einsatzhöhe des Fluggerätes ist wesentlich höher, weshalb die Automation stets versuchen wird in dieser optimalen Höhe zu fliegen. Durch den tieferen Eingriff in das FMS ist der Operateur in der Lage eine niedrigere Höhe zu kommandieren. Abbildung C-9 stellt die Ausgangslage dar.

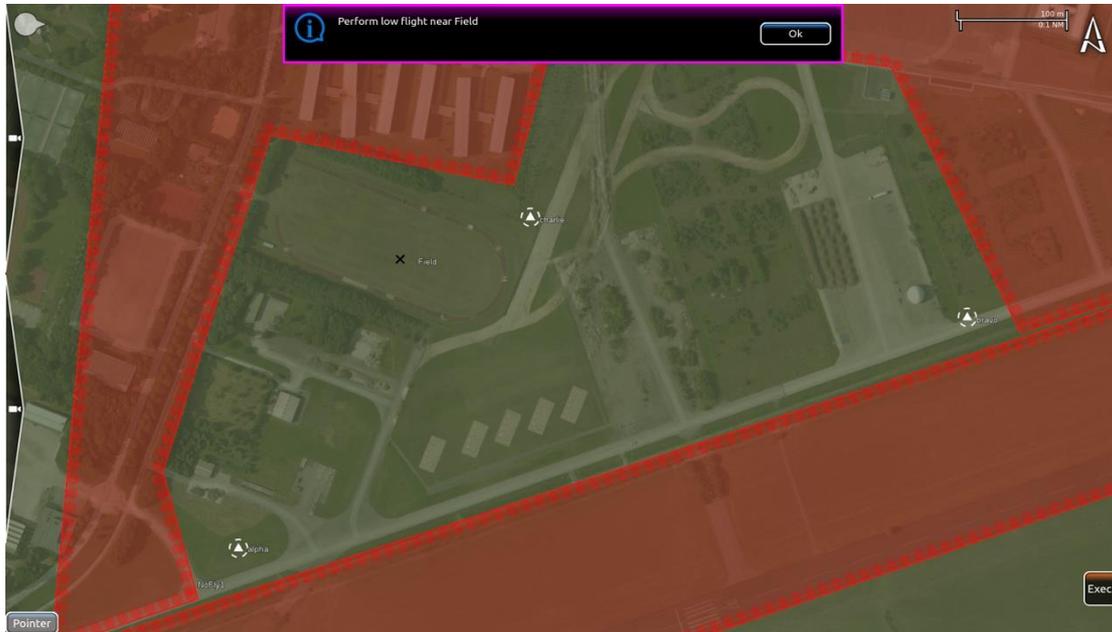


Abbildung C-9: Mission Tiefflug

Ideale Durchführung: Rein auftragsbasierte Führung: Es besteht keine Möglichkeit das System zu einer niedrigeren Flughöhe zu zwingen, da der Auftrag Tiefflug nicht im Systemdesign vorgesehen war.

Mission: Falsche SAM

Eine fehldetektierte oder bereits bekämpfte feindliche Flugabwehrstellung (engl. Surface to Air Missile, SAM) ist im Missionssystem hinterlegt. Die Automation versucht nun diesen Teil des Missionsgebiets zu meiden, was zu längeren Missionszeiten und dadurch zu einer schlechteren Missionsleistung führt. Das beim Operateur vorhandene Wissen über die nicht mehr existierende SAM-Stellung kann dazu genutzt werden mit tieferen Eingriffen den Flugplan so anzupassen, dass der direkte Weg durch das angeblich bedrohte Gebiet genutzt wird. Abbildung C-10 stellt die Ausgangslage dar.



Abbildung C-10: Mission Falsche SAM

Ideale Durchführung: Rein auftragsbasierte Führung: Der Operateur plant einen Transitauftrag in das bedrohte Gebiet und einen Aufklärungsauftrag zum eigentlichen Ziel. Durch das Bestreben des Agenten das bedrohte Gebiet radial zu verlassen, ist die Flugbahn jedoch suboptimal.

Mission: Detection Level

Ein wichtiges Ziel bei Aufklärungsmissionen ist es, nicht vom beobachteten Element aufgeklärt zu werden. Dazu werden für jede Mission je nach Kritikalität des jeweiligen Aufklärungsziels und unter Miteinbeziehung des notwendigen Maximalabstandes ein sogenanntes Detection Level festgelegt. Es werden die drei weiter oben beschriebenen Stufen mit den in Tabelle C-1 festgelegten Distanzen definiert.

Tabelle C-1: DetectionLevel Werte

DetectionLevel	Abstand zum Ziel
DetectionLevel 1 (DL1)	0m
DetectionLevel 2 (DL2)	100m
DetectionLevel 3 (DL3)	200m

Je nach Aufklärungssystem wird für jedes Level ein Mindestabstand festgelegt, der zum aufzuklärenden Objekt einzuhalten ist. Dieser Abstand ist der direkte Abstand zwischen Ziel und Luftfahrzeug und muss entsprechend der Flughöhe auf einen horizontalen Abstand umgerechnet werden. Für diese Mission wurde DL2 mit einem Abstand von 100m als ausreichend festgelegt.

Ziel der Mission ist die Aufklärung einer Straße. Die von der Automation berechnete Aufklärungsflugroute verläuft jedoch teilweise im Bedrohungsbereich einer feindlichen Luftabwehrstellung. Deshalb ist der Operateur gezwungen mit tieferen Eingriffen die Aufklärungsflugroute vorzugeben. Bei der Konfiguration mit geführtem Zugriff wird er dabei gewarnt, falls die neue Route das DetectionLevel verletzt, da der Agent über das Aufklärungsziel informiert ist. Diese Warnung unterbleibt im Falle des freien Zugriffs und es liegt in der Verantwortung des Operateurs diese Begrenzung zu beachten. Abbildung C-11 stellt die Ausgangslage dar.

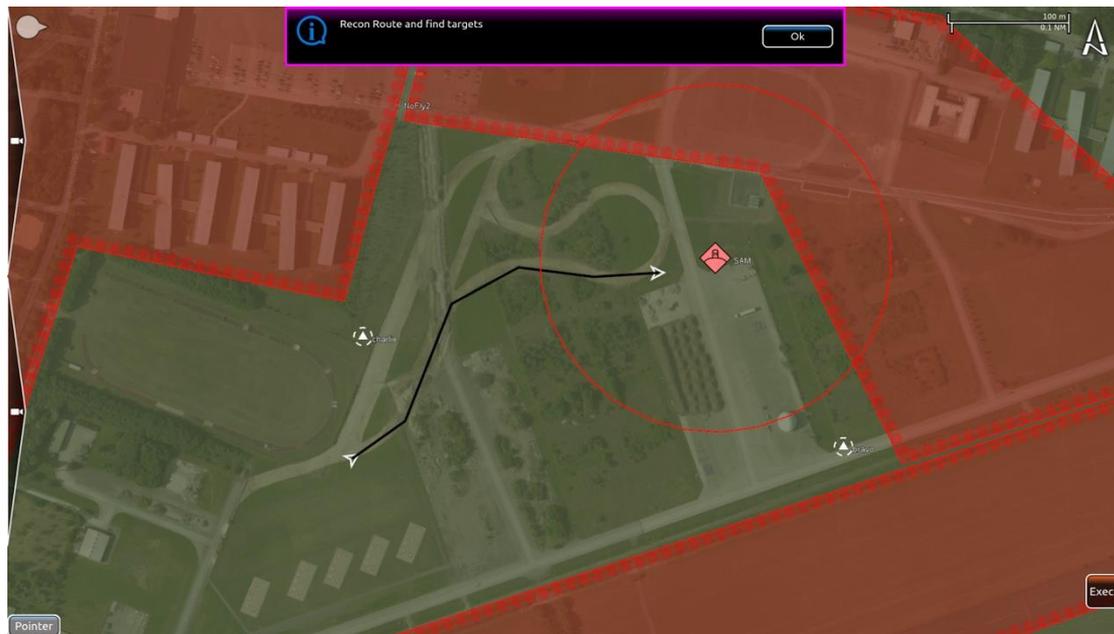


Abbildung C-11: Mission DetectionLevel

Ideale Durchführung: Rein auftragsbasierte Führung: Es gibt keine Möglichkeit eine Bedrohung während der Aufklärung zu verhindern.

D Fragebögen

Fragebögen im Hubschrauberexperiment

Seite 01
post

1. Um Sie in den Aufgabenkontext und in ein möglichst realistisches Szenario zu versetzen, wurde den Missionsdurchführungen jeweils ein Missionsbriefing vorangestellt.

Wie empfanden Sie das Briefing um sich in den Missionskontext und die damit verbundene Aufgabenstellung hineinzusetzen?

ungeeignet geeignet
zu lang zu kurz

2. Die in dem Briefing enthaltenen Informationen über den aktuellen Geschehenshintergrund, Einsatzgebiet, verwendete Waffensysteme, Nachrichtendienstliche Informationen, zeitliche Ablaufinformation, sowie Abbruchkriterien waren:

unvollständig vollständig
unzweckmäßig zweckmäßig

3. Bewertung des Experiments hinsichtlich Realismus

	sehr unrealistisch	sehr realistisch
Szenario	<input type="radio"/> <input type="radio"/> <input type="radio"/> <input type="radio"/> <input type="radio"/> <input type="radio"/>	
Missionsablauf	<input type="radio"/> <input type="radio"/> <input type="radio"/> <input type="radio"/> <input type="radio"/> <input type="radio"/>	
Simulation	<input type="radio"/> <input type="radio"/> <input type="radio"/> <input type="radio"/> <input type="radio"/> <input type="radio"/>	

4. Bewertung des Experiments hinsichtlich Versuchsdesign

	sehr unrealistisch	sehr realistisch
Szenario	<input type="radio"/> <input type="radio"/> <input type="radio"/> <input type="radio"/> <input type="radio"/> <input type="radio"/>	
Missionsablauf	<input type="radio"/> <input type="radio"/> <input type="radio"/> <input type="radio"/> <input type="radio"/> <input type="radio"/>	
Simulation	<input type="radio"/> <input type="radio"/> <input type="radio"/> <input type="radio"/> <input type="radio"/> <input type="radio"/>	

5. Wie schätzen Sie die Eignung des Simulators für die Multi-UAV-Führung vom Kommandantenarbeitsplatz ein:

ungeeignet geeignet
unzweckmäßig zweckmäßig

6. Das System stellte die Mission realitätsnah dar

überhaupt nicht voll und ganz

7. Verbesserungsvorschläge:

8. Die Tatsache, dass der Fokus der Experimente in der Verhaltensbeobachtung lag, hat ihr eigenes Verhalten beeinflusst/verändert:

trifft zu trifft nicht zu

9. Wenn das Experiment nicht im Simulator stattgefunden hätte, sondern in einem realen Szenario. Hätte sich Ihr Verhalten geändert?

ja nein

10. Was an ihrem Verhalten hätte sich geändert:

11. Hatten Sie als Kommandant eher das Gefühl mit den UAVs zu fliegen, als im Hubschrauber:

ja nein, überhaupt nicht

12. In welcher Situation/Situationen:

13. Waren Sie sich zu jederzeit über die Position des HC in Bezug auf die Mission/UAVs bewusst:

nein ja

14. In welcher Situation/Situationen:

Persönliche Daten

Name:	Rolle:
Mission:	Datum / Zeit:

Variable Automationsgrade

Art:

Zeit:

1. Warum haben Sie das UAV an dieser Stelle auf niedrigem Automationslevel geführt

2. War die Möglichkeit einzugreifen hilfreich?

überhaupt nicht voll und ganz

3. Wie hätten Sie in dieser Situation ohne die Möglichkeit des tieferen Eingriffs gehandelt?

4. Hat der Eingriff in diesem Fall die Missionsleistung erhöht?

überhaupt nicht voll und ganz

5. War die Bedienoberfläche für diesen Eingriff geeignet?

überhaupt nicht voll und ganz

6. Welche Verbesserungsvorschläge haben Sie für diese Situation?

Fehler

Fehler:

Zeit:

7. Verhielt sich das UAV in dieser Situation unvorhergesehen?

ja, sehr nein, überhaupt nicht

8. Wie haben Sie das Problem gelöst?

Warnung

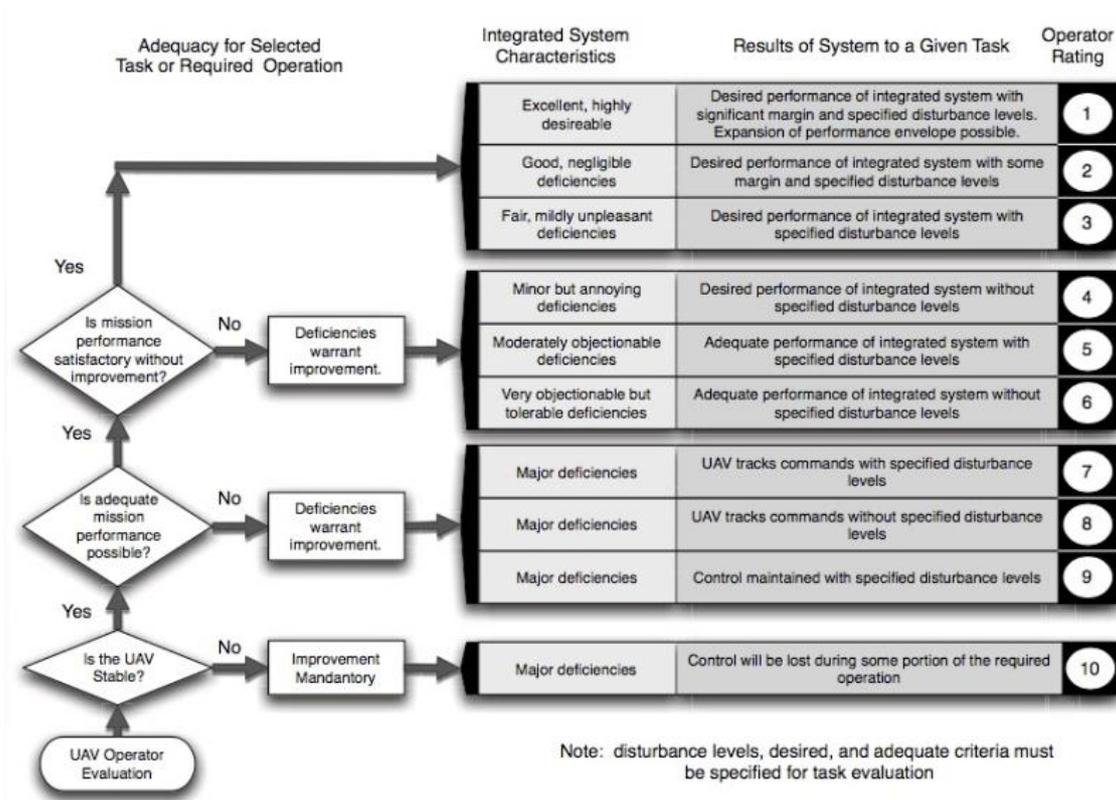
Warnung:

Zeit:

9. War die Warnung in dieser Situation

unvorhergesehen	<input type="radio"/>	vorhersehbar
nicht hilfreich	<input type="radio"/>	hilfreich
störend	<input type="radio"/>	nicht störend
unverständlich	<input type="radio"/>	verständlich

D Fragebögen



10. Wie bewerten Sie das UAV-Gesamtsystem nach dem Cooper-Harper-Rating für UAVs (siehe Bild)?

1 2 3 4 5 6 7 8 9 10

11. Wie bewerten Sie die UAV-Flugführung (Aufträge, Flugroutenberechnung, Warnungen, Positionierung während Aufklärung) nach dem Cooper-Harper-Rating für UAVs?

1 2 3 4 5 6 7 8 9 10

12. Wie bewerten Sie die UAV-Sensorik (Gimbalsteuerung, Aufklärungshypothesen/-ergebnisse) nach dem Cooper-Harper-Rating für UAVs?

1 2 3 4 5 6 7 8 9 10

Die folgenden Fragen beziehen sich auf die UAV-Flugführung, also auf:

- Aufträge
- Berechnung der Flugrouten
- Warnungen
- Positionierung während der Aufklärungsaufträge

1. Die UAV-Führung war:

herausfordernd	<input type="radio"/>	nicht herausfordernd
langweilig	<input type="radio"/>	interessant
nicht belastend	<input type="radio"/>	belastend
unintuitiv	<input type="radio"/>	intuitiv
einfach	<input type="radio"/>	schwer
zeitaufwendig	<input type="radio"/>	zeitsparend
angenehm	<input type="radio"/>	unangenehm

2. Das Verhalten der UAVs war:

hinderlich	<input type="radio"/>	hilfreich
verständlich	<input type="radio"/>	unverständlich
nicht zielführend	<input type="radio"/>	zielführend
unangenehm	<input type="radio"/>	angenehm
intuitiv	<input type="radio"/>	unintuitiv

3. Verhielten sich die UAVs für Sie unvorhergesehen:

ja, immer	<input type="radio"/>	nein, überhaupt nicht
-----------	---	-----------------------

4. In welcher Situation/Situationen:

5. Die UAVs führten meine Aufträge immer richtig aus

überhaupt nicht voll und ganz

6. Die Darstellung der UAV-Status- und UAV-Fluginformationen ist

unübersichtlich übersichtlich
ansprechend nicht ansprechend

7. Der Zugriff auf mehr Informationen über den Plan durch zoomen ist

hilfreich hinderlich
unverständlich verständlich

8. Die UAV-Warnungen sind

hinderlich hilfreich
unverständlich verständlich

9. Ich fühlte mich über den gegenwärtigen Missionsverlauf stets gut informiert

überhaupt nicht voll und ganz

10. Ich bin mit dem UAV-System zufrieden

überhaupt nicht voll und ganz

11. Das Kommandieren der UAVs hat mir Spaß gemacht

überhaupt nicht voll und ganz

12. Das Kommandieren der UAVs fiel mir schwer

überhaupt nicht voll und ganz

13. Für manuelle Eingriffe in die UAV-Flugführung ist die Benutzeroberfläche:

ungeeignet sehr gut geeignet

14. Welchen manuellen Eingriff zur UAV-Verlegung bevorzugen Sie

Manuelle Route mit Follow-Route-Auftrag Editierung von geplanten Routen nach Transit

15. Manuelle Eingriffe in die UAV-Flugführung erweitern das Einsatzspektrum:

überhaupt nicht voll und ganz

16. Manuelle Eingriffe in die UAV-Flugführung ermöglichen das Ausgleichen von Automationsfehlern:

überhaupt nicht voll und ganz

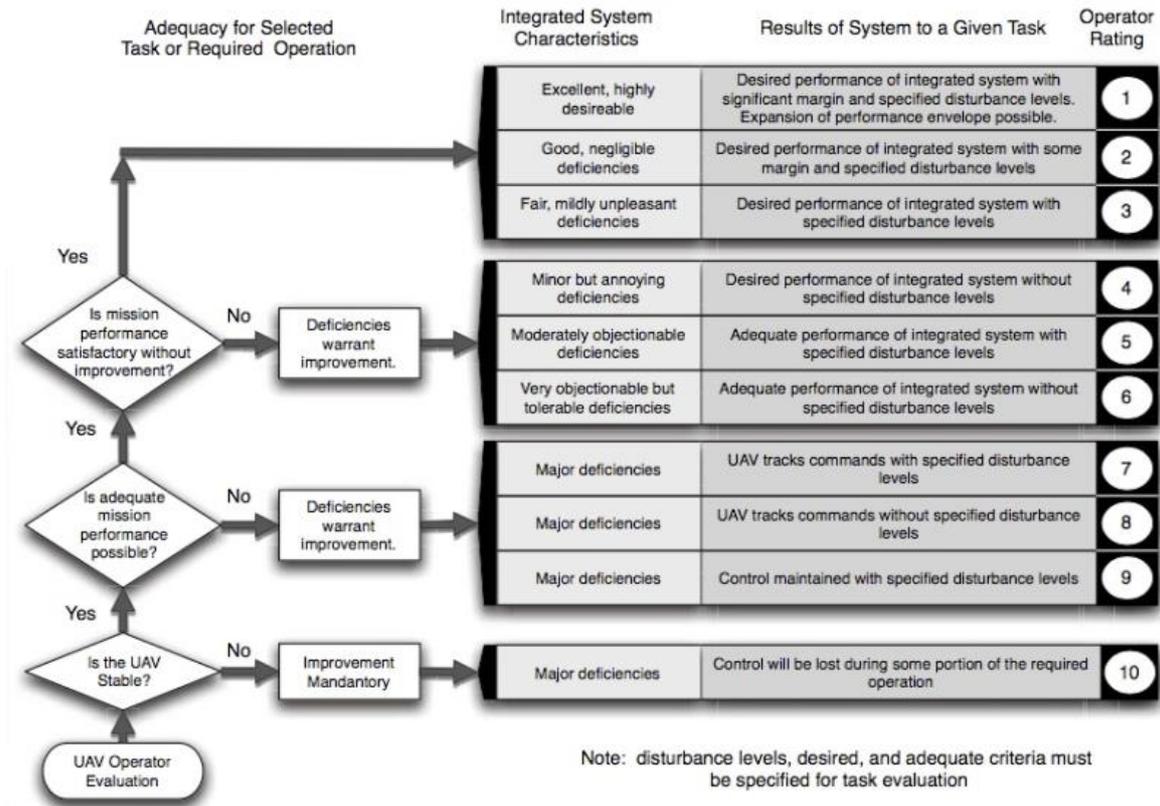
17. Manuelle Eingriffe in die UAV-Flugführung ermöglichen die Nutzung der UAVs in neuartigen Situationen:

überhaupt nicht voll und ganz

18. Durch die auftragsbasierte Führung der UAVs mit manuellen Eingriffen wird die Ausbildung beschleunigt, da anfangs das System schon sehr schnell mit leicht verständlichen Aufträgen genutzt werden kann und erst später mehr Kenntnisse für Optimierungen notwendig sind:

überhaupt nicht voll und ganz

D Fragebögen



19. Wie bewerten Sie das UAV-Gesamtsystem nach dem Cooper-Harper-Rating für UAVs (siehe Bild)?

1
 2
 3
 4
 5
 6
 7
 8
 9
 10

20. Wie bewerten Sie die UAV-Flugführung (Aufträge, Flugroutenberechnung, Warnungen, Positionierung während Aufklärung) nach dem Cooper-Harper-Rating für UAVs?

1
 2
 3
 4
 5
 6
 7
 8
 9
 10

21. Wie bewerten Sie die UAV-Sensorik (Gimbalsteuerung, Aufklärungshypothesen/-ergebnisse) nach dem Cooper-Harper-Rating für UAVs?

1
 2
 3
 4
 5
 6
 7
 8
 9
 10

Fragebögen im Realflugexperiment

Fragebogen

Name:

Datum:

Uhrzeit:

Benutzeroberfläche

1. Die Interaktion mit der UAV über das Multi-Funktionstouch-Display war für die UAV-Führung (Route abfliegen, Routen umplanen)

geeignet								ungeeignet
----------	--	--	--	--	--	--	--	------------

2. Die Systembedienung ist:

intuitiv								unintuitiv
verständlich								unverständlich
einfach								schwer
zeitsparend								aufwendig
angenehm								unangenehm

3. Die Darstellung der Informationen ist:

übersichtlich								unübersichtlich
ansprechend								abschreckend

4. Für kurzfristige Umplanungen waren die Touch-Displays

geeignet								ungeeignet
----------	--	--	--	--	--	--	--	------------

5. Der Inhalt der dargestellten Informationen ist

hilfreich								Hinderlich
verständlich								unverständlich

6. Der Zugriff auf mehr Informationen über den Plan durch zoomen ist

einfach								schwer
verständlich								unverständlich
hilfreich								hinderlich

7. Der Zugriff auf mehr Informationen durch Warnungen ist

einfach								schwer
verständlich								unverständlich
hilfreich								hinderlich

Verbesserungsvorschläge:

Training

8. Mit den zur Verfügung stehenden Funktionen war die Führung der UAVs nach dem Training:

gut möglich								unmöglich
selbsterklärend								unverständlich
zweckmäßig								unzweckmäßig

9. Das Training zur Kommandierung der UAV war:

Zu lang								Zu kurz
förderlich								hinderlich
angemessen								unangemessen

Verbesserungsvorschläge:

Missionen

10. Die Versuche zur Führung der UAV waren:

herausfordernd								unterfordernd
Interessant								Langweilig
Nicht Belastend								belastend

11. Das System stellte die Missionen realitätsnah dar?

Ja, immer								Nein, nie
-----------	--	--	--	--	--	--	--	-----------

12. Trat bei ihnen Unterforderung mit plötzlich hoher Belastung auf?

Ja, oft								Nein, nie
---------	--	--	--	--	--	--	--	-----------

In welchen Situationen:

13. Trat bei ihnen kurzfristige Überforderung auf?

Ja, oft								Nein, nie
---------	--	--	--	--	--	--	--	-----------

In welchen Situationen:

14. Trat bei ihnen länger andauernde Überforderung/Ermüdung auf?

Ja, oft								Nein, nie
---------	--	--	--	--	--	--	--	-----------

In welchen Situationen:

15. Die Tatsache, dass der Fokus der Experimente in der Verhaltensbeobachtung lag, hat ihr eigenes Verhalten beeinflusst/verändert

Ja, oft								Nein, nie
---------	--	--	--	--	--	--	--	-----------

Wenn ja, wie:

16. Wenn das Experiment nicht mit einem Mini-UAV stattgefunden hätte, sondern mit einem taktischen UAV in eine realen Szenario, hätte sich Ihr Verhalten geändert?

Ja, oft								Nein, nie
---------	--	--	--	--	--	--	--	-----------

Was hätte sich geändert:

Verbesserungsvorschläge:

Agent

17. Die auftragsbasierte Führung des UAVs war zur Durchführung der Mission

geeignet								Ungeeignet
hilfreich								hinderlich

18. Verhielten sich das UAV für Sie unvorhergesehen?

Ja, oft								Nein, nie
---------	--	--	--	--	--	--	--	-----------

In welchen Situationen:

19. Das System führte meine Aufträge immer richtig aus.

Ja, oft								Nein, nie
---------	--	--	--	--	--	--	--	-----------

In welchen Situationen:

Fazit

20. Das Planen und Durchführen der Mission fiel mir schwer.

Ja								Nein
----	--	--	--	--	--	--	--	------

21. Ich bin mit dem Gesamtsystem zufrieden.

Ja								Nein
----	--	--	--	--	--	--	--	------

Verbesserungsvorschläge/Anmerkungen: