

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

AUFTRAGSBASIERTE MULTI-UAV-FÜHRUNG AUS DEM HELIKOPTERCOCKPIT DURCH KOGNITIVE AUTOMATION

Dipl.-Inf. (FH) Johann Uhrmann

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

Doktor-Ingenieurs (Dr.-Ing.)

eingereichten Dissertation.

Vorsitzender: Prof. Dr.-Ing. Markus Klein
1. Berichterstatter: Prof. Dr.-Ing. Axel Schulte
2. Berichterstatter: Prof. Dr. rer. nat. Michael Herczeg

Diese Dissertation wurde am 06.12.2012 bei der Universität der Bundeswehr München, 85577 Neubiberg, eingereicht und durch die Fakultät für Luft- und Raumfahrttechnik am 12.12.2012 angenommen.

Tag der Prüfung: 26. März 2013

Essenbach, den 16. April 2013

Für Daniela

Danksagung

Die vorliegende Arbeit ist im Rahmen meiner Tätigkeit am Institut für Flugsysteme der Fakultät für Luft- und Raumfahrttechnik an der Universität der Bundeswehr München entstanden.

Mein besonderer Dank gilt meinem Doktorvater Prof. Dr.-Ing. Axel Schulte. Er hat das Experiment gewagt, Informatiker an ein Luft- und Raumfahrtinstitut zu holen, und mir dadurch die Arbeit an einem innovativen und durch seine Visionen getriebenen Forschungsumfeld ermöglicht. Seine Motivation und sein Scharfblick haben mich bei meiner Arbeit begleitet und unterstützt. Die Diskussionen mit ihm haben immer wieder neue, interessante Forschungsfragestellungen zu Tage gefördert.

Herzlich bedanken möchte ich mich auch bei Prof. Dr. rer. nat. Michael Herczeg für das Interesse an meiner Arbeit, die Übernahme des Koreferats und den fachlichen Diskussionen in freundlicher Atmosphäre bei meinem Besuch des Instituts für Multimediale und Interaktive Systeme an der Universität zu Lübeck.

Dank gebührt auch allen Freunden und Kollegen des Instituts für Flugsysteme für die gute Zusammenarbeit und die gegenseitige Unterstützung bei der Bewältigung der großen und kleinen Herausforderungen des Institutslebens. Hervorzuheben sind dabei natürlich meine Mitstreiter im Projekt Manned-Unmanned Teaming: Andreas Rauschert und Ruben Strenzke. Nur durch die gemeinsamen Anstrengungen und gegenseitige Inspiration war es möglich, das Projekt und somit auch diese Arbeit zum Erfolg zu führen.

Dr. Diana Donath und Dr. Michael Kriegel haben mich nicht nur fachlich sondern auch persönlich stets rückhaltlos unterstützt. In meiner Zeit am Institut für Flugsysteme hat sich daraus zu ihnen eine Freundschaft entwickelt, die ich nicht mehr missen will.

Die Gespräche und Diskussionen mit Stefan Brüggewirth, Florian Böhm, Stefan Gangl, Gregor Jarasch, Tobias Kloss, Benjamin Lettl, Wolfgang Pecher und Dr. Michael Strohal waren nicht nur eine fachliche, sondern vor allem auch eine menschliche Bereicherung.

Wesentlich zum reibungslosen Ablauf der umfangreichen Experimentalkampagnen haben meine Kollegen Andreas Benzler und Felix Maiwald beigetragen. Durch ihre kontinuierliche Entwicklungsarbeit am Forschungsflugsimulator leisteten sie einen wesentlichen Anteil zur Erhebung und Auswertung von wertvollen Daten für eine ganze Reihe von Forschungsprojekten. Mit der Kooperation der Projektteams, die mit ihnen erreicht wurde, konnten die verschiedenen Forschungsaspekte zu einem stimmigen Ganzen verwoben werden.

Madeleine Gabler hat ihre jahrzehntelange Erfahrung im Sekretariat des Instituts stets für die Unterstützung der Doktoranden eingesetzt. Mit ihrer Freundlichkeit und Hilfsbereitschaft half sie mir mehr als nur eine Klippe der Universitätsbürokratie sicher zu umschiffen.

Vor allem gilt jedoch mein Dank meiner Frau Daniela. In den Jahren meiner Tätigkeit am Institut ist sie mir immer die verständnisvolle und liebende Partnerin an meiner Seite gewesen und bis heute geblieben.

Inhaltsverzeichnis

1	EINLEITUNG	1
1.1	UAV-Einsatz im bemannt-unbemannten Team.....	1
1.2	UAV-Automation und Führungsparadigmen	3
1.3	Problemstellung	6
1.4	Forschungsgegenstand	7
1.5	Aufbau der Arbeit.....	9
2	GRUNDLAGEN	10
2.1	Führungsspanne	10
2.2	Automation unbemannter Fluggeräte	14
2.2.1	Operationelle Systeme im Einsatz	14
2.2.2	Aktuelle Forschungsansätze der UAV-Führung	20
2.3	Human Factors der UAV-Führung	25
2.3.1	Missionsflexibilität	25
2.3.2	Aufgabenverteilung zwischen Mensch und Maschine	26
2.3.3	Automationskomplexität	27
2.3.4	Delegationsverhältnis Mensch – UAV.....	30
2.4	Perspektiven durch kognitive Automation	32
2.5	Analyse der Arbeitssystemkonfiguration.....	34
2.5.1	Konzept Arbeitssystem	34
2.5.2	Arbeitssystem „UAV-Führung aus dem bemannten Cockpit“	35
2.5.3	Integration künstlich kognitiver Einheiten in das Arbeitssystem	36
2.6	Evaluierung konventioneller Automation.....	39
3	AUFTRAGSBASIERTE UAV-FÜHRUNG	43
3.1	Auftrag und Auftragstaktik	43
3.2	Konzept	44
3.3	Aufgaben als Interpretation von Aufträgen	45
3.4	Anforderungen an auftragsbasiertes Führen	46
3.4.1	Anforderungen durch Missionsflexibilität	46
3.4.2	Folgerungen aus dem Delegationsverhältnis.....	48
3.4.3	Folgerungen aus dem Mensch-Maschine-Verhältnis	50

3.5	Vorgehensmodell zur Wissensmodellierung	51
3.5.1	Definition von Wissen	51
3.5.2	Wissenserhebung und -operationalisierung	52
3.6	Automationsgrade	55
3.6.1	Abstraktion	55
3.6.2	Verteilung der Autorität zwischen Mensch und Maschine	56
3.6.3	Interoperabilität	58
3.6.4	Neglect Tolerance	58
3.6.5	Stringenz durch Delegation und Intervention	60
3.7	Kooperation	63
4	DESIGN UND IMPLEMENTIERUNG	65
4.1	Kognitiver Prozess	65
4.1.1	Modelle menschlicher Kognition	65
4.1.2	Sichtweisen des kognitiven Prozesses	68
4.2	Künstlich Kognitive Einheiten	70
4.3	Adaptierbare Automation	71
4.4	Rollenbasierte Kooperation	72
4.5	Günstige Gelegenheiten	74
4.6	Wissensrepräsentation und -struktur	75
4.6.1	Einordnung in den kognitiven Prozess	75
4.6.2	Wissenspakete	77
4.7	Subsymbolische Wissensverarbeitung	107
4.7.1	Motivation	107
4.7.2	Umsetzung	109
4.8	Mensch-Maschine-Schnittstelle	111
4.8.1	Sensorsicht	111
4.8.2	Auftragsverwaltung	111
5	EVALUIERUNG	114
5.1	Hypothesen	114
5.2	Versuchsordnung	115
5.2.1	Versuchspersonen	115
5.2.2	Missionen	116
5.2.3	Cockpit	118
5.2.4	Missionssimulation	121
5.3	Leistungsmaße	122
5.3.1	Missionserfolg	123
5.3.2	Aufklärungsleistung	123
5.4	Verhalten der Versuchspersonen	125
5.4.1	Gegenüberstellung Operateur- zu Kommandantentätigkeiten	126
5.4.2	Verwendung der UAV-Automationsgrade	131

5.5	Befragung der Versuchspersonen	135
5.5.1	Situationsbewusstsein	135
5.5.2	Beanspruchung der Versuchspersonen	137
5.5.3	Bewertungen durch die Versuchspersonen.....	141
6	ZUSAMMENFASSUNG UND AUSBLICK	146
A	LITERATURVERZEICHNIS	I
B	ABKÜRZUNGSVERZEICHNIS	XIX
C	BEWERTUNG DER VERSUCHSANORDNUNG DURCH DIE VERSUCHSPERSONEN	XXI
C.1	Missionsbriefing	xxi
C.2	Einweisung und Training.....	xxii
C.3	Führung der UAV	xxiii
D	BEARBEITUNG VON AUFTRAGSELEMENTEN IN DEN VERSUCHSMISSIONEN	XXV
D.1	Mission 1	xxvi
D.2	Mission 2	xxviii

1 Einleitung

Ziel dieser Arbeit ist es, Missionen bemannter Hubschrauber sicherer, flexibler und effizienter zu gestalten. Hierzu sollen die Fähigkeiten von heute schon verfügbaren unbemannten Luftfahrzeugen (engl.: UAV – Uninhabited Aerial Vehicle) in Form abgesetzter Sensorplattformen für die Helikopterbesatzung verfügbar gemacht werden. Mit dem Ansatz der in dieser Arbeit beschriebenen, auftragsbasierten Führung kann diese Integration erfolgen.

1.1 UAV-Einsatz im bemannt-unbemannten Team

Motiviert von dem Gedanken, Missionen für die Crews militärischer Helikopter flexibler und sicherer zu gestalten, soll für die Besatzung nicht nur die Sensorik des Helikopters zur Verfügung stehen, sondern es sollen auch abgesetzte Sensoren zum Einsatz kommen. Dazu wurde im Rahmen des Forschungsprojekts „Manned-Unmanned Teaming – Abgesetzte Sensorplattform“ (MUM-T) am Institut für Flugsysteme der Universität der Bundeswehr München die Integration mehrerer unbemannter Fluggeräte in eine militärische Helikoptermission untersucht. Ziel der Integration ist die Nutzung der Aufklärungsfähigkeiten abgesetzter Sensoren für die Vorabklärung von Routen und Landeplätzen. Die Missionen, die hierbei betrachtet werden, orientieren sich an asymmetrischen Konflikten im Rahmen friedenssichernder Missionen. Der Schwerpunkt der betrachteten Missionen bilden dabei Einsätze nach dem „*Concept of Airmobile Operations*“ [ATP 49(E) 2004], welche eine hohe Bandbreite möglicher Szenarien umfasst:

“The uncertainties of today’s security situation make it less easy to determine how and where NATO forces may be employed. They must be capable of a graduated response across a range of possible operations. They could be called upon to participate in Military Operations Other Than War (MOOTW), for example the provision of humanitarian aid or assistance in peace support operations, or at the other end of the spectrum to engage in regional or sub-regional conflict.” [ATP 49(E) 2004]

Die Vorabklärung erfolgt in aktuellen Missionen durch vorab entsendete Bodentruppen und während der laufenden Mission durch separate Aufklärungshelikopter:

“Small numbers of helicopters may be used in the surveillance and reconnaissance role for the reconnaissance of pickup zones, flight and vehicle routes, objective areas and landing zones. They may also be used to improve security for aviation elements and ground forces by providing a screen to give early warning of adversary activity [...]” [ATP 49(E) 2004]

Da diese Aufklärungsoperationen mit bemannten Helikoptern den Einsatz von Helikoptercrews über nicht oder nur unzureichend erkundeten und aufgeklärten Gebiet bedeutet, kann es nach [ATP 49(E) 2004] zu Gefährdungen durch Wettereinflüsse oder feindliche Aktivitäten kommen.

Um diese Gefährdungen frühzeitig zu erkennen und flexibel darauf reagieren zu können, werden im Projekt MUM-T Aufklärungsaufgaben durch unbemannte

Fluggeräte übernommen. Sie ersetzen zumindest in Teilen die Aufklärungshelikopter, wodurch weniger Personal im potentiell gefährdeten Gebiet eingesetzt werden muss. Durch den Einsatz mehrerer unbemannter Fluggeräte kann erreicht werden, dass zum einen die Sensorabdeckung erhöht und zum anderen auch zur eigentlichen Missionsplanung alternative Flugrouten und Gebiete mit ausreichendem Zeitvorlauf erkundet werden können. Um diese Vorteile in vollem Umfang nutzen zu können, sollen die unbemannten Aufklärungseinheiten ebenso in die Mission integriert werden, wie es bisher die bemannten Aufklärungsrotten sind. Somit ist die Führung der UAVs aus einem bemannten Helikopter notwendig, idealerweise werden sie vom Kommandanten des bemannten Helikopters geführt. Andernfalls wäre eine Reaktion auf Situationsänderungen nur mit dem zeitlichen Verzug nötig, den eine Abstimmung zwischen dem Kommandanten des bemannten Helikopters und einer dedizierten UAV-Führungsstation bewirkt. Benötigt der Kommandant des Helikopters in diesem Fall zeitnahe Aufklärungsinformation, bedarf es hierfür zunächst der Anforderung der benötigten Information von einer UAV-Kontrollstation. Damit verbunden ist zwangsweise ein erheblicher Kommunikationsaufwand, um das erwartete Lagebild zeitnah und in der erwarteten Qualität und Umfang zu erhalten.

Nutzt man hingegen UAVs als abgesetzte Sensorplattformen, unmittelbar geführt aus der eigenen, fliegenden Plattform, entsteht damit eine Konfiguration, in der der Kommandant eines Helikopters gleichzeitig mehrere unbemannte Fluggeräte zu führen hat. Sowohl Bediener als auch Entwickler der unbemannten Komponente (engl.: Uninhabited Aerial System – UAS) stehen damit vor der Aufgabe, aus den bemannten und unbemannten Einheiten, die an der Mission beteiligt sind, ein Team zu bilden.

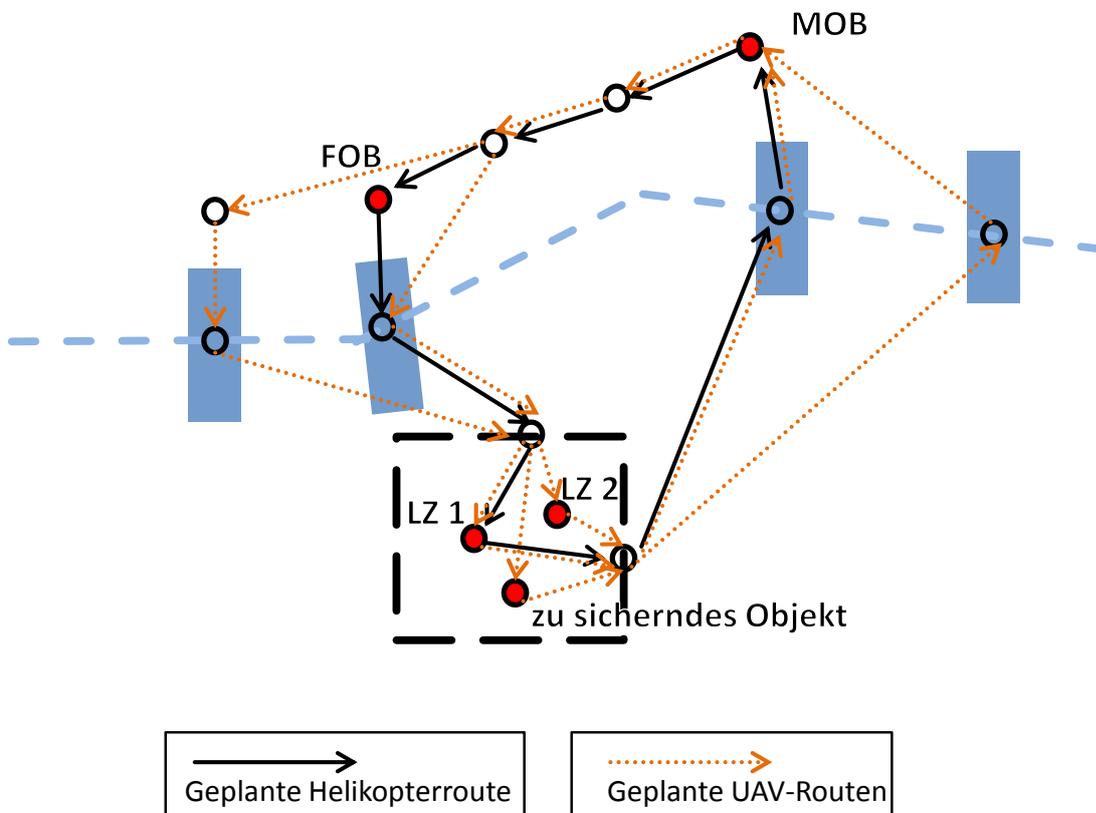


Abbildung 1-1: Schematische Darstellung einer MUM-T Mission

Zur Verdeutlichung zeigt Abbildung 1-1 ein schematisches Beispiel für die Planung eines luftgestützten Einsatzes, der in einer MUM-T-Konfiguration durchgeführt werden

soll. Das Missionsziel ist das Aufnehmen von Truppen an einer vorgelagerten Operationsbasis (engl.: FOB – Forward Operating Base) und deren Absetzen an einer Landezone in der Nähe eines zu sichernden Objekts innerhalb des Einsatzgebiets (schwarz gestrichelte Box). Die Mission beginnt und endet an der MOB (engl.: Main Operating Base). Die Basen befinden sich im Beispiel in ungefährdetem Gebiet, die Grenze zum Gebiet mit möglicher Feindaktivität ist blau gestrichelt dargestellt und darf von eigenen Einheiten nur an den mit blauen Rechtecken gekennzeichneten Korridoren überquert werden.

Eine mögliche Vorplanung für den UAV-Einsatz ist in der Abbildung mit orangen Pfeilen dargestellt. Durch den Einsatz von drei unbemannten Fluggeräten können im Beispiel alle alternativen Korridore, die alternative Landezone LZ2 sowie das zu sichernde Objekt zeitnah und sicher in der laufenden Mission erkundet werden. Variationen dieses Einsatzszenarios werden in Kapitel 5 vorgestellt.

MUM-T soll jedoch nicht nur vorgeplante Missionen plangemäß durchführen können, sondern auch beim Auftreten a priori unbekannter Ereignisse dynamisch reagieren können. Diese Forderung wird in den Abschnitten 2.3.1 erläutert und durch die für den UAV-Operateur immer verfügbare Möglichkeit der Änderung der UAV-Aufträge bzw. deren geplanter Ausführung erfüllt (Abschnitt 3.6.5 und Kapitel 4).

1.2 UAV-Automation und Führungsparadigmen

Um den genannten Zweck der Sicherheits- und Effizienzsteigerung in dynamischen Missionen zu erreichen, muss das eingesetzte Mittel – also die unbemannten Fluggeräte – geeignet in die Mission integriert werden. Dazu müssen die UAVs mit Automationsfunktionen ausgestattet werden, die diese Integration in das Mensch-Maschine-Team unterstützen.

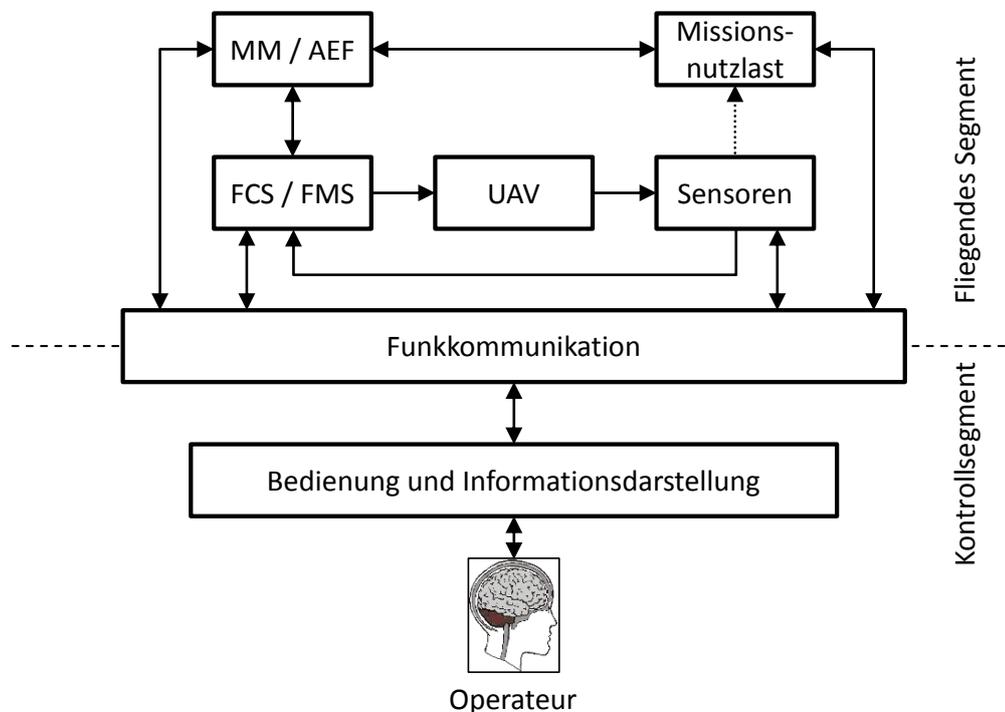


Abbildung 1-2: Schematischer Aufbau eines Führungs- und Missionssystems eines UAVs nach [Kriegel 2011]

Der in Abbildung 1-2 dargestellte Aufbau eines UAS (engl.: Uninhabited Aerial System) nach [Kriegel 2011] zeigt die Komponenten eines Systems bestehend aus einem fliegenden Segment¹ und dem Kontrollsegment. Automationsfunktionen können eingebracht werden in

- der Bedien- und Informationsdarstellung als Assistenzsystem zur Unterstützung des menschlichen Operateurs bei seiner Führungsaufgabe [Rauschert 2013; Donath et al. 2010].
- den Systemen FCS (engl.: Flight Control System) und FMS (engl.: Flight Management System). Diese Automationsfunktionen dienen der Lageregelung, Stabilisierung, Bahnführung und Lenkung des unbemannten Fluggeräts [Kriegel 2011].
- der Missionsnutzlast als Teil der Sensoren, z.B. in Form von Sensorfusionssystemen, oder als Regelmechanismen zur Steuerung der Sensoren und Aktoren.
- den Bereichen des Missionsmanagement (MM) und der Autonomy Enabling Functions (AEF) zur weitgehend selbständigen Durchführung von Missionsanteilen oder kompletten Missionen. Hierbei entscheidet das Missionsmanagementsystem über die Nutzung entsprechender AEFs wie z.B. der Fähigkeit, Wegpunktlisten oder Trajektorien abzufliegen.

Diese Arbeit fokussiert sich auf Automatisierungsfunktionen des Missionsmanagements. Für diese werden im Folgenden verschiedene Metriken vorgestellt. Speziell bei der Betrachtung von Missionsmanagement und AEF werden verschiedene Ansätze der UAV-Führung verfolgt, welche in Abschnitt 2.2.2 präsentiert werden.

Bei der Betrachtung von Metriken für Automationsfunktionen fällt auf, dass unterschiedliche existieren um Automation bzw. die Fähigkeiten von unbemannten Systemen allgemein zu bewerten [Clough 2002]. Generell lassen sich diese Bewertungsmaßstäbe unterteilen in die Erfassung der eingesetzten Technologien und Automationsfunktionen und Maße zur Bewertung dieser Technologien durch den Vergleich mit dem Verhalten von Menschen (oder anderen biologischen Systemen). Im Vergleich mit menschlichen Eigenschaften wird z.B. Überlebensfähigkeit des Systems in verschiedenen Umgebungen [Hasslacher und Tilden 1995; Clough 2002] bewertet:

“If you’re replacing a human, why not measure like one?” [Clough 2002]

Ferner kann die die Fähigkeit des unbemannten Systems, menschliche Wahrnehmungs- und Entscheidungsprozesse sowie Handlungen abzubilden, bewertet werden [Cleary et al. 2000]. Ebenfalls genutzt wird der aus der menschlichen Entscheidungsfindung insbesondere im militärischen Kontext bekannte OODA-Loop (engl: observe, orient, decide, act) [Hammond 2004]. Hierbei wird die Wahrnehmungsphase nach [Cleary et al. 2000] weiter unterteilt in die Erfassung der Umwelt und des eigenen Zustands (observe) und die Interpretation der Umwelt anhand von Wissen und Erfahrung (orient).

Komplexere Metriken wie das ALFUS-Framework [Huang 2006, 2008], das darauf aufbauende, für Drehflügel-UAVs angepasste ALFURS-Framework [Kendoul 2012] oder das von [Li und Wang 2012] postulierte, hierarchische Evaluierungsmodell verwenden jeweils mehrere Skalen zur Bestimmung des Automationsgrads und der

¹ UAV bezeichnet in dieser Darstellung lediglich „Airframe und die Grundsysteme“ [Kriegel 2011]. In den folgenden Ausführungen wird die Abkürzung UAV in Übereinstimmung mit der Literatur als Synonym für das fliegende Segment verwendet.

Integrationsfähigkeit unbemannter Systeme. Diese Klassifizierungsschemata entfernen sich von der Analogie zu einem menschlichen oder biologischen System und verwenden stattdessen primär Eigenschaften von fliegenden Robotersystemen.

Zu diesen Eigenschaften zählen physische Größen wie Abmessungen, Volumen, Masse, Reichweite und maximale Masse der Nutzlast der Systeme [Kendoul 2012]. Weiteres Merkmal ist der Führungsaufwand bzgl. Zeit, Training und Fähigkeiten des Operateurs und der Anzahl gleichzeitig führbarer, unbemannter Fluggeräte. Je nach Metrik wird diese Eigenschaft als Unabhängigkeit vom Operateur (engl.: „human independence“) bezeichnet [Huang 2006, 2008], als genereller Grad der Unabhängigkeit von externen Systemen [Kendoul 2012], als *“neglect tolerance”* [Olsen und Goodrich 2003] oder sie wird in einer Bewertung der Mensch-Maschine-Schnittstelle zusammengefasst [Li und Wang 2012]. Weiteres gemeinsames Merkmal der Automatisierungsmetriken ist die Einbeziehung der Umweltbedingungen, unter denen die unbemannten Fluggeräte agieren können. Diese werden in ALFUS [Huang 2006], ALFURS [Kendoul 2012] sowie in der von [Li und Wang 2012] vorgeschlagenen Metrik berücksichtigt.

Sollen nicht nur bereits existierende oder entworfene Systeme evaluiert werden, sondern außerdem zusätzlich Simulationen von unbemannten Systemen berücksichtigt werden, so kann für diese der *„Echtheitsgrad als Maß für die Wiedergabetreue“* [Kriegel 2011] der Vehikelsimulation sowie der *„Realismusgrad des Verhaltens der Missionselemente“* [Kriegel 2011] angegeben werden. Die im Rahmen dieser Arbeit und im Projekt MUM-T verwendete Simulationsumgebung (siehe Abschnitt 5.2.4) stellt sowohl das bemannte als auch die unbemannten Systeme mittels einer Flugdynamiksimulation dar und beinhaltet dynamisch auf die Situation reagierende Umweltelemente.

Abschnitt 3.6 ordnet die in dieser Arbeit vorgestellte, auftragsbasierte Führung in die Automationsgrade hinsichtlich ihres Abstraktionsgrades, der Verteilung von Autorität zwischen Mensch und Maschine, der Interoperabilität, der Neglect Tolerance ein. Zusätzlich wird das neue Konzept der Stringenz vorgestellt, das eine implizite und intuitive Anpassung des Automationsgrads durch den Bediener ermöglicht.

Ziel der Erhöhung des Automationsgrads ist im Rahmen dieser Arbeit die Integration mehrerer unbemannter Fluggeräte. Um dies zu erreichen ohne Reibungsverluste in der Kommunikation zwischen UAV-Führung und Missionsführung zu erzeugen, sollen mehrere unbemannte Fluggeräte durch den Kommandanten eines bemannten Helikopters geführt werden. Dieses als *Führungsspanne* (vgl. Abschnitt 2.1) bezeichnete Verhältnis von unbemannten Systemen zur Anzahl der Bediener muss folglich größer als eins sein. Die Auswirkungen dieser Forderung umfassen den Ausschluss aller Führungsparadigmen, die eine zeitkontinuierliche, unterbrechungsfreie Führung eines unbemannten Systems verlangen, da dann bereits bei der Führung eines einzelnen Systems keine Ressourcen zur Führung eines weiteren zur Verfügung stehen.

Mit dem Ausschluss der *direkten, manuellen Führung* stellt sich die Frage, mit welchen alternativen Ansätzen unbemannte Fluggeräte geführt werden können. Operationelle Systeme verfolgen vielfach den Ansatz der *wegpunkt- oder trajektorienbasierten Führung* (Abschnitt 2.2.1), wobei der Flugweg eines unbemannten Fluggeräts vor der Mission vorgegeben und während der Mission abgeflogen wird. Bei einer bestehenden Datenfunkverbindung zum Fluggerät kann der Flugpfad auch während der laufenden Mission angepasst werden. Neben der direkten Manipulation des Flugwegs kann diese auch aus dem gewünschten Einsatz von Missionssensoren erfolgen. Die Vorgabe, ein Gebiet oder eine bestimmte Strecke zu überwachen wird dabei in ein Flugmuster und

Vorgaben für die Sensorik für ein UAV umgesetzt [Kutta Technologies 2012; Thomson 2009; Breece und Meely 2010]. In aktuellen Forschungsansätzen wird die *Vorgabe von Verhaltensmustern* oder Spielzügen für die parallele Führung mehrerer unbemannter Fluggeräte untersucht [Miller et al. 2005]. Durch die Abbildung menschlichen Teamverhaltens im aus mehreren unbemannten Fluggeräten bestehenden *maschinellen Team* kann ein einzelner übergeordneter, an das Team vergebener Auftrag gemeinsam durch die kooperierenden UAVs des Teams bearbeitet werden [Meitinger 2008]. In der vorliegenden Arbeit wird hingegen ein Ansatz vorgestellt, in dem *mehrere Aufträge an ein Team* von unbemannten Fluggeräten vergeben werden. Dieses Team wird diese Aufträge basierend auf der aktuellen Situation und den Einsatzgrundlagen interpretieren, kommunizieren, bei sich bietenden Gelegenheiten kooperieren und ansonsten proaktiv Möglichkeiten zur Informationsgewinnung in der Mission nutzen.

Eine Gemeinsamkeit dieser Führungsparadigmen ist, dass das Verhalten des einzelnen Fluggeräts direkt durch den Operateur – wenn auch auf unterschiedlichen Abstraktionsstufen – vorgegeben und zwischen Operateur und Fluggerät kommuniziert wird. Diese Eigenschaft findet sich nicht im Führungsparadigma des *Swarmings*. Dieses nimmt sich biologisches Schwarmverhalten zum Vorbild. Die Führungsspanne wird dadurch erhöht, dass emergentes Verhalten genutzt wird, das sich aus wenigen, einfachen Verhaltensregeln der Individuen ergibt. Das Individuum wird nicht direkt durch den Operateur gesteuert, stattdessen werden Rahmenparameter vorgegeben, die ein gewünschtes Verhalten generieren sollen. Der Flugweg der einzelnen UAVs ist dem Operateur nicht bekannt, der hinter dem eigenen Verhalten stehende Auftrag muss dem einzelnen UAV nicht bekannt sein. Stattdessen verhält sich das eigene Vehikel nach dem Schwarmalgorithmus, z.B. indem es ähnlich einer Ameise einer virtuellen Pheromonspur folgt, die in einem zu patrouillierenden Gebiet ausgelegt wurde [Saget et al. 2008].

1.3 Problemstellung

Der Einsatz abgesetzter Sensoren, welche in einer komplexen, militärischen Helikoptermission durch den Kommandanten eines bemannten Helikopters geführt werden sollen, erfordert eine Integration der unbemannten Fluggeräte, die diese Sensoren transportieren.

Der bisherige Einsatz von UAVs wird meist als eigenständig vorgeplante Mission durchgeführt. Die Kenntnis des Einsatzziels, der Einsatzgrundsätze und die Aufgabe, aus dem Einsatzziel Aufgaben und somit Bedienaktionen für UAV-Subsysteme abzuleiten, liegen allein in der Verantwortung der UAV-Bediener. In den in Abschnitt 1.2 angeführten Führungsparadigmen „manuelle Führung“, „wegpunktbasierte Führung“, „Vorgabe von Verhaltensmustern“ und beim Swarming kennt oder interpretiert weder das Fluggerät selbst noch eines seiner Teilsysteme die Absicht des Bedieners oder die Einsatzgrundsätze der Mission. Diese im Folgenden als *konventionelle Automation* bezeichneten Automationsarten können den Operateur somit *nicht in seiner kognitiven Aufgabe unterstützen*, seine Missions- und Handlungsziele in Bedienaktionen zur Führung der unbemannten Fluggeräte umzusetzen.

Wird versucht, das aktuelle Führungsparadigma von operationellen Systemen, nämlich die wegpunktbasierte Führung von UAVs mit separater Bedienung der Sensorsysteme, als Führungskonzept in den MUM-T-Kontext zu übertragen so zeigt sich, dass der Bediener seiner Kommandantenaufgabe nicht mehr in ausreichendem Maße nachkommen kann, ein verfälschtes und unvollständiges Abbild der aktuellen Situation

hat und es zu Bedienfehlern kommt [Uhrmann et al. 2009]. Bedienfehler und Beanspruchung des Operateurs steigen dabei mit der Führungsspanne an.

Die Verwendung von Swarming erlaubt zwar eine Führungsspanne über eins, jedoch steht ihr in MUM-T entgegen, dass die bemannte Komponente der Mission einem Missionsplan folgt, in den die UAVs zu integrieren sind. Dieser Missionsplan besteht in einer zeitlichen und kausalen Abfolge von Aktionen, welche bei einer Situationsänderung innerhalb der laufenden Mission aktualisiert und innerhalb des Teams kommuniziert werden. Da im Swarming jedoch dem einzelnen Individuum, also dem UAV, die Aktionsfolge nicht im Vorhinein bekannt ist, kann es diese auch nicht kommunizieren².

Betrachtet man zum Vergleich aktuelle Helikoptermissionen, welche ohne unbemannte Komponenten durchgeführt werden, so ist ersichtlich, dass dort bemannte Helikopter als Aufklärungskomponenten zum Einsatz kommen und durch einen für die Gesamtmission verantwortlichen Kommandanten – dem Schwarmführer – geführt werden. Wenn diese bemannte Aufklärungsrotte durch unbemannte Systeme ersetzt bzw. ergänzt werden soll, so liegt es nahe, *das Führungskonzept der bisher bemannten auf die nun unbemannten Komponenten zu übertragen*.

Für die derartige Integration mehrerer, mit Missionssensoren ausgestatteten UAVs als Einheiten in einer bemannt-unbemannten Mission mit dynamischen, nicht vorplanbaren Anteilen und Zielsetzungen, muss ein Teil dieser Fähigkeiten und Verantwortlichkeiten – also ein Teil der kognitiven Fähigkeiten der Bedienmannschaft – auf das UAV übertragen werden. Die Führung der unbemannten Fluggeräte soll auf derselben Hierarchiestufe erfolgen, auf der auch menschliche Teilnehmer der Mission effizient geführt werden. Wie menschliche Missionsteilnehmer sollen deshalb auch unbemannte Einheiten die Aufträge der Führungsinstanz verstehen und durchführen können.

Die Kernfrage dieser Arbeit lautet daher:

Wie kann ein Kommandant eines bemannten Helikopters mehrere unbemannte Fluggeräte in einer militärischen Mission zur Steigerung der Gesamteffizienz und Flexibilität auftragsbasiert führen?

Diese Frage wird insbesondere vor dem Hintergrund betrachtet, dass es sich bei der parallelen Führung mehrerer UAVs um die Bedienung komplexer technischer Systeme und die Übernahme der Verantwortung für mehrere unbemannte Fluggeräte handelt. Diesen neuen Aufgabenbereich und diese Verantwortung hat der Kommandant neben der Verantwortung für die eigene, bemannte Plattform zu übernehmen.

1.4 Forschungsgegenstand

Um die obige Frage zu beantworten, wird im Folgenden betrachtet, welche Faktoren die Nutzung von unbemannten Fluggeräten als abgesetzte Sensorplattform bisher einschränken.

Zu diesen Faktoren zählen zum einen die bereits erwähnten *Einsatzarten*. In flexiblen Missionen mit dynamischen Umplanungen und der Integration von unbemannten Systemen in ein bemannt-unbemanntes Szenario ist eine stetige Anpassung von Sensorkonfigurationen und Flugwegen mit einer hohen Belastung für das Bedien-

² Diese Einschränkung schließt jedoch nicht die Verwendung von Schwarmalgorithmen *innerhalb* einer Teilaufgabe zu deren gemeinsamen Durchführung durch mehrere unbemannte Fluggeräte aus.

personal verbunden. Diese ist das Resultat einer starken Wechselwirkung zwischen den Sensorergebnissen der UAV und deren Flugwegen einerseits und dem geplanten Flugweg des bemannten Helikopters andererseits. Diese starke und durchaus gewünschte Wechselwirkung ist durch ein geeignetes Instrument zur Führung der unbemannten Einheiten zu ermöglichen. Zweck dieser starken UAV-Integration in diese Einsatzart ist die Risikominimierung durch möglichst aktuelle und umfassende Aufklärungsergebnisse. Um die Wechselwirkung innerhalb eines luftgestützten Einsatzes zu ermöglichen wird in dieser Arbeit gezielt Wissen aus der Domäne der luftgestützten Operationen auch für die unbemannte Komponente operationalisiert, so dass sie innerhalb dieser Domäne agieren kann und mit dem Operateur in Begriffen der Domäne kommunizieren kann.

Ein weiterer Faktor der Betrachtung ist die durch die parallele Missions- und UAV-Führung beim Operateur generierte *Beanspruchung*. Diese muss durch geeignete Maßnahmen auf ein Niveau gehalten werden, auf dem der Operateur seine Verantwortung in allen Aufgabengebieten wahrnehmen kann, ohne überlastet zu sein. Beanspruchungsinduzierte Fehler, die dem operationellen Vorteil des UAV-Einsatzes entgegenstehen, sollen damit vermieden werden. Selbstadaptive Strategien nach [Donath 2012] können dabei toleriert werden, solange die operationellen Vorteile überwiegen. Dieser Aspekt wird in Abschnitt 2.1 im Detail betrachtet.

Verwandt mit dem Begriff der Beanspruchung ist die Thematik der menschlichen *Ressourcen* [Wickens 2002; Maiwald und Schulte 2011] des Operateurs. Wickens unterscheidet hierbei nach Wahrnehmung, Verarbeitung und Reaktion (engl.: perception, cognition, response). Da im Helikoptercockpit die Kommunikation innerhalb der Crew und mit anderen Truppenteilen primär über Sprache erfolgt, wurde bei der UAV-Führung eine visuelle Mensch-Maschine-Schnittstelle (Abschnitt 4.8) gewählt, um keine zusätzlichen auditiven Ressourcen zu binden.

Um den Operateur in seinen kognitiven Verarbeitungsressourcen zu entlasten und somit auch seine Beanspruchung zu senken, werden *kognitive Aufgaben im Rahmen der auftragsbasierten Führung durch das Fluggerät selbst übernommen*. Zu diesen gehören

- die Interpretation von Umweltdaten anhand abstrakter Konzepte.
- das Verständnis der vom Operateur spezifizierten Aufträge, welche sich auf den Missionskontext beziehen. Insbesondere soll nicht nur ein aktueller Auftrag, sondern eine komplette Agenda von Aufträgen durch den Operateur kommandiert werden können.
- Wissen und Fähigkeiten zur maschinellen Problemlösung zur Durchführung der Aufträge.
- Wissen und Fähigkeiten zur Maschine-Maschine-Kooperation innerhalb eines Auftrags oder daraus abgeleiteter Aufgaben.
- das Einhalten allgemeiner Einsatzgrundsätze.
- das proaktive Nutzen günstiger Handlungsmöglichkeiten.
- die Sicherstellung einer stets konsistenten Handlungsagenda und deren Kommunikation mit anderen Teammitgliedern, insbesondere dem Operateur.

Die Umsetzung dieser Punkte erfolgt mittels künstlicher Intelligenz, speziell mit *künstlich kognitiven Einheiten* an Bord der unbemannten Fluggeräte. Kapitel 3 stellt das zugehörige Konzept und Kapitel 4 die Umsetzung in einen Laborprototypen vor.

1.5 Aufbau der Arbeit

In Kapitel 2 werden die konzeptionellen Grundlagen sowie eine Auswahl zugrundeliegenden, aktuellen Forschungsarbeiten betrachtet. Die Grenzen konventioneller UAV-Führung werden im Hinblick auf die Human Factors der Integration unbemannter Systeme betrachtet. Ferner wird betrachtet, welche Potentiale kognitive Automation hinsichtlich dieser Grenzen hat.

Kapitel 3 beschreibt die auftragsbasierte UAV-Führung konzeptionell. Hierzu wird zunächst der Begriff des Auftrags im Sinne dieser Arbeit anhand des Führungsparadigmas der Auftragstaktik definiert. Es erfolgt ferner eine Abgrenzung und Vergleich zur Befehlstaktik. In Abschnitt 3.2 wird das Gesamtkonzept der auftragsbasierten Führung zusammengefasst, welches in den darauf folgenden Abschnitten in einzelnen Aspekten näher beleuchtet wird. Hierbei liegen die Schwerpunkte auf der Interpretation eines Auftrags durch den maschinellen Auftragsempfänger (Abschnitt 3.3), einer Analyse von Anforderungen an das Design eines zur auftragsbasierten Führung fähigen Systems (Abschnitt 3.4), einem iterativen Modell zur Wissensmodellierung und Systementwicklung (Abschnitt 3.5), der Einordnung auftragsbasierter Führung in verschiedene Skalen für Automation (Abschnitt 3.6) und einer Betrachtung von rollenbasierter Kooperation unbemannter Fluggeräte (Abschnitt 3.7).

Für die Erläuterung von Design und Implementierung wird in Kapitel 4 zunächst der Kognitive Prozess als maschinelles Abbild eines Modells menschlicher Denkprozesse zur Entwicklung künstlich kognitiver Einheiten betrachtet. Die der auftragsbasierten Führung inhärente adaptierbare Automation (Abschnitt 4.3), die rollenbasierte Kooperation (Abschnitt 4.4) und die Nutzung von operationell günstigen Gelegenheiten durch die Automation (Abschnitt 4.5) werden erläutert. In Abschnitt 4.6 wird schließlich das Wissen in Form eines ausführbaren Modells ausführlich vorgestellt, wobei anhand des konkret implementierten Wissens auch die Designgrundlagen der Abschnitte 4.3-4.5 aufgegriffen werden. Das Augenmerk von Abschnitt 4.7 richtet sich auf die Integration der Symbole verarbeitenden Schicht in die analoge Umwelt. Schließlich wird in Abschnitt 4.8 die Bedienschnittstelle beschrieben.

Kapitel 5 beinhaltet die Evaluierung des Forschungsprototyps im Helikoptersimulator des Instituts für Flugsysteme der Universität der Bundeswehr mit einsatzerfahrenen Helikopterpiloten der Heeresfliegertruppe. Die Ergebnisse dieser Versuchskampagne werden präsentiert und hinsichtlich ihrer Aussagen zur Eignung der auftragsbasierten Führung im Kontext dynamischer, flexibler, militärischer Helikoptermissionen interpretiert. Dazu werden in Abschnitt 5.1 die den Versuchen zugrundeliegenden Annahmen bzgl. auftragsbasierter UAV-Führung genannt. Abschnitt 5.2 beschreibt die Versuchsanordnung sowie die in der Simulation dargestellten, militärischen Missionen. In den folgenden Abschnitten werden jeweils Messmethoden und Messergebnisse bzgl. der in den Versuchsmissionen erbrachten Leistungen (Abschnitt 5.3), des beobachtbaren Verhaltens der Versuchspersonen (Abschnitt 5.4) sowie durch Befragung der Versuchspersonen gewonnene Ergebnisse (Abschnitt 5.5) präsentiert.

Schließlich werden in Kapitel 6 die Ergebnisse zusammengefasst und mögliche weitere Forschungsfragestellungen und Entwicklungsmöglichkeiten aufgezeigt, die sich im Rahmen dieser Arbeit ergeben haben.

2 Grundlagen

Um künftig UAVs ähnlich wie Menschen zu führen, soll im Folgenden zunächst das bisherige Vorgehen in der Führung von bemannten wie auch unbemannten Einheiten näher erläutert werden.

Das folgende Kapitel liefert dafür einen Einblick, mit welchen Paradigmen Führung allgemein und speziell im militärischen Umfeld erfolgt. Dazu wird der Begriff der Führungsspanne eingeführt. Außerdem werden verschiedene Ansätze zur Führung von unbemannten Fluggeräten vorgestellt. Dabei werden gegenwärtig operationell betriebene Systeme und verschiedene Forschungsansätze für alternative Führungsmöglichkeiten betrachtet. Insbesondere werden Perspektiven neuartiger, kognitiver Automation für die Führung von unbemannten Fluggeräten aus dem Helikoptercockpit erläutert.

2.1 Führungsspanne

Die Führungsspanne bezeichnet das Verhältnis von im Einsatz befindlichen unbemannten Fluggeräten zu der Anzahl menschlicher Bediener, die für den Betrieb nötig sind.

Angelehnt ist diese Definition an den Begriff der Leitungsspanne aus der Wirtschaftswissenschaft:

„Unter der Leitungsspanne, synonym auch als Führungsspanne, Kontrollspanne oder Subordinationsquote bezeichnet, wird [...] diejenige Anzahl direkt unterstellter Mitarbeiter verstanden, über die ein Vorgesetzter unmittelbares Weisungsrecht, Verantwortung und Kontrolle im Rahmen seiner Führungslegitimation besitzt.“ [Kreitz et al. 2008]

Analog dazu werden bei der Mensch-Maschine-Führung für die Führungsspanne nur maschinelle Einheiten berücksichtigt, die durch einen Bediener oder einem Team aus Bedienern *direkt, unmittelbar* und *verantwortlich* kontrolliert. Diese Einschränkung hat folgende Auswirkungen:

- Werden mehrere maschinelle Systeme *indirekt* geführt, z.B. über eine Automation, die UAV-Sensoren und UAV-Flugsteuerung zu einem Gesamtsystem zusammengefasst, so geht nur das Gesamtsystem als eine einzelne Einheit in die Berechnung der Führungsspanne ein. Um dennoch verschiedene UAV-Führungsansätze zu vergleichen, wird in Abweichung von diesem Grundsatz als Anzahl der Systeme stets die *Anzahl der geführten Fluggeräte* zugrunde gelegt. Andernfalls ergäbe sich für ein einzelnes durch einen Bediener geführtes Fluggerät dieselbe Führungsspanne von 1 wie für ein Fluggerät, das aus fünf Komponenten besteht, die jeweils durch einen Bediener geführt werden.
- Nur wenn ein System von einer Bedienmannschaft tatsächlich geführt wird, wird dieses in die Führungsspanne miteinbezogen. Sind beispielsweise in einer Mission unbemannte Fluggeräte eingesetzt, so wird für die Führungsspanne nur deren Bedienmannschaft betrachtet, nicht jedoch andere Einheiten, die Aufklärungsinformationen von dieser Bedienmannschaft anfragen oder erhalten. Diese anderen Einheiten führen, wenn überhaupt, das unbemannte Fluggerät nur *mittelbar* über die eigentliche Bedienmannschaft.

- Wird ein System *ohne die alleinige Verantwortung* geführt, weil etwa eine zusätzliche Bedienmannschaft das Fluggerät kontinuierlich überwacht und jederzeit korrigierend eingreifen und die Bedienaktionen der primären Bediener übersteuern kann, so zählt das System nur zur Führungsspanne der zusätzlichen, nicht aber der primären Bedienmannschaft.

Unter Berücksichtigung dieser Beschränkungen sind einer Erhöhung der Führungsspanne Grenzen gesetzt. Diese „*Einschränkungen und Begrenzungen [...] ergeben sich bereits aus den art- und mengenmäßigen Beschränkungen der menschlichen Verarbeitungskapazität für Informationen in Form von Informationsüberlastung, Informationsmangel, Unbestimmtheit und Unverständnis*“ [Kreitz et al. 2008].

Bei der Betrachtung der nicht beliebig zu erhöhenden Führungsspanne einerseits und der Vorteile im Hinblick auf Sicherheit und Informationsgewinnung durch den UAV-Einsatz andererseits, stellt sich die Frage nach der optimalen Führungsspanne.

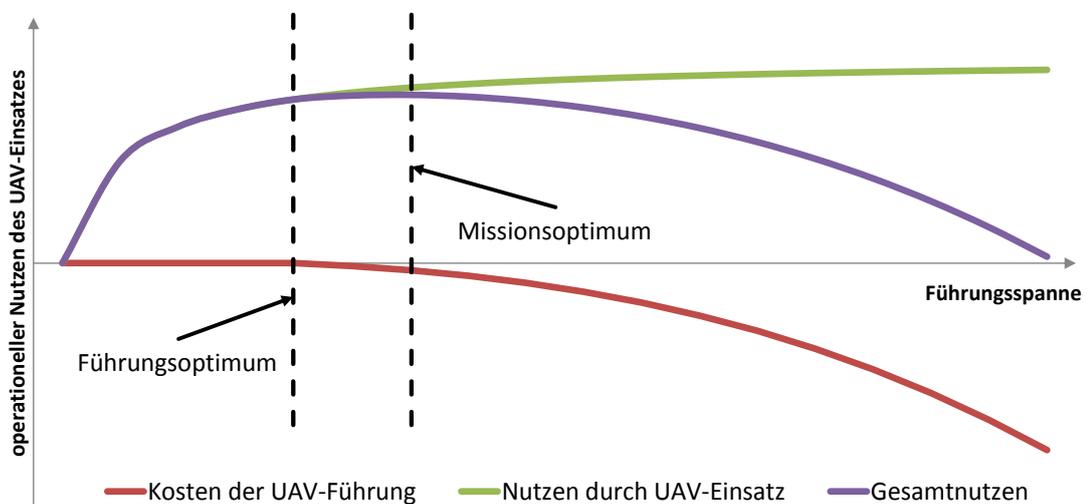


Abbildung 2-1: Qualitative Darstellung der optimalen Führungsspanne

In Anlehnung an den aus den Wirtschaftswissenschaften bekannten Kostenverlauf in Abhängigkeit der Leitungsspanne [Kreitz et al. 2008] zeigt Abbildung 2-1 den Nutzen durch den Einsatz unbemannter Aufklärungssysteme auf die durchzuführende Mission. Auf der Abszisse ist hierbei die Führungsspanne angetragen. Die Graphen beginnen bei einer Führungsspanne von Null, was einem Verzicht auf UAVs entspricht. Auf der Ordinatennachse ist der operative Nutzen für die Gesamtmission durch den Einsatz von unbemannten Fluggeräten angetragen. Dieser besteht in der Verfügbarkeit zusätzlicher Information über die Routen und missionsrelevante Objekte im Einsatzgebiet. Aus diesem Informationsvorsprung ergibt sich eine Risikominderung für Personal und eigene Einheiten.

Mit der roten Linie sind die Kosten angetragen, die dadurch entstehen, dass die eingesetzten, unbemannten Fluggeräte nicht optimal genutzt werden und das Bedienpersonal sowohl mit der Führung als auch der Datenauswertung überfordert wird. Die Führungsspanne, ab der dieser Effekt eintritt, wird als *Führungsoptimum* bezeichnet. Bis zu diesem Führungsoptimum werden analog zu [Kreitz et al. 2008] keine nachteiligen Effekte durch den Führungsaufwand erwartet. Die Kosten, welche in Form von menschlichen Ressourcen dem einzelnen Operateur bereits ab der Führung eines einzelnen UAVs entstehen, sind hierbei nicht berücksichtigt. Die Betrachtung zielt

auf nachteilige Effekte für den Gesamtmissionsverlauf durch Überbeanspruchung des Operators.

Mittels der grünen Linie ist der positive Effekt durch den Einsatz von unbemannten Fluggeräten auf die Gesamtmission angetragen. Mit zunehmender Führungsspanne, d.h. dem Einsatz von mehr UAVs, steigt die Menge der dadurch gewonnen Informationen. Somit sinken mit steigender Führungsspanne die Kosten durch Informationslücken und damit einhergehender Gefährdung von Personal. Bei zunehmender Anzahl von UAVs kann von einem Sättigungseffekt ausgegangen werden, wodurch weitere unbemannte Aufklärungsflugzeuge nur noch einen geringen Nutzen hinsichtlich der Gesamtmission generieren können. In Abbildung 2-1 flacht deshalb die grüne Linie mit zunehmender Führungsspanne ab.

Überlagert man beide Effekte, so ergibt sich der in Violett dargestellte Verlauf des Gesamtnutzens. Die Führungsspanne, welche den maximalen Nutzen generiert, soll hier als *Missionsoptimum* (vgl. „organisationsoptimale Leitungsspanne“ [Kreitz et al. 2008]) betrachtet werden. Nimmt man an, dass die ab dem Führungsoptimum einsetzenden Nachteile der UAV-Führung – also die suboptimale Nutzung der Ressourcen der UAVs – noch durch das Mitführen weiterer unbemannter Fluggeräte überkompensiert werden, so ist das Missionsoptimum nicht mit dem Führungsoptimum identisch.

Somit kann die Erhöhung der Führungsspanne für die Mission auch dann noch sinnvoll sein, wenn die Fähigkeiten des einzelnen unbemannten Fluggeräts dadurch nicht jederzeit vollständig genutzt werden können. Tritt diese Überkompensation nicht auf, so ist das Führungsoptimum mit dem Missionsoptimum identisch. Das Missionsoptimum kann ferner nie unter das Führungsoptimum fallen, da sich für die Gesamtmission keine negativen Effekte ergeben, wenn die unbemannten Fluggeräte ohne Einschränkung geführt werden können. Mit der Erhöhung der führungsoptimalen Führungsspanne geht daher immer eine Erhöhung der missionsoptimalen Führungsspanne einher.

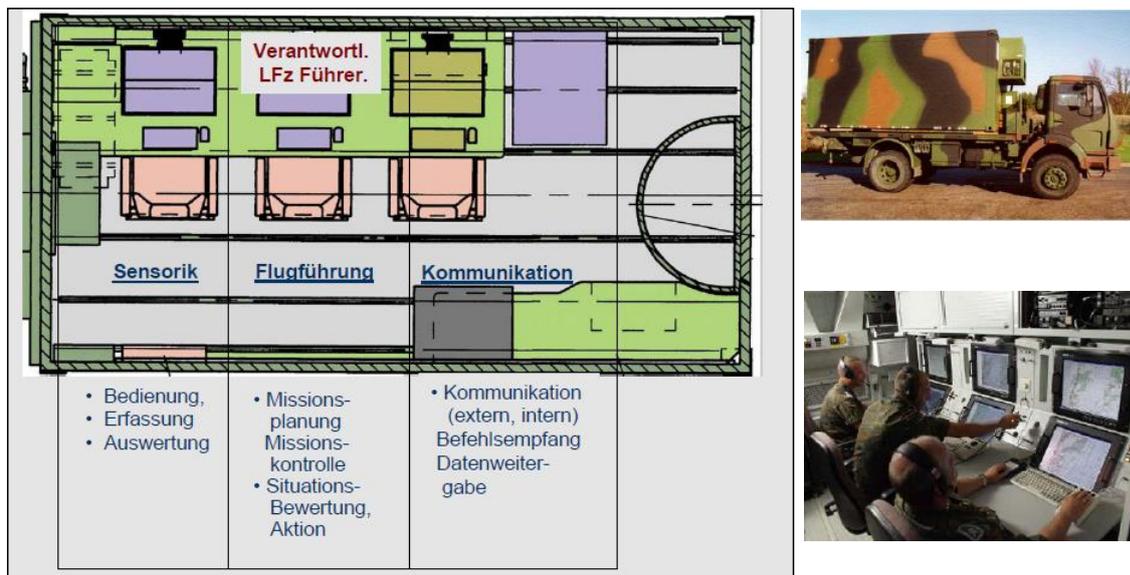


Abbildung 2-2: Bodenkontrollstation KZO [Wohlers und Blohm 2007]

Betrachtet man nun die aktuell im operativen Einsatz befindlichen, unbemannten Flugsysteme, dann ist bei allen pro Fluggerät mindestens ein menschlicher Bediener in der Bodenkontrollstation eingesetzt, also die Führungsspanne höchstens 1. So existieren bei den deutschen Systemen KZO (Kleinfluggerät Zielortung) [Wohlers und Blohm

2007] und Luna [EMT 2009] sowie bei den Predator- und Reaper-Modellen des U.S.-Militärs [U.S. Air Force 2012a, 2012b] und dem für verschiedene UAV-Typen nutzbaren Tactical Control System der US Navy [Johnson et al. 2007] folgende Rollen:

- Ein Bediener ist verantwortlich für die *Flugführung*. Hierzu zählen die Missionsplanung, die Kontrolle des Flugwegs, die Bewertung der aktuellen Situation und daraus resultierende Anpassungen der Flugwegplanung. Die Flugführung erfolgt je nach System durch
 - einen vorgeplanten Flugweg. Hier überwacht der für die Flugführung verantwortliche Bediener lediglich den Abflug des vorher in Form einer Koordinatenliste übertragenen und genehmigten Flugplans und greift lediglich in Notsituationen in die Flugführung ein. In [Wohlers und Blohm 2007] heißt es hierzu für das System KZO „*Die Drohne fliegt einen geplanten und genehmigten Flugweg. Es erfolgen keine eigenen, autonomen Flugwegerstellungen.*“.
 - einen vorgeplanten, jedoch während der Mission editierbaren Flugplan im System Luna [EMT 2009]. Alternativ ist eine Führung mit Stick und Throttle möglich: „*Steuerung: Automatikflug (3D Wegpunktliste) und/oder ferngesteuert. Flugprogramme können während des Fluges geändert werden.*“ [EMT 2009]
 - vorgeplante oder während der Mission an der Bodenkontrollstation geplante Wegpunktlisten oder durch direkte Führung nach Sichtflugregeln (engl.: VFR – Visual Flight Rules). Nach [Hazlebeck 2011] wird im System Predator das Fluggerät mit einer in der Nähe des Startplatzes befindlichen Bodenkontrollstation (engl.: LRE – Launch and Recovery Element) gestartet und auf einer definierten Höhe in eine Warteschleife gebracht und an eine entfernte Kontrollstation in den USA übergeben. Die Landung erfolgt wieder durch das LRE nach Sichtflugregeln.
- Ein weiterer Bediener ist verantwortlich für die Bedienung der *Sensorik* und die Auswertung der Sensorinformationen.
- Ein für die *Kommunikation und Koordination der Mission* verantwortlicher Bediener ist zuständig für die Kommunikation mit der übergeordneten Führung und ebenso für die interne Kommunikation zwischen den Bedienern. Diese Rolle ist je nach Einsatz und Ausrüstung des UAS optional: “*The basic crew for the Predator consists of a pilot to control the aircraft and command the mission and an enlisted aircrew member to operate sensors and weapons plus a mission coordinator, when required.*” [Hazlebeck 2011]



Abbildung 2-3: Tragbare Bodenkontrollstation des Systems Aladin [EMT 2012]

Nur für kleine Systeme mit geringer Einsatzdauer wie dem System Aladin wird eine Führungsspanne von 1 angegeben (siehe Bodenstation in Abbildung 2-3). Erreicht wird dies durch die Vorabplanung des Flugwegs, die Reduktion des Einsatzzwecks auf Videoübertragung in Echtzeit und dem Einsatz in Missionsteilen, in denen Konflikte mit anderen Luftfahrzeugen oder Bodentruppen a priori ausgeschlossen werden können.

2.2 Automation unbemannter Fluggeräte

Im Folgenden wird ein Überblick über einige ausgewählte, unbemannte Flugsysteme und deren Führungsparadigmen sowie über aktuelle Forschungsansätze im Bereich der Führung unbemannter Fluggeräte gegeben.

2.2.1 Operationelle Systeme im Einsatz

Bereits heute handelt es sich bei unbemannten Fluggeräten im operationellen Einsatz um hochautomatisierte Systeme. Solche Automation ist ausgelegt für unterschiedliche Arten und Anwendungen unbemannter Fluggeräte. Einige Klassifizierungsschemata und typische UAV-Anwendungsgebiete werden in Abschnitt 2.2.1.1 vorgestellt.

Im Hinblick auf die Eingriffsebenen des Menschen in das System kann die UAV-Automation als hierarchisch betrachtet werden. Abschnitt 2.2.1.2 zeigt diese Hierarchie anhand der Eingriffsebenen des Operators auf.

2.2.1.1 UAV-Klassifizierungen und Einsatzgebiete

“A surprising and seemingly vast number of different types of UAVs exist in the literature, with different capabilities responding to different user needs.” [de Bento 2008]

Nach Bauart, Einsatzradius und Größe der unbemannten Fluggeräte werden verschiedene Kategorien von UAVs unterschieden, die auf unterschiedlichen Eingriffsebenen wie sie im vorhergehenden Abschnitt erläutert wurden geführt werden [Eisenbeiss 2004]:

Kategorie	Masse [kg]	Reichweite [km]	Flughöhe [m]	Einsatzdauer [h]
Micro	< 5	< 10	250	1
Mini	< 25	< 10	~ 300	< 2
Close Range	25 – 150	10 – 30	3000	2 – 4
Medium Range	50 – 250	30 – 70	3000	3 – 6
High Altitude	> 250	> 70	> 3000	> 6

Tabelle 2-1: Kategorien unbemannter Fluggeräten nach [Eisenbeiss 2004]

Die Klassifizierungen sind nicht einheitlich geregelt, so wird in [Australian Government 2011] unterteilt in „micro UAV“ für unbemannte Fluggeräte mit einem Gesamtgewicht von bis zu 100 Gramm, „large UAV“ für Fluggeräte mit einem Volumen von über 100m³ oder mehr als 150kg Abfluggewicht (100kg für Helikopter). Alle anderen unbemannten Fluggeräte gehören nach [Australian Government 2011] zu den „small UAVs“. Verbreitet ist die Einteilung militärischer UAVs nach [Burchardt et al. 2011] nach maximalen Abfluggewicht (engl.: maximum takeoff weight – MTOW) in kleine UAVs bis zu 25kg, taktische UAVs von 25kg bis 600kg, Gefechtsfeld-UAVs über 600kg. Letztere werden in [Burchardt et al. 2011] auch als „Kampf-UAV“ bezeichnet, sofern sie über Aufnahmemöglichkeiten für Wirkmittel verfügen. De Bento unterteilt in [de Bento 2008] in vier ähnliche Kategorien, nämlich „Micro/Mini-UAV“, „Tactical UAV“, „Strategic“ (entspricht Close Range und Medium Range) und „Special Task“, wobei „Strategic“ der HALE-Klasse (engl.: High Altitude, Long Endurance) entspricht und „Special Task“ spezielle UAV erfasst, die in oder oberhalb der Stratosphäre operieren, Radar stören oder als Täuschkörper fungieren [de Bento 2008].

Weitere Klassifizierungen orientieren sich an der notwendigen Koordination mit bemannten Fluggeräten und den Lufträumen, in denen der UAV-Einsatz erfolgen soll [CAA 2002; Weibel 2002; Friehmelt 2004]. Das deutsche Luftverkehrsgesetz unterscheidet hierfür in der „Sonderbestimmung bei Prüfung und Zulassung unbemannter Luftfahrzeuge der Bundeswehr“ (zitiert nach [Friehmelt 2004]) in drei Kategorien:

- Nach Kategorie 1 darf das Luftfahrzeug nur in abgesperrtem Luftraum über abgesperrtem Gebiet betrieben werden.
- Nach Kategorie 2 darf das Luftfahrzeug nur in abgesperrtem Luftraum betrieben werden. Das Gelände für Start und Landung ist ebenfalls zu sperren. Im Unterschied zu Kategorie 1 muss das überflogene Gelände nicht abgesperrt werden.
- Nach Kategorie 3 darf das Luftfahrzeug über nicht abgesperrtem Gebiet und in nicht abgesperrtem Luftraum betrieben werden.

In nichtmilitärischen Anwendungen werden UAVs nach [Weibel 2002] in folgenden Bereichen eingesetzt oder erprobt:

- In der Anwendung als Trägerplattform für *dislozierte Sensoren* werden UAVs im Bereich der Meteorologie, der Geographie, Archäologie, in der Landwirtschaft (siehe auch [Reidelstürz und Schulte 2010]), der Überprüfung von Stromleitungen

und Bauwerken wie Brücken als auch in der Filmproduktion [Aibotix GmbH 2012; Luftbild-Service-System Deutschland GmbH 2012] eingesetzt.

- Im Bereich des *Katastrophenschutzes* sind Anwendungen zur Detektion von Chemikalien, der Waldbrandbekämpfung [Gouqing Zhou et al. 2005] sowie der Vermisstensuche und Erstversorgung [Doherty und Rudol 2007] in Erprobung.
- Im Rahmen *polizeilicher Aufgaben* werden unbemannte Fluggeräte unter anderem zur Grenzkontrolle [Flesher et al. 2011; Burchardt et al. 2011; Girard et al. 2004], zur Verkehrsüberwachung [Puri et al. 2007; Srinivasan et al. 2007], der Kontrolle illegaler Müllentsorgung [Yamaha Motor Co. Ltd. 2002] und der Beobachtung von Menschenmengen (engl.: crowd control) eingesetzt bzw. erprobt.
- Der *Transport von Fracht* mit UAVs wird dort für sinnvoll angesehen, wo andere Infrastruktur nicht vorhanden, nicht leistungsfähig genug oder nicht sicher zu benutzen ist [Stupakis 2003]. Im Gegensatz zum Gütertransport durch unbemannte Fluggeräte ist für den kommerziellen Personentransport keine ausreichende Akzeptanz in der Bevölkerung zu erwarten [MacSween-George 2003].



Abbildung 2-4: Yamaha "RMAX" UAV (Bild: [Yamaha Motor Co. Ltd. 2002])

Zum Frachttransport im weiteren Sinne zählen auch das in der Landwirtschaft genutzte Bestäuben von Pflanzen sowie das Ausbringen von Dünger und Pflanzenschutzmitteln. Yamaha produziert und vertreibt hauptsächlich für diese Anwendung das Drehflügel-UAV „RMAX“ [Yamaha Motor Co. Ltd. 2002] (siehe Abbildung 2-4).

- Für die Nutzung in *Kommunikationsnetzwerken* werden UAVs verwendet, um Relaisstationen und Mobilfunkinfrastruktur bei Bedarf in ansonsten schlecht erschlossenen Gebieten zu etablieren oder um kurzzeitig erhöhten Bedarf an Kommunikationsinfrastruktur zu decken [Romeo et al. 2007; Miura et al. 2002], wie er z.B. bei Massenveranstaltungen entstehen kann.

Militärische Anwendungen von UAVs können per se alle möglichen zivilen Einsatzbereiche beinhalten. Darüber hinaus sind folgende weitere Nutzungsmöglichkeiten gegeben:

- In der Verwendung als abgesetzter Sensorträger kann die unbemannte Komponente für die *Aufklärung und Erkundung* von Hindernissen, Zielen, Landeplätzen und Gefahren wie Feind oder Sprengfallen (engl.: improvised explosive device – IED) verwendet werden.
- Durch die hohen Einsatzzeiten im Bereich von 20 bis 40 Stunden, die einige operationelle UAVs mitbringen [Flesher et al. 2011], können unbemannte

Fluggeräte auch für die *Überwachung* von Personen und Fahrzeugen eingesetzt werden.

- Die Nutzung als *Waffenträger* ermöglicht Wirken, ohne eigenes Personal exponieren zu müssen.
- In der Rolle als *Zielbeleuchter* können unbemannte Fluggeräte ohne Gefahr für eigene bemannte Einheiten den Waffeneinsatz unterstützen.
- Weitere Anwendungen finden militärisch genutzte UAVs als Störer [Brown et al. 2007], Täuschkörper und für Übungszwecke.



Abbildung 2-5: MQ-9 Reaper (Bild: [U.S. Air Force 2012b])

In der Regel sind militärisch genutzte Fluggeräte so konfigurierbar, dass mehrere der genannten Einsatzbereiche abgedeckt werden können. So wird das System MQ-9 Reaper (siehe Abbildung 2-5) eingesetzt für *“intelligence, surveillance, reconnaissance (ISR), close air support (CAS), combat search and rescue (CSAR), precision strike, buddy-laser, convoy/raid overwatch, route clearance, target development, and terminal air guidance.”* [U.S. Air Force 2012b] Der Anfangsbuchstabe M steht bei den U.S.-Systemen für die Verwendung unbemannter Fluggeräte in mehreren Rollen [U.S. Air Force 2012a, 2012b]. Da die Fähigkeiten ISR und CAS häufig in einem Fluggerät kombiniert sind, werden sie gemeinsam mit dem Term C4ISTAR (engl.: Command, Control, Communication, Computers, Intelligence, Surveillance, Target Acquisition and Reconnaissance) zusammengefasst. Insbesondere in der Klasse der taktischen UAV werden UAVs in die Gruppen „C4ISTAR“ und „C4ISTAR mit Wirkmittel“ unterschieden.

2.2.1.2 Führungsebenen unbemannter Flugsysteme

Die in Abschnitt 1.2 präsentierten Komponenten der Führung unbemannter Luftfahrzeuge sollen im Folgenden hinsichtlich der Eingriffs- und Führungsebenen des Operateurs betrachtet werden.

Da bei der der UAV-Nutzung historisch immer mehr Automation eingeführt wurde, entfernt sich der UAV-Bediener vom Konzept des *Teleoperators* hin zu *Supervisory Control* [Sheridan und Verplank 1978; Sheridan 1992].

Nach Sheridan handelt es sich beim Teleoperator um eine Person, die ein disloziertes Gerät bedient, indem sowohl die Steuerkommandos für die Aktoren als auch die Informationen der Sensoren direkt auf Bedien- bzw. Anzeigeräte in einer Kontrollstation umgesetzt werden. Diese Art der Führung wird von Sheridan auch als *„Direct Control“* bezeichnet:

„A vehicle having sensors and actuators for mobility and/or manipulation, remotely controlled by a human operator, and thus enabling him to extend his sensory-motor function to remote or hazardous environments.“

[Sheridan und Verplank 1978]

In derartigen Konfigurationen kann Automation sowohl in der Kontrollstation als auch im Vehikel eingeführt werden, um Steuereingaben der Bediener zu interpretieren. Dazu werden gegebenenfalls Sensordaten von der Automation genutzt und unter Umständen für den Bediener aufbereitet. Diese oft in mehreren Schichten in das System eingebrachte Automation bewirkt den Übergang von Teleoperator Control zu *Supervisory Control*:

„A hierarchical control scheme whereby a (teleoperator or other) device having sensors, actuators and a computer, and capable of autonomous decision making and control over short periods and restricted conditions, is remotely monitored and intermittently operated directly or reprogrammed by a person.“ [Sheridan und Verplank 1978]

Die Definition nennt bereits eine wesentliche Eigenschaft der Supervisory Control: Die Automation erfordert nicht mehr eine kontinuierliche Steuerung durch den Bediener, sondern kann über gelegentliche (engl.: intermittent) Eingriffe geführt werden.

„Dabei initiiert und überwacht der Operateur auf höchster Ebene, d.h. auf der Ebene von Verfahren (Prozeduren) und Zielsetzungen (Intentionen) die Automatisierungsprozesse und greift im Falle von Änderungen der Ziele oder bei Abweichungen des Prozesses von der Zielsetzung in die Steuerung oder Regelung ein.“ [Herczeg 2002]

Zwischen diesen Eingriffen kann die Automation selbständig, jedoch zeitlich begrenzt den gewünschten Betriebszustand einnehmen bzw. aufrechterhalten.

Aus dieser Definition lässt sich jedoch auch ableiten, dass der Bediener im Gegensatz zur Direct Control das Gesamtsystem aus Automation und Vehikel meist nicht mehr direkt bedient, sondern lediglich mittelbar über die verschiedenen Komponenten und Funktionen der eingesetzten Automation. Hieraus ergibt sich eine neue Art von Aufgaben für den Bediener, nämlich die Überwachung dieser Automationsfunktionen.

Abbildung 2-6 stellt die typisch für Supervisory Control genutzte Automationshierarchie unbemannter Flugsysteme dar. Angelehnt ist diese an die Automationshierarchie in der Führung bemannter Flugzeuge nach [Onken und Schulte 2010]. Bei der UAV-Führung wird in der Regel strikt zwischen dem Fluggerät und der eingesetzten Nutzlast unterschieden. Die Abbildung visualisiert die Automatisierung des Fluggeräts, ohne auf die Nutzlastführung einzugehen.

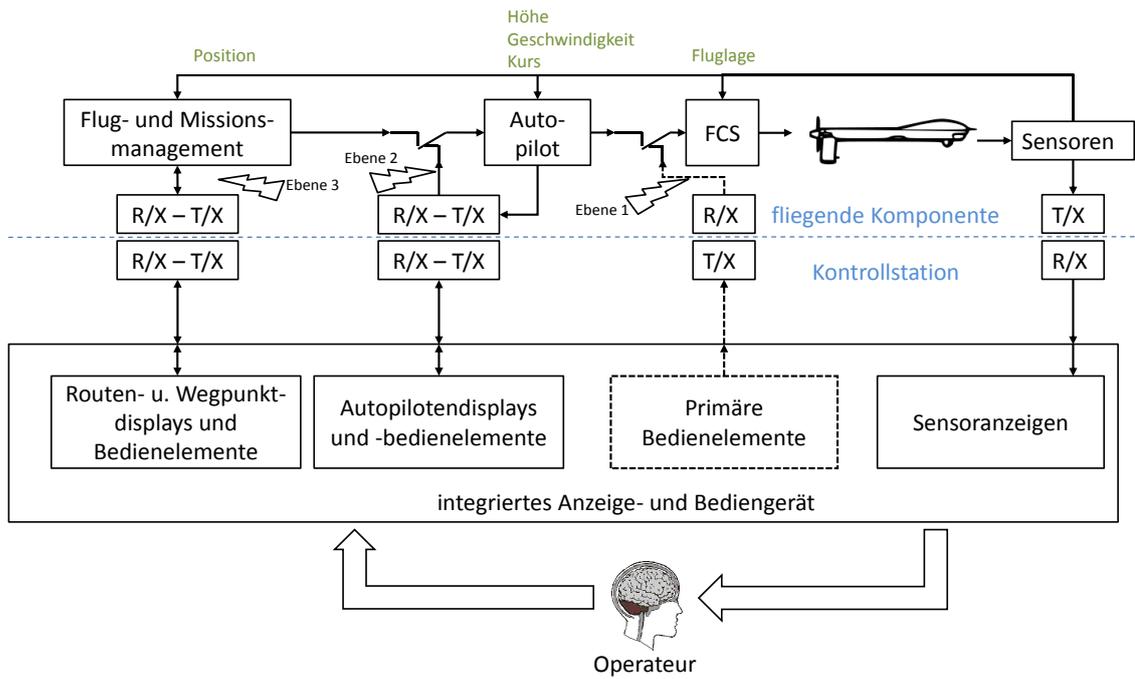


Abbildung 2-6: Führungsebenen unbemannter Fluggeräte

Abhängig von der um das UAS realisierten Automatisierung bieten sich damit für den Operateur verschiedene Eingriffs- bzw. Führungsebenen. So kann die Führung des UAVs durch direkte Steuervorgaben (Ebene 0) realisiert werden (in Abbildung 2-6 nicht dargestellter direkter Zugriff auf die Aktuatoren des UAVs). Diese dienen als unmittelbare Vorgaben für den das Steuerungssystem des Fluggeräts, also als Kommando zur Ansteuerung der Steuerflächen und der Drosselklappen (engl.: throttle) [Onken und Schulte 2010]. Auf der nächsten Automationsebene werden die Eingaben als gewünschte Fluglage durch ein Flugregelungssystem interpretiert und die Steuerflächen entsprechend angesteuert (Ebene 1 in Abbildung 2-6). Erkauft wird die damit erreichte einfachere Steuerung des Fluggeräts mit der Aufgabe der direkten Kontrolle der Steuerflächen („Fly-by-Wire“ nach [Klußmann und Malik 2007]). Zur Realisierung entsprechender Funktionalitäten sind bereits hochzuverlässige Systeme und deren Zertifizierung nach luftfahrtgängigen Regularien erforderlich. In diesen ersten beiden Ebenen ist ein kontinuierlicher Eingriff des Menschen notwendig [Onken und Schulte 2010]. Dieser entfällt bei der Führung über den Autopilot (Ebene 2) durch die Vorgabe von Sollhöhen, -geschwindigkeiten und -kursen bzw. Steig- und Sinkraten. Mit der Vorgabe von Wegpunkten, Flugpatterns und der Integration von Routenplanungsfunktionen in ein Flug- und Missionsmanagementsystem auf der dritten Automationsebene kann schließlich ein kompletter Flug von Start bis Landung a priori kommandiert und mehr oder weniger automatisch, d.h. mit nur relativ wenigen Interaktionen durchgeführt werden. Im Anwendungskontext von MUM-T, d.h. bei der Durchführung einer dynamisch anzupassenden Mission und der parallelen Führung mehrerer unbemannter Fluggeräte, hat sich jedoch gezeigt, dass selbst die Führung über ein Missionsmanagementsystem zu Bedienfehlern, Leistungseinbrüchen und degenerierter Situationswahrnehmung führen [Uhrmann et al. 2009]. Als Ursachen konnte die parallele Führung mehrerer unbemannter Systeme neben der ohnehin schon beanspruchenden Gesamtmissionsführung identifiziert werden. Parallel dazu war die Missionssensorik durch den Operateur zu bedienen und zu überwachen. Bei unerwarteten Ereignissen, die eine schnelle und möglichst gleichzeitige Umplanung

mehrerer unbemannter Fluggeräte nach sich zog, wurden trotz Missionsmanagementsystems sehr viele Bedieninteraktionen in kurzer Zeit notwendig.

Für eine genauere Betrachtung der im Rahmen von operationellen Systemen verwendeten Automatisierungsebenen sei an dieser Stelle auf [Kriegel 2011] verwiesen.

2.2.2 Aktuelle Forschungsansätze der UAV-Führung

Neben den in Abschnitt 2.2.1 skizzierten Automationsfunktionen werden derzeit weitere erprobt bzw. vorgeschlagen. Deren Ziel ist eine Automatisierung des Vehikels über die Wegpunktvorgabe hinaus, um den Bediener zu entlasten, Synergieeffekte beim Einsatz mehrerer UAVs zu schaffen und nicht zuletzt die optimale Führungsspanne zu erhöhen. Aktuell existieren verschiedene Forschungsansätze, um diese Ziele zu erreichen. Im Folgenden werden zu den Hauptrichtungen der Führung mittels vordefinierter Verhaltensweisen, mittels generischer Optimierungs- bzw. Schwarmalgorithmen und für die Führung mittels Zielvorgaben jeweils ausgewählte Arbeiten angeführt.

2.2.2.1 Vordefinierte Verhaltensweisen

Bei der Führung mittels vordefinierter Verhaltensweisen beinhaltet das aus Kontrollstation und unbemannten Flugsystemen bestehende System (engl.: UAS – uninhabited aerial system) eine Bibliothek aus Verhaltensweisen, welche durch den Operateur abgerufen und parametrisiert werden können.

Hierzu schlägt Miller in [Miller et al. 2004] die Playbook-Architektur vor, bei der ein einzelner Bediener Verhaltensmuster von einem oder mehreren Fluggeräten anfordert. Dieses Führungsparadigma ist an Mannschaftssportarten angelehnt, bei denen der Trainer einzelne Spielzüge (engl.: Plays) aus einem Vorrat von mehreren trainierten und eingeübten Spielzügen (engl.: Playbook) im Spiel abrufen [Miller et al. 2004]. So kann beispielsweise das Beobachten eines Gebiets über einen bestimmten Zeitraum angefragt werden. In [Miller et al. 2004] ist ebenfalls angedacht, weitere Parameter wie beispielsweise die Sichtbarkeit oder die Treibstoffeffizienz bei der Anfrage von Verhalten zu spezifizieren. Diese Parameter werden entweder numerisch angegeben, wie z.B. die lateralen Koordinaten eines Zielgebiets, oder aber aus einer vordefinierten Menge an möglichen Werten ausgewählt, wie z.B. niedrige, mittlere oder hohe Priorität des angefragten Verhaltens. Ein semantischer Bezug der Wertemenge der Parameter auf die aktuell durchgeführte Mission ist nicht vorgesehen.

Basierend auf diesen Parametern und dem angeforderten Verhalten werden ein oder mehrere Fluggeräte ausgewählt und deren Einsatz durch eine *zentrale Planungskomponente*, der „Analysis and Planning Component (APC)“ [Miller et al. 2004], vorgeplant. Diese verwendet das Planungswerkzeug SHOP2 (Simple Hierarchical Ordered Planner 2) [Nau et al. 2003]. SHOP2 ist ein domänennunabhängiges KI-Planungssystem, das basierend auf Hierarchical Task Networks (HTNs) die *Dekomposition vorgegebener Verhaltensmuster* durchführt. Dabei werden Methoden, die diese Dekomposition beschreiben, mit ihren Vorbedingungen definiert. Der Vorgang der Dekomposition erfolgt anhand eines vordefinierten Schemas [Lekavý und Návrat 2007] und ist dem Bediener laut [Miller et al. 2004] verborgen, jedoch kann das Ergebnis der Planung mit Darstellung der Dekompositionshierarchie dem Bediener angezeigt werden [Miller 2005]. Die Steuerung der einzelnen Fluggeräte erfolgt anhand dieser vordefinierten Dekompositionen von Plays in einzelne Handlungen in dem Framework VACS (engl.: Variable Autonomy Control System). Bei VACS handelt es sich um einen generischen Architekturansatz zur Führung eines oder mehrerer unbemannter Fluggeräte mit einer Kontrollstation auf unterschiedlichen Führungs- und

Automationsebenen, aus denen der Operateur auch während der laufenden Mission wählen kann [Duggan et al. 2009]. Innerhalb von VACS stehen nach [Duggan et al. 2009] verschiedene Module zur Verfügung, z.B. für Kollisionsvermeidung, Routenplanung, Fehlererkennung, Routenabflug (in [Duggan et al. 2009]: „*autonomous route following*“), für vorprogrammierte Manöver, manueller Flug mit Stick und Throttle. Diese Module werden über einen konfigurierbaren „intelligence synthesizer“ verbunden und koordiniert. Dieser kann die Verhaltensweisen einzelner Module statisch priorisieren und stellt die Verbindung zur Ausführungsschicht dar.

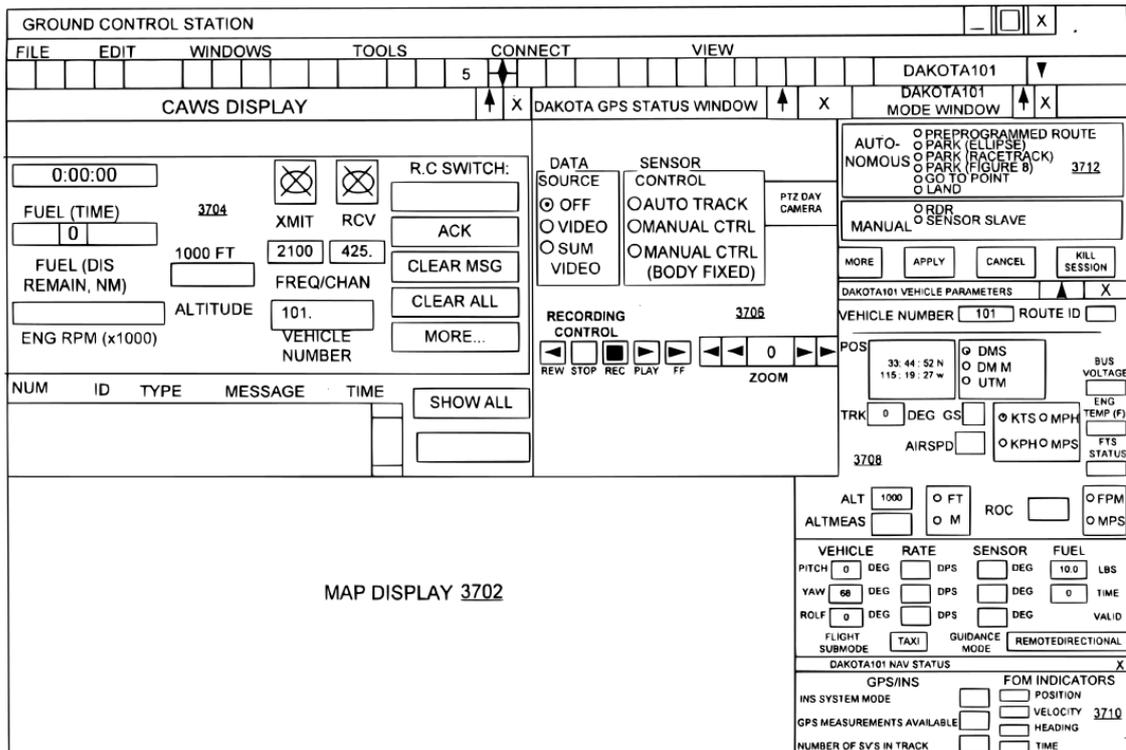


Abbildung 2-7: Vorschlag für VACS-Bedienchnittstelle aus [Duggan et al. 2009]

Abbildung 2-7 zeigt eine Seite der von [Duggan et al. 2009] vorgeschlagenen Bedienchnittstelle für VACS. Zielkoordinaten für Verhaltensweisen werden in VACS auf einer Karte designiert oder numerisch eingegeben. Die Rückmeldung erfolgt über Statusanzeigen, die auf die Fluggeräte bezogen sind.

Mit dem Ziel einer gemeinsamen Missionsdurchführung einer bemannten und einer unbemannten Plattform wird durch das U.S.-Militär der Helikopter Apache Longbow AH-64D im Rahmen der Aufrüstung „Block III“ mit der Möglichkeit versehen, ein UAV als externen Sensor, Zielbeleuchter und Waffenträger zu nutzen [Breece und Meely 2010; Thomson 2009] und damit die Fähigkeiten der bemannten Plattform zu erweitern. Die Möglichkeiten zur Flugführung beschränken sich nach [Breece und Meely 2010] für die Helikopterbesatzung auf folgende Kommandos:

- HOLD: Das UAV wird angewiesen, seine aktuelle Position zu umkreisen.
- DEST: Das UAV wird angewiesen, eine Zielposition direkt anzufliegen.
- PROG: Es wird eine vordefinierte Route durch das UAV abgeflogen.
- GUIDE: Das UAV folgt sukzessive dem vom Operateur vorgegebenen Sensorziel.

Hinsichtlich der Nutzlastführung hat der Kopilot die Möglichkeiten der manuellen Steuerung der Sensoren, der Vorgabe einer Koordinate, auf die der Sensor zu richten ist (und die im Modus GUIDE auch angefliegen wird) sowie der Betriebsart, bei der die Sensoren des UAV auf dieselbe Stelle gerichtet werden, auf die auch die Sensoren des Helikopters gerichtet sind. Letztlich handelt es sich bei diesem Ansatz um die Möglichkeit, vier verschiedene, vordefinierte und parametrisierte Verhaltensweisen des UAVs vom bemannten Helikopter aus abzurufen.

Bei dem in [Kutta Technologies 2012] vorgestellten Produkt MUM-TK (engl.: Manned / Unmanned Teaming Kit) können vordefinierte Verhaltensweisen eines unbemannten Fluggeräts aus dem Cockpit eines bemannten Helikopters genutzt werden.



Abbildung 2-8: Bediengerät für die Führung eines UAVs aus dem Helikopter mit MUM-TK nach [Kutta Technologies 2012]

Das am Bein des Operators befestigte und in Abbildung 2-6 dargestellte Bediengerät ermöglicht den Abruf folgender Funktionen [Kutta Technologies 2012]:

- Richten und Nachführen der Sensoren auf einen auf der Karte oder im Sensorbild designierten Punkt oder auf die Position des bemannten Helikopters
- Wahl einer Richtung, aus der ein Ziel beobachtet werden soll
- Wahl der Entfernung zwischen UAV und Ziel („standoff distance“ [Kutta Technologies 2012])
- Bestimmung eines mit bildgebenden Sensoren aufzuklärenden Flugwegs oder Gebiets
- Nutzung eines ggf. auf dem UAV vorhandenen Lasers zur Zielbeleuchtung oder Entfernungsbestimmung

Auf der Darstellung in [Kutta Technologies 2012] wird das UAV nicht von Kommandant oder Pilot geführt, sondern von einem dritten Arbeitsplatz an Bord des Helikopters.

2.2.2.2 Generische Optimierungs- und Schwarmalgorithmen

In einem weiteren Ansatz zur Erhöhung der optimalen Führungsspanne wird statt einer vorgegebenen Dekomposition von Aufgaben die Zusammenarbeit mehrerer UAVs als *globales Optimierungsproblem* dargestellt. In dieser Problemklasse ist es das Ziel, eine Größe – z.B. Zeitaufwand, Sichtbarkeit, Exposition [Ruz et al. 2006], Treibstoffverbrauch oder zusammengesetzte Kosten – zu minimieren oder zu maximieren (z.B. zeitliche oder räumliche Gebietsabdeckung). Diese Optimierung erfolgt unter Ein-

schränkungen, die durch physikalische Gegebenheiten bedingt sind, z.B. dass nicht mehr Treibstoff verbraucht werden kann, als anfänglich zur Verfügung steht. Ferner gibt es Einschränkungen bei der Optimierung, die durch den Operateur bei der Missionsplanung vorgegeben werden und Auswirkungen auf die Kostenberechnung haben, wie die Abwägung von Zeitaufwand zu Treibstoffverbrauch oder zu erreichende Wegpunkte. Es existieren verschiedene Ansätze, dieses globale Optimierungsproblem zu lösen. Sie lassen sich unterteilen in Ansätze, in denen eine *zentrale Planungsinstanz* das Verhalten aller beteiligten UAVs optimiert und in Ansätze, in denen durch *Schwarmalgorithmen* emergentes Verhalten des Gesamtsystems genutzt wird.

Eine Möglichkeit das Optimierungsproblem zu modellieren ist die Darstellung als lineares Gleichungs- bzw. Ungleichungssystem, welches mit Hilfe des *Mixed Integer Linear Programming* (MILP) [Richards und How 2005] gelöst wird. Die Lösungen bilden Vorgaben für die Flugtrajektorien der UAVs [Kamal et al. 2005]. Für die Integration des menschlichen Bedieners müssen dessen Anweisungen in Koeffizienten für MILP überführt werden, was in [Schouwenaars et al. 2006] für eine vordefinierte Menge von neun natürlichsprachlichen Sätzen gezeigt wird. Die Erhöhung der Führungsspanne ergibt sich dabei durch den Übergang der UAV-Führung auf die Formulierung von Anweisungen, welche als Optimierungsvorgaben auf ein System aus mehreren UAVs angewendet wird.

Weitere Möglichkeiten der zentralen Optimierung dienen der Trajektorienvorgabe für UAVs, welche gemeinsam eine vom Bediener vorgegebene Aufgabe lösen sollen. Hierzu zählen die Aufteilung eines zu patrouillierenden Gebiets mittels geeigneter Abdeckungs- und Dekompositionsalgorithmen [Maza und Ollero 2007; Passenbrunner et al. 2011] sowie die Generierung kollisionsfreier Trajektorien für die Beobachtung von Objekten oder Straßenzügen aus vom Benutzer vorgegebenen Blickwinkeln [Kaminer et al. 2006].

Insbesondere zur Gebietsabdeckung können auch Schwarmalgorithmen genutzt werden, bei der von einer zentralen Instanz nur Eingabeparameter für den Algorithmus, z.B. das zu erkundende Gebiet, vorgegeben werden. Die jeweiligen Trajektorien der Fluggeräte werden daraus durch die einzelnen UAVs, also den Individuen des Schwarms erzeugt. Zu diesen Ansätzen zählen die Aufklärung eines Gebiets, indem in diesem Gebiet eine virtuelles Pheromon ausgebracht wird, das als Attraktor für Fluggeräte wirkt und durch das Passieren eines Fluggeräts neutralisiert wird [Saget et al. 2008]. Andere Schwarmalgorithmen führen jedes unbemannte Fluggerät in einem zu überwachenden Gebiet dorthin, wo der Erwartungswert einer Entdeckung eines gesuchten Objekts am höchsten ist [Temple und Kingston 2011]. Analog zu den Pheromonen ändert sich der Erwartungswert mit der Sensorerfassung eines Bereichs durch ein UAV: Er sinkt auf Null, falls keine Entdeckung gemacht wurde und beginnt wieder anzusteigen, solange der Bereich unbeobachtet bleibt.

Ein spezielles Schwarmverhalten stellt der *Formationsflug* dar. Hierbei wird die Trajektorie eines Führungsvehikels vorgegeben. Bei diesem kann es sich um ein bemanntes oder unbemanntes Flugzeug oder bodengebundenen Fahrzeug handeln.

“A formation includes a leader and a number of followers. Guidance, navigation and control systems are needed, onboard the vehicles, to maintain the geometry of the formation. The followers try to maintain constant relative distances from neighboring vehicles, while the leader is responsible for navigation and trajectory tracking.” [Rabbath et al. 2011]

Die Pfade der restlichen Formation werden durch Schwarmalgorithmen vorgegeben, welche Distanz, Geschwindigkeit zu den Fluggeräten des Schwarms in der Umgebung und des Führungsverhikels beinhalten [Rabbath et al. 2011; Xu et al. 2011]. Die Reduktion der Führungsspanne erfolgt somit durch die Vorgabe der Trajektorie von genau einem Führungsverhikel während für die restlichen Luftfahrzeuge die Formation halten.

Wie bei allen Führungsansätzen, bei denen die Führung auf der Definition oder Parametrisierung eines globalen Optimierungsproblems basiert, ist auch beim Formationsflug das Verhalten der einzelnen Luftfahrzeuge für den Operateur intransparent. Er kann lediglich aus dem beobachtbaren Gesamtverhalten schließen, ob seine implizit vorgegebene Zielsetzung durch die Luftfahrzeuge erreicht bzw. unterstützt wird.

2.2.2.3 Zielbasierte UAV-Führung

Neben den Ansätzen, deren Kern eine KI-Planungskomponente darstellt, existieren weitere Forschungsaktivitäten, welche die Realisierung der Multi-UAV-Führung mittels *Softwareagenten* untersuchen. Eine hierbei häufig verwendete Architektur stellen BDI-Agenten [Russell und Norvig 2010] dar (engl.: belief, desire, intention), bei denen Umweltwahrnehmungen (beliefs), Handlungsziele (desires) modelliert werden und zu Handlungen (intentions) führen. Im Gegensatz zu den vordefinierten Handlungsweisen werden hier die Ziele der Handlungen an die unbemannten Fluggeräte übertragen. Das UAV verfügt damit über eine Repräsentation des Ziels und kann darauf aufbauend die eigenen Handlungen planen und durchführen. Diese Repräsentation des Ziels kennzeichnet ebenfalls den Unterschied zu den in Abschnitt 2.2.2.2 genannten Optimierungs- und Schwarmalgorithmen. Für diese wird zwar das Ziel durch den Operateur vorgegeben, es ist jedoch in den einzelnen Luftfahrzeugen nicht als Ziel repräsentiert, sondern beispielsweise als Kostenfunktion oder Pheromonverteilung.

Mitch Ferry et al. verwenden nach [Ferry et al. 2007] BDI-Agenten in UAV-Forschungsdemonstratoren des australischen Verteidigungsministeriums zur besseren Integration von unbemannten Fluggeräten in bestehende Kommandostrukturen und Missionsszenarien. In dieser Arbeit wurde gezeigt, dass durch die BDI-Architektur ein UAV kontinuierlich seine Ziele verfolgen, aktualisieren und auf Umgebungsänderungen reagieren kann. Die Zielvorgaben werden nach [Ferry et al. 2007] in ähnlicher Weise vorgegeben, wie dies im Briefing bemannter Einheiten erfolgt. Als Problem zeigte sich jedoch die Änderung von Zielen während der laufenden Mission, da je nach Situation eine hohe Anzahl von aktiven Zielen im BDI-Agenten existieren kann:

“There are therefore thousands of 'goals' that an agent achieves in a mission, some very minor and some very important to the overall mission outcome. This means that re-tasking an agent requires adjustment of the plans and events. One future goal of this project is to make re-tasking of the agent simpler and achievable mid-mission.” [Ferry et al. 2007]

Stärker an der Nachbildung menschlicher Fähigkeiten orientiert sich der BDI-Agent zur UAV-Führung nach [Karim und Heinze 2005]. Hier wird der aus der militärischen Führung und Entscheidungsfindung bekannte OODA-Loop (engl.: Observe, Orient, Decide, Act) [Hammond 2004] durch den Agenten abgebildet. Dazu wird das domänenunabhängige multi-Agenten-Framework JACK [AOS 2012] eingesetzt. In dem von BAE Systems produzierten UAV-Prototyp Taranis wird eine von der Firma

QinetiQ adaptiertes, auf JACK basierendes Softwaremodul für “*high level reasoning*” [AOS 2008] eingesetzt.

Durch die explizite Formulierung von Wissen, insbesondere von Zielen, die bei erfolgreicher Teamarbeit zu verfolgen sind, wurde im Forschungsprojekt *CosyTeam* [Meitinger und Schulte 2007] an der Universität der Bundeswehr ein gemeinsamer Auftrag durch mehrere kooperierende UAVs bearbeitet [Meitinger 2008]. Dazu wurde erstmals das Framework COSA als Basis der wissensbasierten Automation von unbemannten Fluggeräten verwendet. Das aus Versuchen mit direkt geführten, simulierten Fluggeräten gewonnene Wissen wurde in Ziel-, Plan-, Umweltwissen und Handlungsalternativen gegliedert. Anhand des Auftrags zur Bekämpfung eines mit Flugabwehrstellungen geschützten Hochwertziels wurde nachgewiesen, dass durch derartiges zielebasiertes und wissensbasiertes Verhalten der Softwareagenten kooperatives Verhalten generiert werden kann. Durch die Überlagerung mehrerer Handlungsziele ist dieses Verhalten selbst in Situationen sinnvoll, die derart nicht durch den Systementwickler antizipiert wurden.

2.3 Human Factors der UAV-Führung

Die derzeit in der UAV-Führung operationellen Ansätze (Abschnitt 2.2.1) stoßen im Umfeld von MUM-T an Grenzen, wenn die Führung durch ein Besatzungsmitglied eines bemannten Helikopters innerhalb einer flexiblen Mission durchgeführt werden soll (vgl. [Uhrmann et al. 2009]). Die dabei verwendete Automation berücksichtigt nicht die speziellen Anforderungen, die sich aus der Mensch-Maschine-Beziehung bei MUM-T ergeben. Im Folgenden werden diese Anforderungen hinsichtlich der Missionsflexibilität, der Aufgabenverteilung zwischen Mensch und Maschine, dem Umgang mit komplexer Automation und der Unterstützung der Delegationsbeziehung zwischen Operateur und Fluggerät betrachtet. Diese aus Human-Factors-Betrachtungen abgeleiteten Anforderungen fließen in Kapitel 3 in die Anforderungen an die auftragsbasierte Führung ein.

2.3.1 Missionsflexibilität

Derzeit werden Helikoptermissionen und UAV-Missionen inklusive ihrer Alternativszenarien a priori mit einer Vorlaufzeit von über 24 Stunden geplant. Nach [Wohletz et al. 2001] beläuft sich die Gesamtmissionszeit einer Luftoperation inkl. der Vorplanung auf ca. 72 Stunden. Die Flugwege aller beteiligten Luftfahrzeuge sind durch diese Vorplanung festgelegt, bei wegpunktbasierter UAV-Führung werden die Routen in die Fluggeräte geladen. In den Alternativszenarien werden alternative Missionsverläufe vorgesehen, falls sich im Verlauf der Mission der ursprüngliche Plan als nicht umsetzbar erweist.

Diese Vorplanung hat den inhärenten Nachteil, dass lediglich an vorausgeplanten Entscheidungspunkten nur die vor Missionsstart erarbeiteten Alternativszenarien zur Verfügung stehen. So können durch vorgeplante Ausweichwegpunkte (z.B. Spiderpoint-Verfahren [COP 2007]) alternative Routenverläufe bereits in der Planung des Luftmarsches befohlen werden. Diese werden durch den Schwarmführer in der laufenden Mission abgerufen, wenn die Hauptroute aufgrund neuer Informationen nicht mehr nutzbar ist. Andere Alternativen betreffen Ressourcen wie Landezonen und Anflugwege, für die ebenfalls meist Alternativen eingeplant werden. Sind auch diese nicht mehr verfügbar oder kann mit keiner Alternative mehr ein geändertes, so nicht vorhergesehenes Missionsziel verfolgt werden, dann führt dies in der Regel zum Missionsabbruch oder dem Nichterreichen des Missionsziels.

“Given the dynamic nature of air operations, where things can change in a matter of minutes, this open-loop control strategy suffers from a lack of agility.” [Wohletz et al. 2001]

Diese Dynamik ist ein inhärentes Merkmal von militärischen Missionen, so dass die Durchführbarkeit jeglicher Art von Vorausplanung nie sichergestellt ist [von Clausewitz 2008].

Um im Rahmen von zukünftigen Missionen die Flexibilität zu steigern soll die Integration unbemannter Einheiten auch in komplexe und sich ändernde Umgebungen die Reaktionsfähigkeit auf unvorhergesehene Ereignisse vorsehen. Die von Wohletz angeprangerte „*open-loop control strategy*“ muss dazu durch eine „closed-loop“-Einbindung der unbemannten Einheiten ersetzt werden. Dazu ist nicht nur das Fluggerät mit Funktionen auszustatten, die eine zeitnahe Änderung der Flugrouten und Sensorkonfiguration erlaubt, sondern die Zusammenarbeit mit dem Operateur muss so gestaltet werden, dass dieser seine neuen Zielsetzungen möglichst in der Terminologie der Mission und der missionsrelevanten Entscheidungen auf das Fluggerät übertragen kann. Ein Verständnis der in der Mission verwendeten Begriffe ist dafür ebenso erforderlich wie die Einhaltung der Einsatzgrundsätze, die der Mission zugrunde liegen. Diese sollen nicht durch den Operateur angewiesen werden, sondern – analog zur Führung von bemannten Einheiten – durch das unbemannte Fluggerät selbst eingehalten werden.

Die menschliche Fähigkeit der schnellen und zielgerichteten Reaktion auf Situationsänderungen soll durch die Führung unbemannter Fluggeräte nicht behindert, sondern unterstützt werden.

2.3.2 Aufgabenverteilung zwischen Mensch und Maschine

Ein weiterer Aspekt des Zusammenwirkens von Operateur und UAS ist die Aufgabenverteilung zwischen Mensch und Maschine. Je nach Führungsebene (Abschnitt 2.2.1.2) gestaltet sich die Aufgabenteilung unterschiedlich. Jedoch kann auch innerhalb einer Führungsebene die Aufgabenteilung unterschiedlich ausgeprägt sein. Dies führt zur Frage, wie Automation hinsichtlich dieser Aufteilung auszulegen ist.

Der klassische MABA-MABA-Ansatz (engl.: men are better at – machines are better at), der sich dafür anbietet, schlägt eine statische Verteilung der Autorität auf Mensch und Maschine vor, der sich an den Aufgabengebieten orientiert, die jeweils Mensch bzw. Maschine am besten bearbeiten können. So haben beispielsweise Fitts [Fitts 1951] und Lanc [Lanc 1975] die spezifischen Fähigkeiten von Menschen und Maschinen aus ihrer Sicht zusammengefasst.

Fähigkeiten des Menschen	Fähigkeiten von Maschinen
Erkennung von schwachen akustischen oder visuellen Signalen	Schnelle Reaktion auf Steuereingaben und präzises Anwenden hoher Kräfte
Optische oder akustische Mustererkennung	Durchführung von sich wiederholenden Routineaufgaben
Improvisationsvermögen und angepasstes Anwenden flexibler Prozeduren	Schnelle Speicherung von Information und deren vollständiges Löschen
Langfristige Speicherung großer Informationsmengen und schneller Abruf relevanter Fakten	Schnelles Durchführen von mathematischen Operationen und deduktives Schließen
Induktives Schlussfolgern	Durchführung von nebenläufigen Prozeduren
Urteilsvermögen	

Tabelle 2-2: Fitts' List nach [Fitts 1951]

In der in Tabelle 2-2 wiedergegebenen „Fitts' List“ beschreibt Fitts, in welchen spezifischen Fähigkeiten der Mensch die Maschine übertrifft und umgekehrt. Die Konsequenz aus dieser Liste und der Anwendung des Prinzips MABA-MABA ist eine Übertragung von sensomotorischen Fähigkeiten auf die Maschine, da sich diese wegen der besonderen maschinellen Fähigkeiten zur Reaktion auf Steuereingaben, Durchführung von Routineaufgaben und der Durchführung komplexer Berechnungen und nebenläufiger Prozeduren besonders für eine maschinelle Ausführung eignen. Die Aufgaben, welche die Situationsbeurteilung, Nutzung flexibel anpassbarer Prozeduren und Improvisationsvermögen erfordern, werden dagegen in diesem Ansatz nicht maschinell erledigt, sondern verbleiben beim Menschen. Auch aktuelle Konzepte zur multi-UAV-Führung wie z.B. die Führung mittels „*Adaptive levels of automation*“ [Johnson et al. 2007] orientieren sich häufig an dieser klassischen Aufgabenteilung, indem sie die Flugführung vollständig automatisieren, die kognitiven Aufgaben aber nicht soweit unterstützen, dass eine neue Abstraktionsschicht entstehen würde:

“In this concept, UAV flight control is autonomous and the human participates in planning, problem solving, and contingency operations ...”
[Johnson et al. 2007]

Diese Aufgabenteilung belässt somit die Aufgaben, welche die meisten kognitiven Ressourcen benötigen, beim Menschen. Sollen mehrere UAVs mit diesem Ansatz durch einen Menschen parallel geführt werden und noch eine weitere Aufgabe, wie die Führung eines bemannten Helikopters in einem komplexen Szenario, erfüllt werden, so ist mit einer *Überlastung der kognitiven Ressourcen* und einem damit einhergehenden Einbruch der Leistung zu rechnen.

Konventionelle Automation kann dieses Problem nicht lösen, da durch sie keine Abbildung kognitiver Fähigkeiten auf die Maschine erfolgt.

2.3.3 Automationskomplexität

Konventionelle Automation hat nicht nur den Nachteil, dass sie den Bediener nur selektiv entlasten kann, sondern wird mit zunehmender Abstraktion (höhere Ebene gemäß Abschnitt 2.2.1.2) immer komplexer. Die Auswirkung davon ist, dass dem Bediener eine Aufgabe durch die Automation zwar vollständig abgenommen wird,

jedoch durch eine andere Aufgabe ersetzt wird, nämlich die der *Überwachung der Automation*.

Diese Überwachungsaufgaben können in Einzelfällen wiederum zu Überforderung des Bedieners führen. Reagiert man auf diese Überforderungssituationen mit einer weiteren Schicht an Automationsfunktionen, so resultiert dies im sog. „Teufelskreis der Automation“ [Onken und Schulte 2010].

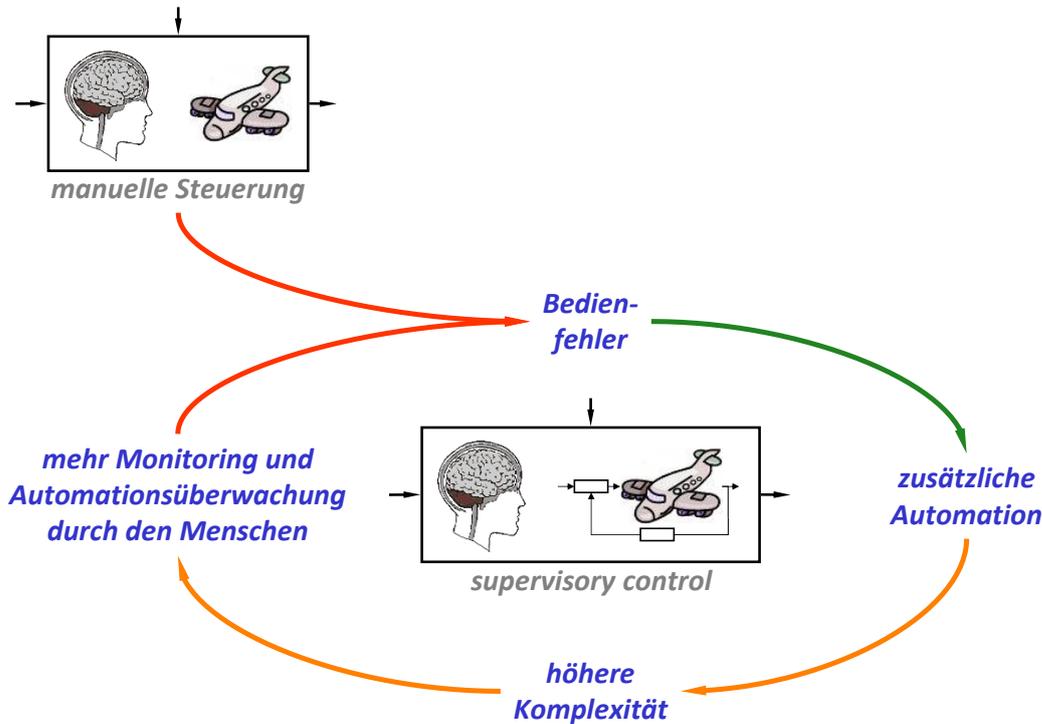


Abbildung 2-9: Teufelskreis der Automation nach [Onken und Schulte 2010]

Eine aus dem Teufelskreis der Automation resultierende Extremforderung, Automation generell zu vermeiden, kann im Kontext eines unbemannten Fluggeräts nur sehr begrenzt erfüllt werden:

“Every reduction of human control over technology is negative. If control, in defiance of that, is to be reduced it must be completely justified. Reduction of control may be justified if and only if the worst possible consequences of the reduced control are exceeded by the benefits of reducing the control (Patrik Stensson).” [Farrell et al. 2007]

Mit diesem Zitat bringt Stensson zum Ausdruck, dass jede Art von Automation daraufhin zu bewerten ist, ob durch sie eine Reduktion der Autorität des Menschen über das technische System einhergeht und ob daraus resultierende Nachteile gerechtfertigt sind. Hinsichtlich der multi-UAV-Führung ist daher zum einen den Verlust an Autorität des Bedieners zu begrenzen und andererseits die negativen Auswirkungen von komplexer Automation zu adressieren.

Was Stensson mit „*negative*“ in einem Wort zusammenfasst führt Billings in [Billings 1997] ausführlicher aus. Danach birgt der Einsatz von hochautomatisierten Systemen im Mensch-Maschine-Verhältnis folgende Gefahren:

Complexity – Die Automation stellt ein hochkomplexes System dar, das vom Menschen nicht, nicht vollständig, nicht in jedem Systemzustand oder nicht in jeder Beanspruchungssituation verstanden werden kann.

Brittleness – Das Design der Automationsfunktion hat ihre Einsatzgrenzen im Hinblick auf das Zusammenwirken von Mensch und Maschine festgelegt. Werden diese Grenzen verlassen, so ist das Verhalten des Mensch-Maschine-Systems nicht definiert. Da der Designer der Automationsfunktion nicht alle Einsatzfälle antizipieren kann, sind Abschätzungen nötig, die jedoch immer unvollständig sind.

Opacity – Der Bediener der Automation verfügt über kein oder nur über ein fehlerhaftes Modell der Automation. Die Automation teilt dem Bediener nicht genügend Informationen mit um den Aufbau eines korrekten Modells in jeder Situation zu ermöglichen. So führen [Sarter und Woods 1995] in diesem Zusammenhang an, dass bei der Benutzung von Autopiloten- und Flugmanagementsystemen nur eine Minderheit der Bediener ein vollständiges mentales Modell über die Verfügbarkeit und Funktionsweise aller Betriebsarten besitzen:

„... 15% of these pilots could describe the active mode settings and the system activities during takeoff, but their knowledge was inert; they had not been capable of applying this knowledge to the ongoing situation.“ [Sarter und Woods 1995]

Fehlt eine Verbindung zwischen den durch den Operateur manipulierbaren Parametern und dem Verhalten, das ein System zeigt bzw. zu Verhalten, das durch die Parameteränderung beabsichtigt ist, dann resultiert dies nach [Baishya und Lewis 2009] ebenfalls in Opacity:

“Because there is little or no connection between the parameters available to the operator and the behavior that results we call such algorithms opaque. [...] their inner workings are not cognitively accessible to an operator.” [Baishya und Lewis 2009]

Literalism – Die Automation hat keine Kenntnis über verfolgte Ziele und Absichten des Bedieners, sondern führt die in ihrer Entwicklung definierten und während der Benutzung angewählten Funktionen exakt aus, ohne zu prüfen, ob sie in der jeweiligen Situation sinnvoll sind.

Inadequate Feedback – Die Automation kommuniziert nicht oder nicht eindeutig ihre aktuelle Aktionen, den Grund für die aktuelle Aktion oder den Grund für die Änderung der aktuellen Aktion. Ohne dieses Feedback muss sich der Operateur ein mentales Modell für das beobachtete Verhalten bilden, um dieses für sich zu erklären.

Anschaulich werden diese Schwächen von komplexer Automation auch, wenn man die unterschiedlichen Ressourcen betrachtet, die dem Bediener und dem Entwickler der Automationsfunktionen zur Verfügung stehen. Ein Mangel an Ressourcen für den Entwickler komplexer Automation ist nach [Wandke und Nachtwei 2008] gegeben durch die Schwierigkeiten, zukünftige Ereignisse zu antizipieren, durch wirtschaftliche Zwänge, fehlendes Feedback bezüglich möglicher Einsätze, ein nur unvollständiges mentales Bild aller möglichen Einflussfaktoren auf die Automation, unvollständig operationalisierbares Expertenwissen, ethische Einschränkungen bei der Simulation möglicher Einsatzszenarien und unzureichende Analyse- und Evaluierungsmethoden. Diese Einschränkungen bewirken zusammen, dass eine konventionell entwickelte, komplexe Automationsfunktion immer nur für einen eng begrenzten und – im Idealfall – klar definierten Bereich einsetzbar ist und sich in der Folge außerhalb dieses Bereiches nicht gemäß den Zielen und Absichten des Bedieners verhält.

Herczeg erweitert diese Betrachtung in [Herczeg 2002] um den Aspekt der *Modellkongruenz*. Da sowohl der Mensch die Maschine überwacht, als auch „*maschinelle Funktionen den Menschen auf niedriger Ebene, d.h. auf Ebene der Sensomotorik und der syntaktischen und einfachen semantischen Regeln [...]*“ [Herczeg 2002] überwachen, muss ein Handlungs- bzw. Funktionsmodell gefunden werden, das sowohl für Mensch als auch für die Maschine angewendet werden kann.

Weiter sind Mensch-Maschine-Systeme nach [Herczeg 2002] asymmetrisch aufgrund der „*besonderen Rolle des Menschen als zielführende Instanz und [...] aus der begrenzten Intelligenz maschineller Regelungs- und Steuerungssysteme.*“. Diese Asymmetrie führt zu einer unterschiedlichen Situationswahrnehmung seitens Mensch und Maschine. Wie auch in [Wandke und Nachtwei 2008] angedeutet, wird deshalb durch komplexe Automation der Normalfall unterstützt, in Ausnahmefällen und Notfällen jedoch behindert die Automation die menschliche Fähigkeit, kreativ und zielorientiert vorzugehen. Herczeg bezeichnet diesen Umstand als „Dilemma der Mensch-Maschine-Kommunikation“:

„Dies ist gewissermaßen ein Dilemma der Mensch-Maschine-Kommunikation. Lösen lässt sich dieses Problem nur durch eine andere, auf Intentionen basierende Kommunikation zwischen menschlichem Operateur und der Maschine.“ [Herczeg 2002]

2.3.4 Delegationsverhältnis Mensch – UAV

Nutzt ein menschlicher Bediener ein oder mehrere UAVs als Einheiten, so gibt er Aufgaben – unabhängig von der Ausprägung der UAV-Automatisierung – an diese dislozierten Einheiten ab. Er delegiert sie also.

Nach [Miller 2005] muss eine Delegationsbeziehung zwischen Delegierendem und Auftragsempfänger folgende Bedingungen erfüllen:

1. Der Delegierende bleibt verantwortlich für die Ergebnisse der delegierten Aufgaben.
2. Der Delegierende kann flexibel mit dem Auftragsempfänger interagieren und Details zur Auftragsausführung festlegen.
3. Der Auftragsempfänger muss über Wissen bzgl. des Auftrags, dessen Domäne und über die eigenen Fähigkeiten besitzen.
4. Der Delegierende muss über Wissen bezüglich der Fähigkeiten und Grenzen des Auftragsempfängers verfügen.
5. Es muss eine gemeinsame, einfache, situationsanpassbare Sprache zwischen Delegierendem und Auftragsempfänger existieren. Diese muss in der Lage sein, Ziele zu verbalisieren.
6. Die Delegation einer Aufgabe definiert den Handlungsspielraum des Auftragsempfängers.

Bei konventioneller Automatisierung nach der Definition von Abschnitt 1.3 sind diese Anforderungen mit Ausnahme der ersten nicht erfüllt. Da ein unbemanntes Fluggerät durch die Bedienung seiner Subsysteme geführt wird, existiert die in den Forderungen genannte Entität „Auftragsempfänger“ nicht. Der Begriff kann auch deshalb keine Anwendung finden, da die Zielsetzungen, die die menschlichen Bediener mit ihren Aktionen verfolgen, nicht an das Fluggerät übertragen werden, wodurch eine Verletzung der Forderungen 3-6 resultiert. Es wird in operationellen Systemen im Laufe der Mission auf Wegpunktebene oder durch direkte Flugsteuerung interagiert

(Verletzung von Forderung 2). Dies führt in der Konsequenz zu den Problemen konventioneller Automation, die Billings (vgl. Abschnitt 2.3.3) beschreibt.

Diese Probleme konventioneller Automation sind nicht grundsätzlich auf Mensch-Maschine-Beziehungen beschränkt, wie ein Blick auf die Principal-Agent-Theorie [Alparslan 2006] zeigt. Auch im Delegationsverhältnis zwischen einem menschlichen Vorgesetzten (engl.: principal) und Untergebenen (hier engl.: agent) können ähnliche Schwierigkeiten auftreten. Nach [Alparslan 2006] gibt es hierfür verschiedene Ursachen, die beim Entwurf eines Delegationsverhältnisses Mensch-Maschine, wie es in Abschnitt 3.4 beschrieben wird, möglichst zu vermeiden sind:

- *Informationsasymmetrie* bezeichnet den Zustand, dass der Vorgesetzte eine andere oder lückenhafte Wahrnehmung von der Situation als der Untergebene hat. Dies kann sich auf Eigenschaften und Fähigkeiten des Untergebenen beziehen, die der Vorgesetzte nicht kennt oder anders einschätzt. Alparslan [Alparslan 2006] bezeichnet dies als *Hidden-Characteristics*. Ferner kann sich Informationsasymmetrie auf die Unkenntnis und Fehleinschätzung bzgl. der Art von Umweltereignissen (*Hidden-Information*) und die Reaktion des Untergebenen darauf (*Hidden-Action*) beziehen.
- *Interessenskonflikte* entstehen, falls der Vorgesetzte und der Untergebene unterschiedliche Zielsetzungen – also Eigeninteressen – verfolgen. Nach [Alparslan 2006] ist dies der Normalfall und die Verfolgung gleicher Interessen die Ausnahme. Hierbei hat der menschliche Vorgesetzte kein ausreichendes Modell des Verhaltens seines Untergebenen, da er dessen Eigeninteressen in der Regel nicht kennt. Im Extremfall kann ein als „Dienst nach Vorschrift“ bekanntes Phänomen auftreten. Hierbei verhält sich ein menschlicher Untergebener wörtlich nach seinen Arbeitsaufträgen (vergleichbar mit Literalism nach Billings).
- *Umweltunsicherheit* bezeichnet das Auftreten von „*exogenen Umweltfaktoren*“ [Alparslan 2006], die sich auf das Arbeitsergebnis des Untergebenen auswirken und wegen ihrer Komplexität und Unvorhersagbarkeit weder vom Untergebenen noch dessen Vorgesetzten vorhergesehen werden können. Nur wenn die beteiligten Personen mit dieser Informationsunsicherheit umgehen können, kann suboptimales Verhalten in unsicheren bzw. neuen Situationen vermieden werden.

Auch bei der Führung von maschinellen Untergebenen sind diese Aspekte zu beachten. Informationsasymmetrie und Umweltunsicherheit treten dabei ebenso auf wie bei der Führung menschlicher Untergebener. Interessenskonflikte können durch Diskrepanzen der Aufgabenwahrnehmung, Situationsbewertung und der Einschätzung möglicher Systemreaktionen zwischen dem Operateur und dem Entwickler des Systems auftreten [Wandke und Nachtwei 2008]. Der Entwickler des Systems antizipiert auftretende Situationen und geeignete Reaktionen darauf:

“The ‘system,’ meaning the computers [...], doesn't know anything. It simply makes guesses – statistically plausible guesses based on the designer's observations and hunches.” [Norman 2007]

Was Norman in diesem Zitat exemplarisch für Hausautomatisierungen anführt, lässt sich auf jede andere konventionell entwickelte Automationsfunktion übertragen. Die genannten Gefahren und Einschränkungen gelten entsprechend.

Diese Betrachtung führt zu der Schlussfolgerung, dass bei der Entwicklung von auftragsbasierten Systemen nicht nur die Beziehung zwischen Bediener und System zu betrachten ist. Ebenso relevant ist eine Entwicklungsmethode, die es dem Designer

einer Automationsfunktion erlaubt, mit möglichst wenigen Annahmen und dafür auf der Basis von allgemeinen Zielsetzungen ein Systemdesign umzusetzen. Diese Forderung wird in Kapitel 3.4 wieder aufgegriffen.

2.4 Perspektiven durch kognitive Automation

„Intelligenz ist eine Eigenschaft eines Individuums, die als positiv eingestuft wird: Je mehr man davon hat, umso besser. Intelligenz ist nicht, wie z.B. die Körpergröße oder Haarfarbe, direkt beobachtbar, sondern muss aus dem Verhalten erschlossen werden.“ [Schlick et al. 2010]

Um den genannten Nachteilen konventioneller UAV-Führung zu begegnen, wird in dieser Arbeit der Ansatz verfolgt, die UAVs zu *intelligenten Einheiten* zu erweitern werden. Diese Transformation soll mit Hilfe *künstlicher Intelligenz* stattfinden.

Für den Begriff der künstlichen Intelligenz haben sich verschiedene Definitionen etabliert. In [Russell und Norvig 2010] werden diese eingeteilt in Systeme, die rationales Verhalten besitzen bzw. aufweisen und in Systeme, die menschliches oder menschenähnliches Verhalten aufweisen. Nach zweiter Definition ist eine Maschine dann intelligent, wenn sie im Dialog mit einem Menschen nicht mehr von einem menschlichen Gesprächspartner zu unterscheiden ist [Turing 1950]. Bislang hat kein System diesen als Turing-Test oder Imitation-Game bekannten Test bestanden [Loebner 2012] und für die Führung von unbemannten Fluggeräten ist eine derart weitreichende Nachbildung menschlichen Denkens – die auch als „harte KI“ bezeichnet wird – auch nicht notwendig. Clough beschreibt diesen Umstand im Hinblick auf künstlich intelligente Systeme treffend mit:

“We really don’t care how intelligent it is, just that it does the job assigned.” [Clough 2002]

Intelligenz ist folglich kein Selbstzweck, sondern wird im Anwendungskontext betrachtet. Der Fokus liegt auf den Auswirkungen der Intelligenz hinsichtlich einer zu erfüllenden Aufgabe und der Interaktion des intelligenten Systems mit der Umwelt. Daher wird im Folgenden die Definition von David Poole verwendet:

“Computational intelligence is the study of the design of intelligent agents. An agent is something that acts in its environment – it does something.” [Poole et al. 1998]

Poole verwendet in seiner Definition den Begriff „computational“ anstatt „artificial“, da der Ausdruck „artificial intelligence“ in der Literatur bereits zu unterschiedlich belegt sei [Poole et al. 1998]. Der in der Definition verwendete Begriff *Agent* bezieht sich auf alle Systeme, die ihre Umwelt mit Sensoren erfassen und mit Aktoren beeinflussen können [Russell und Norvig 2010]. Diese Definition trifft offensichtlich auch auf automatisierte, unbemannte Fluggeräte zu. Um diese Agenten zu intelligenten Agenten im obigen Sinne zu machen, müssen sich diese *rational* verhalten.

“A rational agent is one that does the right thing.” [Russell und Norvig 2010]

Russel und Norvig [Russell und Norvig 2010] führen weiter aus, dass diejenige Handlung „die Richtige“ ist, die zum Erfolg führt. Dies steht in Übereinstimmung mit den in den Arbeitswissenschaften verwendeten Definitionen von natürlicher Intelligenz, welche die *„Fähigkeit beschreibt, Probleme richtig zu lösen und neue Situationen zu bewältigen.“* ([Bourne et al. 2005] zitiert nach [Schlick et al. 2010]). Übertragen auf ein

unbemanntes Fluggerät verhält sich dieses also dann rational, wenn es unter Berücksichtigung von

- der Metrik, in der der Handlungserfolg gemessen wird
- dem vorhandenen Vorwissen
- den eigenen Handlungsmöglichkeiten und
- der Sequenz der bisher über die Sensoren empfangenen Umweltwahrnehmungen

diejenige Handlung ausführt, die am erfolgversprechendsten ist [Russell und Norvig 2010].

Dies sind Eigenschaften und Verhaltensweisen, die sich mit konventioneller Automation nicht in einem technischen System umsetzen lassen, sondern primär dem menschlichen Bediener zugeordnet werden, was zu den in Abschnitt 2.3.2 genannten Problemen führt. Zur Übertragung von menschlichen Eigenschaften in einen rationalen Agenten, müssen diese Eigenschaften zuerst am Menschen identifiziert werden. Die dafür beim Menschen vorhandenen Fähigkeiten werden mit dem Begriff *Kognition* zusammengefasst. Der Begriff leitet sich vom lateinischen „cognoscere“ (erkennen, kennen lernen) ab und beschreibt die Gesamtheit der Prozesse, die mit menschlichem Wahrnehmen, Erkennen, Denken und Verhalten zusammenhängen.

“Psychology is the thematic heart of cognitive science, which aims to understand human (and animal) minds. But its core theoretical ideas are drawn from cybernetics and artificial intelligence, and many cognitive scientists try to build functioning models of how the mind works.” [Boden 2008]

Die *Kognitionswissenschaften* beschäftigen sich folglich mit natürlicher Kognition, aber auch mit ihrer Nachbildung in künstlichen Systemen und der Verifikation von Modellen natürlicher Kognition mittels geeigneter Simulationen. Somit kann die Kognitionswissenschaft als Schlüssel zur Übertragung menschlichen Wissens und menschlicher Fähigkeiten auf ein technisches System angesehen und genutzt werden.

Im Bereich der Automation kann die Kognitionswissenschaft zur Umsetzung *Kognitiver Automation* genutzt werden. Damit wird die Realisierung von rationalen Softwareagenten mit folgenden – vormals primär dem Menschen zugeordneten – Charakteristiken ermöglicht [Onken und Schulte 2010]:

- Die kognitive Automation verfügt über *maschinelles Situationsverständnis*, welches genutzt werden kann, um sinnvolles Verhalten in unbekanntem Situationen zu generieren.
- Das Handeln erfolgt *zielgerichtet*, d.h. die explizite Modellierung von Zielen und deren aktive Verfolgung werden ermöglicht.
- Durch maschinelle *Planungs- und Problemlösefähigkeiten* können Handlungsalternativen situationsadaptiv ausgewählt werden und eine Folge von durchzuführenden Aktionen daraus generiert werden.
- Die zur *Kooperation und Koordination* mit anderen Softwareagenten und Menschen notwendige Kommunikation kann zielgerichtet erfolgen.

Das in der Umsetzung der UAV-Automatisierung (Kapitel 4) genutzte Framework COSA (engl.: Cognitive System Architecture) [Putzer 2004] ermöglicht die Integration kognitiver Automation in ein operationelles Framework.

2.5 Analyse der Arbeitssystemkonfiguration

Um die Möglichkeiten von höheren Automationsfunktionen im Allgemeinen und kognitiver Automation im Speziellen zu nutzen, ist eine Systemanalyse erforderlich, die sowohl den menschlichen Bediener als auch das technische Artefakt berücksichtigt. Als geeignetes Modell hierfür hat sich das Konzept der Arbeitssystemmodellierung erwiesen, welches im Folgenden erläutert wird.

2.5.1 Konzept Arbeitssystem

Nach DIN EN ISO 6385 bezeichnet der Begriff Arbeitssystem ein

„[...]System, welches das Zusammenwirken eines einzelnen oder mehrerer Arbeitender/Benutzer mit den Arbeitsmitteln umfasst, um die Funktion des Systems innerhalb des Arbeitsraumes und der Arbeitsumgebung unter den durch die Arbeitsaufgaben vorgegebenen Bedingungen zu erfüllen.“
[DIN EN ISO 6385]

Der in dieser Definition verwendete Begriff der Arbeitsaufgabe ist nach obiger Norm definiert als

„[...] eine zur Erfüllung eines vorgesehenen Arbeitsergebnisses erforderliche Aktivität oder Anzahl von Aktivitäten des Arbeitenden/Benutzers.“
[DIN EN ISO 6385]

Die daraus ersichtliche Orientierung am Arbeitsziel des Arbeitssystems findet sich ebenfalls in [Onken und Schulte 2010] wieder. Dort wird ein System der realen Welt als Arbeitssystem bezeichnet, wenn es ein Arbeitsziel (engl.: work objective) verfolgt. Das verwandte Modell des Arbeitsprozesses betrachtet hauptsächlich, wie das Arbeitsziel erreicht werden soll. Im Gegensatz dazu konzentriert sich das Arbeitssystem auf die Inhalte des Arbeitsziels und wer es unter Verwendung welcher Mittel erreichen soll. Durch diese Betrachtung können im Arbeitssystem auch Komponenten integriert werden, die den Arbeitsprozess – also den Algorithmus zur Erreichung eines Arbeitsziels – situationsabhängig anpassen. Ferner berücksichtigt das Arbeitssystem die „Komponente Mensch“ als integralen Bestandteil.

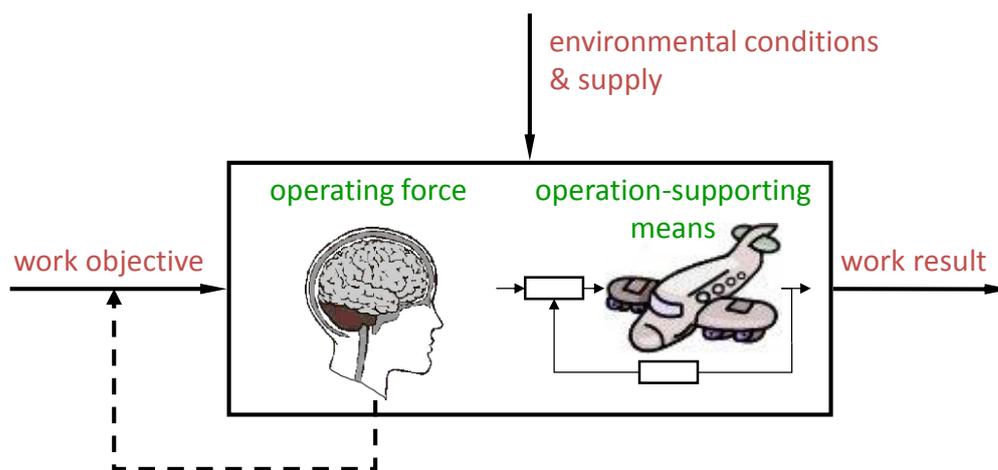


Abbildung 2-10: Arbeitssystem nach [Onken und Schulte 2010]

Abbildung 2-10 stellt das Arbeitssystem mit seinen Schnittstellen zur Umwelt schematisch dar. Da sich bzgl. des Arbeitssystems noch keine einheitliche deutsche Nomenklatur etabliert hat, werden im Folgenden vorrangig die englischen

Bezeichnungen verwendet. Das Arbeitssystem ist durch folgende Schnittstellen charakterisiert:

1. Durch eine übergeordnete Führungsinstanz wird dem Arbeitssystem das *Work Objective* („Arbeitsziel“ oder „übergeordnete Zielsetzung“) vorgegeben. Es stellt konkret oder über abstrakte Begriffe einen Umweltzustand dar, der mittels des Arbeitssystems erreicht werden soll. Über dieses Arbeitsziel definiert sich das Arbeitssystem. Wie in Abbildung 2-10 dargestellt, darf der Mensch als einzige Entität im Arbeitssystem Änderungen am *Work Objective* vornehmen.
2. Auf das Arbeitssystem wirken *Umwelteinflüsse*, welche durch das Arbeitssystem genutzt werden können (Information, Ressourcen) oder es anderweitig beeinflussen (z.B. Wetterbedingungen, Gelände, etc.). Umwelteinflüsse können das Erreichen des Arbeitsziels positiv oder negativ beeinflussen.
3. Die beobachtbaren Aktionen des Arbeitssystems hinsichtlich der Umwelt werden im *Work Result* zusammengefasst und vor allem hinsichtlich ihrer Bedeutung für das Erreichen des *Work Objectives* betrachtet.

Die Bestandteile des Arbeitssystems werden unterschieden nach *Operating Force (OF)* und *Operation Supporting Means (OSM)*.

Wesentliches Merkmal der *Operating Force* ist die Kenntnis und das Verständnis des *Work Objectives*. Durch dieses Alleinstellungsmerkmal ist die *OF* die einzige Komponente des Arbeitssystems, welche in der Lage ist, das *Work Objective* aktiv zu verfolgen. Mindestens ein Mensch muss Teil der *Operating Force* sein. Wie in Abbildung 2-10 angedeutet, hat er auch die Autorität, das *Work Objective* zu modifizieren. Durch diese spezielle Eigenschaft wird das Arbeitssystem zu einem *autonomen System* [Onken und Schulte 2010].

Demgegenüber stellen die *Operation Supporting Means* alle Komponenten dar, die von der *Operating Force* zur Erreichung des Arbeitsziels genutzt werden können. [Onken und Schulte 2010] nennt hier insbesondere die Arbeitsumgebung (engl.: *work site settings*), jede Art von Werkzeug sowie alle Arten von Maschinen einschließlich aller Arten von Automation. *Operation Supporting Means* können von der *Operating Force* disloziert sein und auch im Sinne von geteilten Ressourcen in mehreren Arbeitssystemen vorhanden sein.

Im Folgenden wird das Konzept des Arbeitssystems auf das Design der UAV-Führung angewendet.

2.5.2 Arbeitssystem „UAV-Führung aus dem bemannten Cockpit“

Die klassische Aufgabenteilung zwischen Kommandant und Pilot sieht vor, dass der Kommandant als verantwortlicher Luftfahrzeugführer das Missionsziel verfolgt. Der Pilot handelt auf Weisung des Kommandanten unter Kenntnis des Missionsziels. Aus dieser Konstellation ergibt sich das in Abbildung 2-11 dargestellte Arbeitssystem.

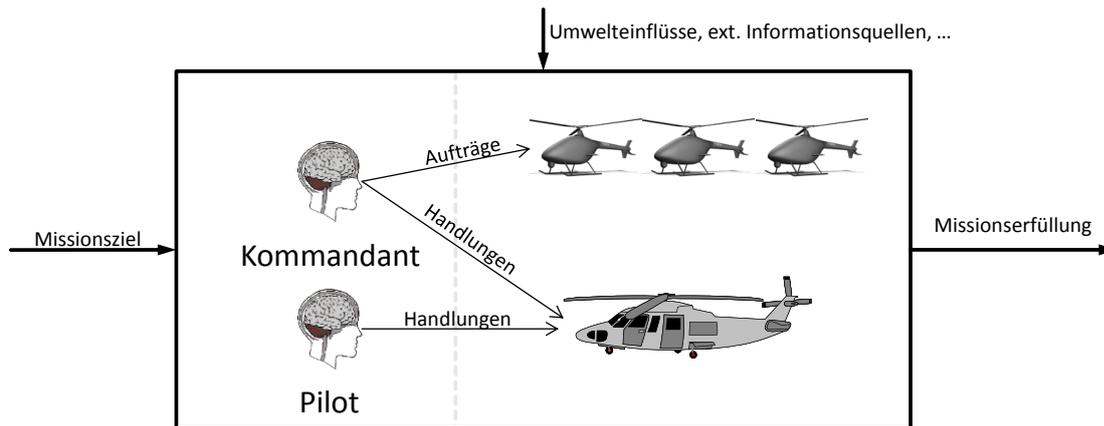


Abbildung 2-11: Arbeitssystem MUM-T

Da das Arbeitssystem über das zu verfolgende, übergeordnete Arbeitsziel definiert wird, handelt es sich um ein gemeinsames Arbeitssystem, in dem Pilot und Kommandant die Operating Force bilden und als Team agieren. Auffällig an dieser Konfiguration ist ferner, dass der Kommandant gemeinsam mit dem Piloten zu dessen Unterstützung und zur Erfüllung des Missionsziels auf den bemannten Helikopter zugreifen kann.

Die UAVs hingegen stehen exklusiv dem Kommandanten zur Verfügung. Die UAV-Führung bildet den Schwerpunkt der weiteren Ausführungen dieser Arbeit. Für eine detailliertere Betrachtung des Piloten im Arbeitssystem sei an dieser Stelle auf [Benzler et al. 2008, 2009] verwiesen. CASSY (engl.: Cockpit Assistant System) [Onken 1997] und CAMA (engl.: Crew Assistant Military Aircraft) [Schulte und Stütz 1998] betrachten ferner Unterstützungsfunktionen für Piloten von zivilen und militärischen Starrflächenflugzeugen.

2.5.3 Integration künstlich kognitiver Einheiten in das Arbeitssystem

Durch die verantwortliche Führung des eigenen Luftfahrzeugs sowie der Unterstützung des Piloten in der Navigation und Funkkommunikation kann ein komplexes und belastendes Aufgabenspektrum und Arbeitsumfeld für den Kommandanten entstehen. Die zusätzliche Führung mehrerer bemannten Luftfahrzeuge erhöht zunächst diese Belastung, da in dieser Konfiguration folgende Aufgaben dem Kommandanten zufallen:

- Navigation nach Karte und auf Sicht
- Funkverkehr mit der Flugverkehrskontrolle
- Funkverkehr mit weiteren am Einsatz beteiligten Einheiten
- Unterstützung des Piloten durch geeignete Hinweise über den Systemzustand und weiteren Flugverlauf
- Missionsmanagement, insbesondere das Treffen missionsrelevanter Entscheidungen
- visuelle Nahbereichsaufklärung
- System Management
- Fernbereichsaufklärung mittels UAV
- UAV-Flugführung
- UAV-Sensorführung

Der Mehrbelastung durch die drei letztgenannten Punkte kann durch folgende Maßnahmen begegnet werden:

1. Übertragen eines Teils der originären Kommandantenaufgaben auf den Piloten. Diese übertragenen Aufgaben umfassen vor allem die Funkkommunikation und die Unterstützung des Piloten bei der Navigation und dem Systemmanagement. Für Details zur diesem Ansatz sei auf die Forschungsprojekte MiRA (engl.: Military Rotorcraft Associate) [Benzler et al. 2008] und MiRA-T (engl.: Military Rotorcraft Associate Teaming) [Benzler et al. 2009] verwiesen.
2. Führung der UAV auf einer Abstraktionsebene, die sich *an die Führung bemannter Helikopter* anlehnt

Die Realisierung des in Punkt 2 genannten Führungsparadigmas in ein technisches System mit Hilfe kognitiver Automation ist Gegenstand der weiteren Ausführungen.

Zur Umsetzung ist die Integration weiterer Automation in das Arbeitssystem notwendig, welche die Führung unbemannter Fluggeräte auf der hohen, an der Führung von Menschen angelehnten, Abstraktionsebene erfordert. Diese muss zumindest über das Verständnis der übertragenen Aufgaben verfügen, also eine kognitive Automationsfunktion sein, wie in Abschnitt 2.4 beschrieben. In diesem Zusammenhang gilt es die Frage zu beantworten, wo im Arbeitssystem diese zusätzliche kognitive Einheit (engl.: ACU – Artificial Cognitive Unit) integriert werden soll.

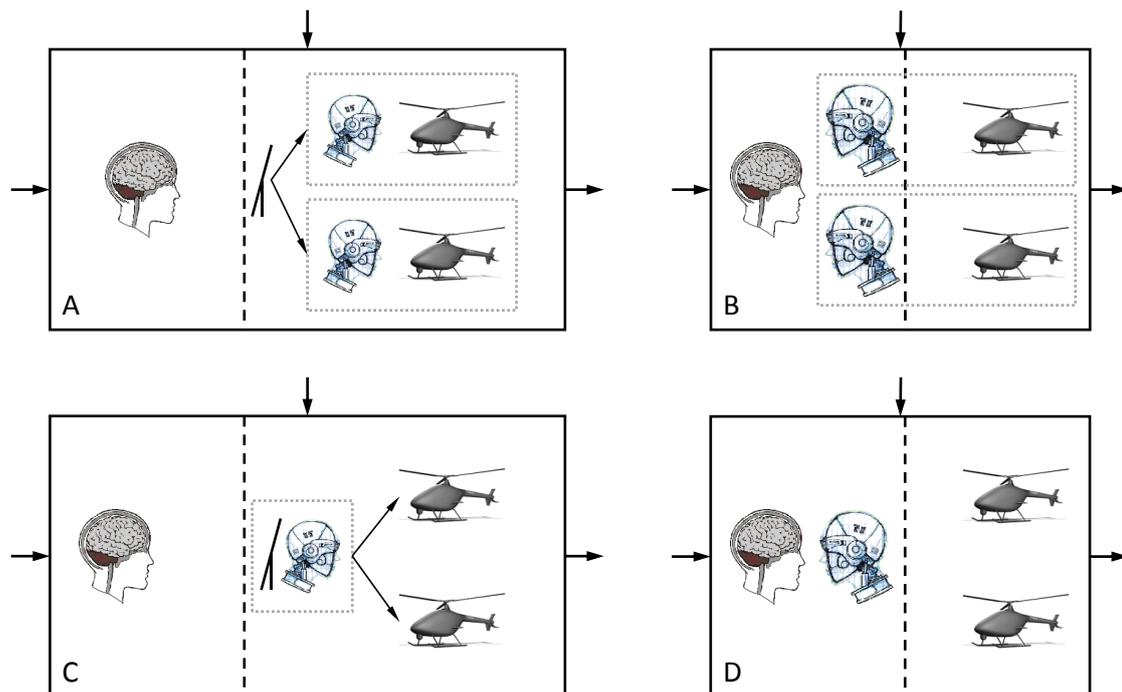


Abbildung 2-12: Varianten der Integration künstlich kognitiver Einheiten in das Arbeitssystem

Abbildung 2-12 zeigt vier prinzipiell mögliche Arbeitssystemkonfigurationen mit einem UAV-Bediener, zwei unbemannten Fluggeräten und der als Roboterkopf dargestellten, neuen, kognitiven Automationsfunktion („künstlich kognitive Einheit“). Aus Gründen der Übersichtlichkeit wurde hierbei der Aspekt der Bedienung des bemannten Helikopters nicht dargestellt.

Die Integration dieser ACU kann in unterschiedliche Teilsysteme erfolgen. Im Falle der UAV-Führung kann sie entweder an Bord des Fluggeräts (Konfigurationen A und B in Abbildung 2-12) oder in der Kontrollstation (Konfigurationen C und D in Abbildung

2-12) eingeführt werden. Die Integration der ACU zur Flugführung in der Kontrollstation hat den Nachteil, dass bei einem Abriss der Funkverbindung diese Automationsfunktionen nicht mehr auf die Fluggeräte zugreifen können. Umgekehrt entsteht durch die Integration kognitiver Einheiten in die Fluggeräte die Notwendigkeit, diese innerhalb des Arbeitssystems mehrfach – nämlich pro Fluggerät – zu etablieren. Die höhere Robustheit gegenüber dem Abriss der Funkverbindung wird mit dem Aufwand der Koordination der Automationsfunktionen erkaufte.

Anders als beim Einsatz konventioneller Automation besteht bei künstlich kognitiven Einheiten auch die Möglichkeit, diese als Teil der Operating Force zu etablieren. Um den in 2.5.1 angeführten Anforderungen gerecht zu werden, muss diese ACU dann auch den übergeordneten Auftrag kennen, ihn selbständig verfolgen und mit dem menschlichen Operateur als Team zusammenarbeiten. Sie wird als Teil der Operating Force zur *Operating Cognitive Unit (OCU)* [Onken und Schulte 2010; Meitinger 2008]. In Abbildung 2-12 sind diese mit B und D gekennzeichneten Konfigurationen rechts dargestellt.

Wenn die kognitive Einheit den übergeordneten Auftrag nicht kennt, lediglich beim Einsatz der Operation Supporting Means unterstützt und dem menschlichen Operateur strikt untergeordnet, so handelt es sich um eine *Supporting Cognitive Unit (SCU)* (Konfigurationen A und C in Abbildung 2-14 sowie [Onken und Schulte 2010]). Da diese SCUs den übergeordneten Missionauftrag nicht oder nur unvollständig kennen, verbleibt die Aufgabe, einzelne Aufträge für die UAVs aus der Mission abzuleiten, allein beim menschlichen Bediener. Dies bedeutet jedoch nicht, dass eine SCU über kein domänenspezifisches Wissen verfügt. Allgemeine Einsatzgrundsätze, Kooperationsmechanismen, Flugführungskonzepte etc. sind auch in der SCU vorhanden. Der Unterschied zur OCU ergibt sich exklusiv aus der fehlenden Kenntnis des Missionauftrags und der zugehörigen Fähigkeit, sich daraus in Kooperation mit dem Menschen Teilaufträge abzuleiten.

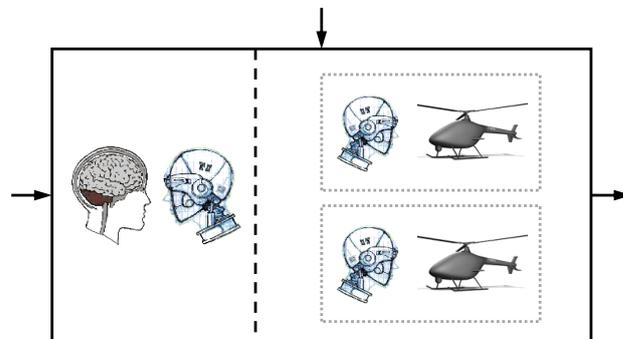


Abbildung 2-13: Dual-Mode Cognitive Automation zur UAV-Führung

Zur Kombination der Vorteile von OCU und SCU, also der Robustheit gegenüber dem Verlust des Datenlinks, einem deterministisch empfundenen Verhalten der Fluggeräte und der Fähigkeit zum zentralen Planen mit einem künstlichen Teamkollegen in der Kontrollstation, können die Ansätze von SCU und OCU kombiniert werden. Im Projekt MUM-T (Manned-Unmanned Teaming) wurde deshalb die in Abbildung 2-13 dargestellte Konfiguration gewählt. Jedes UAV verfügt dabei über eine SCU, welche die von der Operating Force übertragenen Aufträge versteht und durchführt. Die Operating Force selbst wird gebildet aus dem menschlichen Bediener und einer OCU, die als Assistenzsystem [Donath et al. 2010] fungiert. Diese Konfiguration ist gemäß der Definition nach [Onken und Schulte 2010] *Dual-Mode Cognitive Automation* zur UAV-Führung [Strenzke et al. 2011; Kriegel 2011].

2.6 Evaluierung konventioneller Automation

Um die Auswirkungen der Grenzen konventioneller Automation im Kontext der Führung unbemannter Fluggeräte zu untersuchen, wird in diesem Abschnitt ein Experiment mit konventionell automatisierten, jedoch vom bemannten Helikopter aus geführten UAVs betrachtet. Dafür soll zunächst der Übergang von geführten bemannten zu geführten, unbemannten und konventionell automatisierten Einheiten anhand des Arbeitssystems betrachtet werden.

Zwischen diesen beiden Führungsarten besteht in einem Lufteinsatzverband – wie im Abschnitt 2.2 dargelegt – ein erheblicher Unterschied.

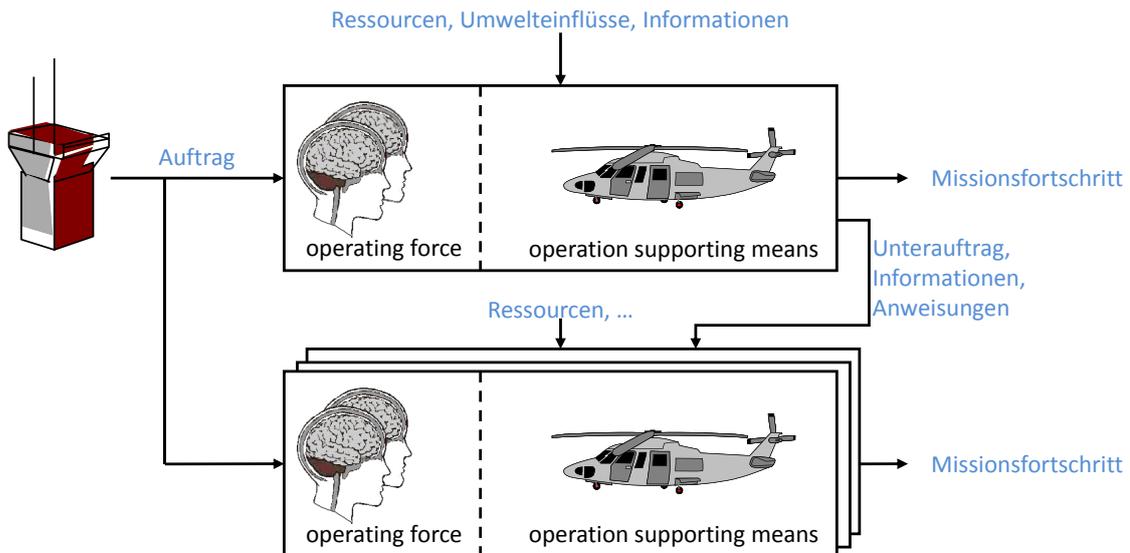


Abbildung 2-14: Arbeitssysteme mehrerer bemannter Helikopter

Wird eine Mission durch mehrere bemannte Helikopter durchgeführt, so bildet jede Besatzung mit dem Helikopter ein individuelles Arbeitssystem. Alle Besatzungen werden im Rahmen des Einsatzbriefings über den übergeordneten Missionsauftrag informiert. Ferner wird ein Air Mission Commander (AMC) festgelegt, welcher als Kommandant einer dieser Helikopter die Führung während der Missionsdurchführung übernimmt. Es entsteht die in Abbildung 2-14 dargestellte Arbeitssystemstruktur. Da alle beteiligten Besatzungen über den übergeordneten Auftrag informiert sind, kann sich der AMC bei der Kommunikation mit anderen Besatzungen darauf beziehen und davon ausgehen, dass die durch ihn erteilten Unteraufträge im Hinblick auf das übergeordnete Missionsziel interpretiert und durchgeführt werden.

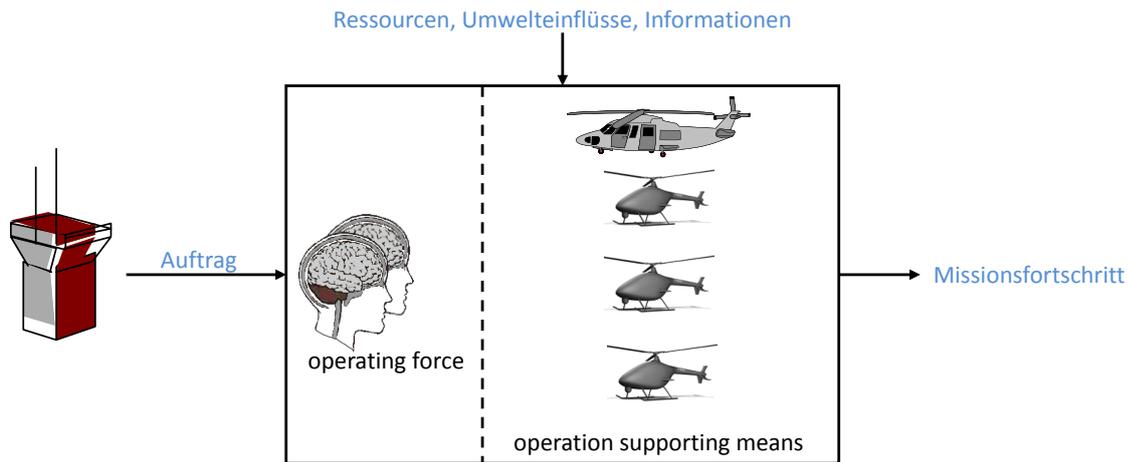


Abbildung 2-15: Hypothetisches Arbeitssystem multi-UAV-Führung

Würde man ausgehend von dieser Konfiguration die bemannten Helikopter durch konventionell automatisierte UAVs ersetzen, so könnten diese – mangels menschlicher Operating Force – keine eigene Arbeitssysteme bilden, sondern werden in das Arbeitssystem des bemannten Helikopters als weitere hochautomatisierte Operation Supporting Means integriert. Wie in Abbildung 2-15 angedeutet, fehlt dieser Automation das Wissen und Verständnis des übergeordneten Auftrags, der Missionsdurchführung und von Einsatzgrundsätzen. Darüber hinaus sind die unbemannten Fluggeräte nicht nur als einzelnes System, sondern auf Subsystemebene zu bedienen, was die Anzahl der zu bedienenden und überwachenden Teilsysteme weiter erhöht (vgl. [Kriegel 2011]). Bei der experimentellen Evaluierung dieser Konfiguration mit der auf Wegpunkten basierenden Führung von einem bis drei UAVs in einem komplexen, dynamischen, militärischen Szenario wurde in [Uhrmann et al. 2009] eine mit der Anzahl zu führender UAVs ansteigende Beanspruchung des Menschen festgestellt. In dem in [Uhrmann et al. 2009] beschriebenen Experiment sollten die unbemannten Fluggeräte eingesetzt werden, um die Flugroute des bemannten Helikopters mit einem zeitlichen Vorlauf von 5 bis 10 Minuten aufzuklären und sicherzustellen, dass die Landezonen für den bemannten Helikopter nutzbar und feindfrei sind. Dazu waren für die einzelnen UAVs Wegpunkte auf einer Karte durch den Helikopterkommandanten zu setzen und die Kamera des UAVs entsprechend zu konfigurieren. Die Identifikation eines Objekts entlang der Flugroute oder in den Landezonen erforderte dabei folgende Schritte:

- Planen des Flugpfads des UAVs für jedes an der Aufgabe beteiligte Fluggerät.
- Setzen des Kameramodus auf „Kartographierung des Bodens“ für jedes UAV.
- Durchsuchen der von den UAVs erstellten, aus Infrarotfotos bestehenden Karte des Flugwegs nach Hotspots, die als weiße Punkte auf der Karte zu sehen sind. Diese Punkte sind mit Markern auf der elektronischen Karte zu versehen.
- Anpassen des Flugplans, falls kein UAV in ausreichender Nähe zu einem so gesetzten Marker in der Karte ist.
- Konfiguration der Sensorplattform mindestens eines UAVs, um die Kamera auf die Position des Markers zu richten und nachzuführen.
- Beurteilung des Objekts im Livevideo und Eintragen von Fahrzeugtyp (normales Auto, Geländewagen, gepanzertes Fahrzeug) und Einstufung (eigene Einheit, neutral, feindlich).

- Konfiguration von Flugweg und Kamerasystem des UAVs, um die Routenaufklärung fortzusetzen

Je nach Proband führte dabei die Erhöhung der Anzahl von unbemannten Fluggeräten zu unterschiedlichen Reaktionen. Bei einem Probanden kam es zu einem Anstieg der Beanspruchung mit einhergehender Erhöhung der Bedien- und Auswertefehler. Beide Probanden wendeten selbstadaptive Strategien [Donath 2012] an, um auf Kosten der Leistung den Anstieg der subjektiv empfundenen Beanspruchung zu reduzieren:

„Die Anwendung solcher [selbstadaptiven] Strategien führt dazu, dass Operateure Aufgaben ökonomischer bzw. rationeller, nicht jedoch notwendigerweise im Sinne optimaler Leistung durchführen. So werden nicht selten primäre Ziele auf Kosten sekundärer Zielvorstellungen verwirklicht.“ [Donath 2012]

Für den Kommandanten des bemannten Helikopters, der zusätzlich mehrere UAVs zu führen hat, wirken sich die drohende Überbeanspruchung und die damit einhergehenden selbstadaptiven Strategien in der Missionseffizienz aus.

Die Auswirkungen der multi-UAV-Führung mit klassischer Automation durch den Kommandanten eines bemannten Helikopters waren im Einzelnen:

- Durch das Fehlen einer Automation zur Vorklassifizierung von Auffälligkeiten in den Sensordaten der UAVs (engl.: ATR – Automated Target Recognition), waren die Aufmerksamkeitsressourcen des Kommandanten im hohen Maße durch die Bildauswertung gebunden. Bei der Führung mehrerer UAVs war eine zeitnahe und rechtzeitige Auswertung der Sensorbilder nicht kontinuierlich sicherzustellen.
- Die Koordination der UAVs erfolgte – wenn überhaupt – vollständig durch den Kommandanten. Insbesondere bei der gemeinsamen Aufklärung einer Flugroute konnte der menschliche Bediener die Flugrouten nicht so planen, dass eine optimale Nutzung der bildgebenden Sensoren dauerhaft stattfand. Vielmehr entstanden hohe Überschneidungen in den aufklärten Routen oder Lücken in den aufzuklärenden Bereichen.
- Die Konfiguration der Sensornutzlast zur näheren Identifizierung von Auffälligkeiten in den Bilddaten erfolgte nicht immer rechtzeitig, d.h. es war kein UAV mehr in der Nähe der entsprechenden Koordinate um ein detailliertes Sensorbild zu erstellen. In Einzelfällen führte dies dazu, dass der Kommandant ohne weitere Verifikation Sensorauffälligkeiten als feindliche Einheiten meldete. Auf Nachfrage erläuterten die Probanden, dass diese selbstadaptive Strategie am ehesten geeignet sei, Schaden von den eigenen Einheiten abzuwenden, da diese pauschal ausweichen würden.
- Aufgrund der hohen Beanspruchung der Versuchspersonen war die Informationsaufnahme zum Flugzustand des bemannten Helikopters und des Unterstützungsbedarfs des Piloten stark eingeschränkt. Die Kooperation von Kommandant und Pilot kam in einzelnen Missionsphasen zum Erliegen.
- Die Kommandanten fokussierten sich auf die Aufgabe der UAV-Bedienung. Nach Aussage der Versuchspersonen befanden sie sich „mental im UAV“. Die Gesamtverantwortung über die durchzuführende Mission und die Führung des bemannten Helikopters gerieten dadurch in den Hintergrund.

Zusammenfassend konnte festgestellt werden, dass die konventionelle Führung mehrerer unbemannter Fluggeräte durch den Helikopterkommandanten zur Vorabklärung von Flugrouten und Landezonen in dynamischen Helikoptermissionen zu hoher Arbeitsbeanspruchung führt. In der Folge kommt es zu einem deutlichen und im Hinblick auf die militärischen Missionen gefährlichen Einbruch der Effizienz des Gesamtarbeitssystems.

3 Auftragsbasierte UAV-Führung

Nachdem in Abschnitt 3.1 der Begriff des Auftrags und der Auftragstaktik im Sinne dieser Arbeit erläutert wird, gibt Abschnitt 3.2 einen konzeptuellen Überblick über die Beantwortung der in Kapitel 1 vorgestellten Forschungsfragestellung. In Abschnitt 3.3 wird angeführt, wie ein künstliches System die vom Menschen erteilten Aufträge interpretieren kann. In Abschnitt 3.4 wird dargelegt, inwieweit und mit welchen Methoden den Problemen klassischer Automations- und Delegationssysteme begegnet werden kann. Abschnitt 3.5 zeigt die Motivation für die Nutzung von Domänenwissen und stellt ein Vorgehensmodell für die Wissensoperationalisierung vor. In Abschnitt 3.6 werden verschiedene Sichten auf Automationsgrade und die entsprechende Einordnung der auftragsbasierten Führung aufgezeigt. Kapitel 3.7 betrachtet Kooperationsaspekte zwischen UAVs.

3.1 Auftrag und Auftragstaktik

Sowohl bei der Führung von Maschinen durch Menschen als auch bei der Führung von Menschen wird der Begriff Auftrag verwendet, der nachfolgend detailliert erläutert werden soll.

Als Auftrag werden beim klassischen Entwurf von Mensch-Maschine-Systemen Funktionen³ verstanden, die dem Menschen zugeordnet werden [Johannsen 1993]. Es handelt sich nach dieser Definition um im Entwurfszeitpunkt festgelegte Funktionszuordnungen, die „objektiv vorgegebene Aspekte eines Mensch-Maschine-Systems“ [Johannsen 1993] beschreiben. Aufgaben, die sich aus dem Auftrag ableiten, stellen dabei das „subjektive Abbild der objektiv vorgegebenen Aufträge“ dar [Johannsen 1993]. Nach Johannsen können diese im Idealfall exakt dem Auftrag entsprechen. Diese klassische Definition der Begriffe Auftrag und Aufgabe sieht also die Subjektivität des Menschen als Interpretationsfreiraum – wenn nicht sogar als Störfaktor – bei der Umsetzung von Aufträgen in Aufgaben an.

Dem gegenüber steht die Verwendung der Begriffe in der militärischen Führung. Dort bezeichnet ein Auftrag

„[...] ein in einer bestimmten Zeit und/oder in einem bestimmten Raum zu erreichendes Ziel und ggf. die von der Führung damit verfolgte Absicht. Er lässt dem Empfänger weitgehende Handlungsfreiheit in der Durchführung und in der Wahl der anzuwendenden Mittel. Er verlangt daher eigene Urteils- und Entschlusskraft sowie selbständiges, verantwortungsbewusstes Handeln.“ [HDv 100/900 1998]

Hier steht die Entscheidungs- und Urteilsfähigkeit des Empfängers, an den der Auftrag gerichtet ist, als zentrale Stärke im Vordergrund.

Auftragstaktik bezeichnet die konsequente Verwendung von Aufträgen im obigen Sinne als Führungsmittel. Dieser Ende des 19. Jahrhunderts entstandene Führungsstil hat sich

³ Nach [Johannsen 1993] sind Funktionen in der hierarchischen Dekomposition eines Arbeitsprozesses die Bausteine bzw. Verantwortlichkeiten, die sich eindeutig dem Mensch oder der Maschine zuordnen lassen.

insbesondere in der Heeresführung durchgesetzt, gilt mittlerweile als „*Markenzeichen der Bundeswehr*“ und findet sich sogar in der Unternehmensführung [Leistenschneider 2002]. Dort wird es insbesondere als Mittel der *Komplexitätsreduktion* seitens der Führungsebene verwendet [Hartmann 2004].

Das Gegenstück zur Auftragstaktik bildet die Befehlstaktik, hier wird nicht das Ziel der Handlung, sondern der Lösungsweg als solcher vorgegeben:

„Befehlstaktik gibt den Weg der Aufgabenerfüllung vor. Den Mitarbeitern wird vorgeschrieben, welcher Lösungsweg einzuhalten ist. Vorteil ist, dass Abläufe verlässlich und systematisierbar sind. Insbesondere im Umgang mit Sicherheitsbestimmungen oder sehr komplexen Vorgängen, reduziert eine Anweisung ebenfalls die Komplexität. Eine pathologische Ausprägung der Befehlstaktik besteht in der Einmischung in die einzelnen Tätigkeiten der Mitarbeiter selbst. In diesem Fall wird den Mitarbeitern nicht einmal zugetraut, ihre eigentlichen Aufgaben als Spezialisten zu erfüllen. In Unternehmen wird dies insbesondere durch schwache Führungskräfte praktiziert.“ [Hartmann 2004]

Anzumerken ist, dass die von Hartmann genannten Vorteile der Befehlstaktik nur dann zur Geltung kommen können, wenn sich – wie bei den im Zitat genannten Sicherheitsbestimmungen – die Anweisungen bzw. Befehle a priori bestimmen lassen. Ist eine Situation mit Unsicherheiten behaftet, so können nicht für jede Eventualität Anweisungen erlassen werden. Folglich müssen in dynamischen Situationen die Anweisungen durch die Führungsebene kontinuierlich erfolgen, um die Erreichung des nicht kommunizierten Zwecks ebendieser Anweisungen sicherzustellen. In der Folge ist mit einer Überlastung der Führungsebene in diesen Situationen zu rechnen, weshalb allgemein die Auftragstaktik vorzuziehen ist [Hartmann 2004; Sun-Tzu und Peyn Gitta 2001].

Bei der auftragsbasierten Führung von unbemannten Fluggeräten im Sinne dieser Arbeit wird die Definition eines Auftrags entsprechend [HDv 100/900 1998] und [Leistenschneider 2002] zugrunde gelegt.

Durch Übertragung dieses auftragsbasierten Führungsparadigmas auf die Führung von UAVs sollen die aus der menschlichen Führung bekannten Vorteile der Entlastung der Führungsebene durch das eigenständige, situationsangepasste Nutzen vorhandener Mittel und Ressourcen zur Erreichung eines vorgegebenen Ziels auf die Führung unbemannter Komponenten angewendet werden.

3.2 Konzept

Für die Führung mehrerer unbemannter Fluggeräte durch den Kommandanten eines bemannten Helikopters innerhalb einer militärischen Operation sollen die Fluggeräte auf einer Abstraktionsebene geführt werden, die sich an der Führung menschlicher Untergebener orientiert. Dies soll dazu beitragen, die Führung zu ermöglichen und die Beanspruchung des UAV-Operateurs auf einem Niveau zu halten, das die parallele Führung seines bemannten Helikopters zulässt. Dazu wird das Konzept der *auftragsbasierten UAV-Führung* vorgestellt.

Die Führung menschlicher Untergebener innerhalb der Mission erfolgt durch das Übertragen von *Aufträgen*. Diese werden durch den Empfänger unter *Berücksichtigung der aktuellen Situation*, von *allgemeinen Einsatzgrundsätzen* als *Handlungsziele* interpretiert. Er leitet sich zum Erreichen der Handlungsziele *Aufgaben* aus den

übertragenen Aufträgen ab, komplettiert implizit anhand der Situation und der Aufträge fehlende Zwischenaufgaben und führt diese zielorientiert durch. Wird ein Auftrag an mehrere Unterebene vergeben, so *kooperieren* diese im Idealfall in der Durchführung, indem sie sich gegenseitig in der Ableitung und Umsetzung ihrer Aufgaben *koordinieren*. Rückmeldungen an den Auftraggeber erfolgen nach Möglichkeit unter Bezugnahme auf den Auftrag und die Situation.

Diese *kognitiven Fähigkeiten* des menschlichen Auftragsempfängers werden für die auftragsbasierte Führung von unbemannten Fluggeräten in einer neuen Automatisierungsschicht nachgebildet. Dazu wird das notwendige *Wissen* für das Situationsverständnis, zur Interpretation von Aufträgen und deren Durchführung, zur kooperativen Auftragsbearbeitung, über allgemeine Einsatzgrundsätze und deren Einhaltung und die Nutzung günstiger Gelegenheiten in einer künstlich kognitiven Einheit hinterlegt. Diese nutzt dieses statische Wissen, um im Verlauf einer Mission dynamisches, situatives Wissen zu generieren und mit diesem *maschinellen Situationsverständnis* und ihren *Problemlösefähigkeiten* die übertragenen Aufträge zu erledigen.

Analog zur Führung von menschlichen Unterebenen soll auch die UAV-Führung erlauben, verschiedene Detaillierungsgrade der Auftragsbeschreibung zu formulieren. Einzelne nötige Vorbereitungshandlungen können dazu – je nach *Stringenz der Führung* – im Auftrag explizit oder auch nur implizit vorhanden sein. Zur Ermittlung von nicht verbalisierten – also implizit durch den Operateur angenommenen – Teilaufträgen nutzt die ACU ihr Wissen um die Situation, die allgemeinen Einsatzgrundsätze und ihre Problemlösungswissen bei der Auftragsinterpretation. Die resultierenden Automationsgrade werden detailliert in Abschnitt 3.6 betrachtet.

Ziel ist eine Transformation der UAV-Führung von einer parametrischen Beschreibung der durchzuführenden Tätigkeit, wie z.B. der Vorgabe einer Liste abzufliegender Koordinaten, hin zur Führung über Aufträge, die im Missionskontext formuliert werden.

3.3 Aufgaben als Interpretation von Aufträgen

Als *Aufgabe* wird in dieser Arbeit das Ergebnis der Interpretation eines Auftrags im Hinblick auf die aktuelle Situation und die zur Auftragsbefreiung zur Verfügung stehenden Mittel definiert. Dadurch entstehen eine oder mehrere Aufgaben, die nacheinander, parallel oder auch alternativ durchzuführen sind.

Eine einzelne Aufgabe im obigen Sinne definiert somit abstrakt eine Gruppe von Handlungen, welche konkret durchgeführt werden um das im Auftrag definierte Ziel zu erreichen.

Essentiell zur Ableitung von Aufgaben aus dem Auftrag sind neben den in [HDv 100/900 1998] genannten Eigenschaften der Urteils- und Entschlusskraft auch das Wissen um das im Auftrag enthaltene Ziel, die eigenen Mittel (Operation Supporting Means), deren Wirkung und das Wissen und Erfassen der gegenwärtigen Situation.

Eine Art der Aufgabenbearbeitung ist die *Delegation*. Sie beinhaltet die Verbalisierung eines Ziels für eine nachgeordnete Führungs- oder Ausführungsschicht. Diese nachgeordnete Schicht betrachtet diese Zielvorgabe wiederum als ihren Auftrag, den es zu interpretieren und in Aufgaben zu zerlegen gilt. Generell kann jeder Auftrag als das Ergebnis einer entsprechenden Delegation durch eine übergeordnete Führungsinstanz verstanden werden.

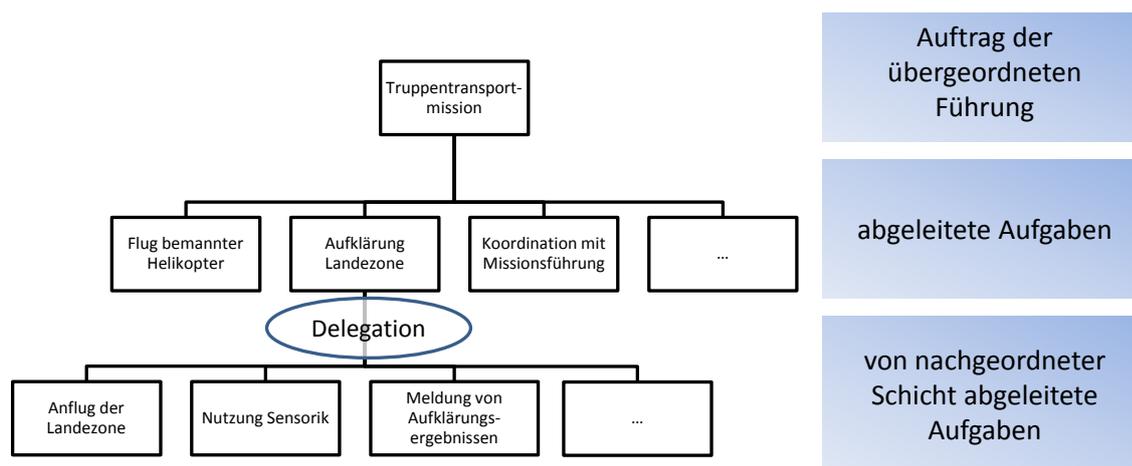


Abbildung 3-1: Ableitung von Aufgaben aus Aufträgen über mehrere Führungsebenen

Abbildung 3-1 zeigt exemplarisch für eine militärische Truppentransportmission die Dekomposition von Aufgaben aus dem Missionsauftrag (Übergang von der obersten auf die mittlere Ebene) wie sie in den MUM-T Referenz- und Experimentalmissionen durch die Versuchspersonen und das zu evaluierende System umgesetzt wurde. Die Aufgabe der Aufklärung der Landezone wird hierbei delegiert und in der Form eines Auftrags an eine nachgeordnete Einheit weitergeleitet.

Soll eine maschinelle Komponente diese Dekomposition leisten, so muss sie wie der Mensch über entsprechende *Planungsfähigkeiten* verfügen. Dabei handelt es sich um die Fähigkeit, eine Handlungssequenz zur Erreichung eines vorgegebenen Ziels zu ermitteln [Russell und Norvig 2010].

3.4 Anforderungen an auftragsbasiertes Führen

Im Folgenden sollen die in Abschnitt 2.3 genannten Anforderungen und Probleme hinsichtlich der Human Factors der UAV-Führung in MUM-T adressiert werden.

3.4.1 Anforderungen durch Missionsflexibilität

Wie in Abschnitt 2.3.1 angeführt, ist die Planung und Integration von UAVs in den aktuellen Einsatzszenarien durch Vorplanung geprägt, welche die Reaktion auf unvorhergesehene Ereignisse erschwert.

Um diese Inflexibilität aufzubrechen, müssen folgende Bedingungen erfüllt werden:

1. Die Führung muss in die Lage versetzt werden, einen alternativen Plan aufgrund neuer Erkenntnisse im Verlauf der Mission zu erstellen.
2. Um die Erfolgchancen des alternativen Plans zu erhöhen, muss die Vorabklärung für den neuen Missionsverlauf ähnlich leistungsfähig und zuverlässig sein wie für die ursprünglich geplante Mission.
3. Dieser Plan muss an alle beteiligten (Luft-)Fahrzeuge so mitgeteilt werden können und von diesen verstanden werden, dass er umgesetzt werden kann.

Aus diesen Forderungen lassen sich Anforderungen an die an der Mission Beteiligten ableiten:

1. Die erste Forderung verlangt von der Missionsführung ein hohes Maß an Flexibilität und zugleich die zeitnahe Aufnahme und Verarbeitung neuer, missionsrelevanter Informationen.
2. Die zweite Forderung verlangt nach einer Aufklärung von Gebieten, Objekten und Routen welche zu Missionsbeginn nicht bekannt sind. Unbemannte Fluggeräte bieten die Möglichkeit, die Aufklärungsinformationen zeitnah und ohne Exposition von Personal zu gewinnen.
3. Im dritten Punkt wird eine Führungsmöglichkeit verlangt, die ein Verständnis des neuen Plans voraussetzt. Mit einer rein wegpunktbasierten Führung, wie sie derzeit in vielen UAV-Systemen zum Einsatz kommt, liegt die Umsetzung des neuen Plans durch UAVs in einen parametrischen Flugwegplan allein bei der Führung. Diese Aufgabe kann aber aufgrund des dazu nötigen Aufwands nicht oder nur suboptimal direkt durch die den Operator erledigt werden. Die Delegation an eine Kontrollstation hingegen fordert eine Koordination mit dieser. Zudem bleibt zu befürchten, dass auch eine bemannte Bodenkrollstation die Umplanung der Wegpunkte nicht zeitnah bewältigen kann.

Um diese Anforderungen in einem Kräfteansatz mit bemannten und unbemannten Komponenten erfüllen zu können, sollen sowohl die Flugführung als auch die Bedienung und der Einsatz der Nutzlast gemeinsam durch den Kommandanten eines bemannten Helikopters erfolgen. In Abbildung 3-2 wird dieser Übergang in den inneren Diagrammen durch die Levels of Interaction (LoI) 3 und 4 dargestellt. Diese Eingriffsmöglichkeiten in die Führung der unbemannten Fluggeräte sind in [STANAG 4586 2007] definiert, wobei LoI 3 die Sensorführung und -nutzung der UAVs erlaubt und LoI 4 zusätzlich die Flugführung (siehe auch Abschnitt 3.6.3).

Ist die oben genannte flexible Missionsführung nicht notwendig oder gewünscht, dann kann auch die Aufgabe der UAV-Führung bei einer dedizierten Bodenstation verbleiben (LoI 3), welche die Vorplanungen inkl. Alternativpläne der Mission kennt und zur Missionsführung nutzen kann. In dieser Konfiguration würde aus der UAV-Führung aus dem Helikopter kein zusätzlicher, operativer Nutzen für die Mission resultieren. In Abbildung 3-2 wird dies in den unteren Diagrammen – konventionelle Missionsführung – dargestellt, in denen „operativer Nutzen“ konstant bleibt und die direkte Flugführung somit unnötig ist. In den oberen Diagrammen – flexible Missionsführung – hingegen wird mit einem Nutzen für die Mission gerechnet, was durch einen Anstieg des „operativen Nutzen“ dargestellt ist.

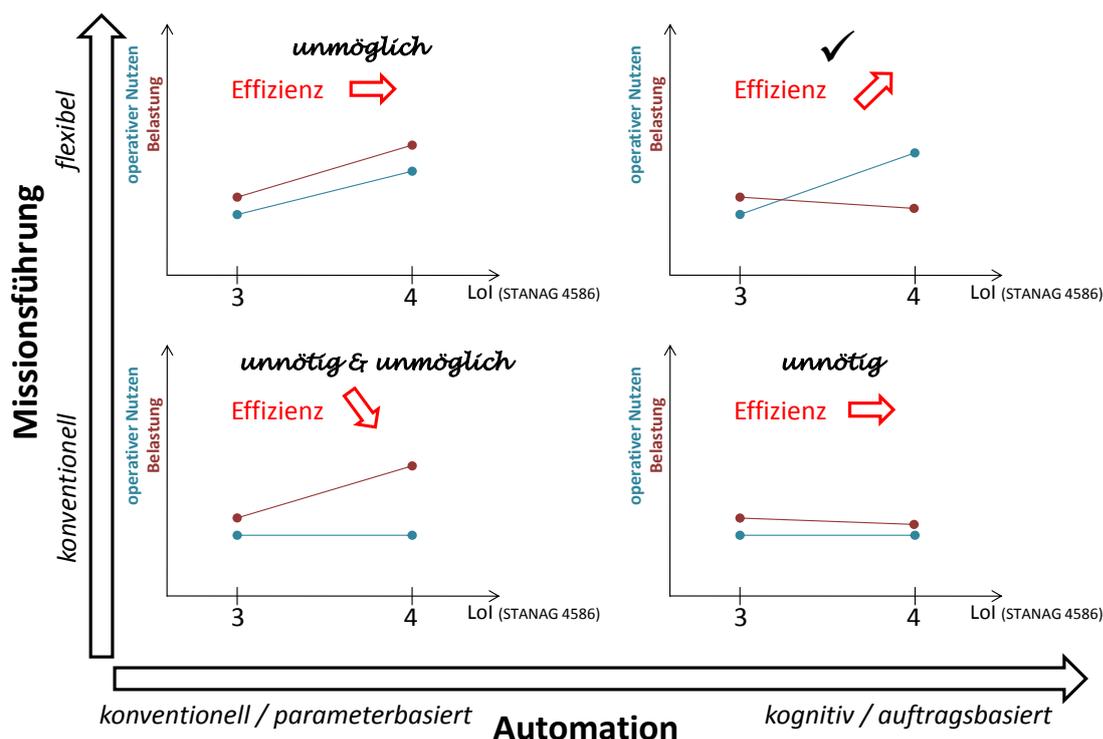


Abbildung 3-2: Gegenüberstellung von Automationsarten und Operationsführung

Die obige Bedingung Nr. 3 (Verständnis eines flexibel geänderten Missionsplans durch die Automation aller Luftfahrzeuge) erfordert eine Automatisierung der UAVs, die diese Funktionalitäten bietet. Ohne diese Automatisierung steigt der Führungsaufwand derart an, dass eine gemeinsame Führung von Sensorik und Flugmission nicht möglich ist. In Abbildung 3-2 ist dies in den linken Diagrammen mit dem Anstieg der Arbeitsbelastung (engl.: task load) dargestellt, welche die UAV-Führung praktisch unmöglich macht. Zusammenfassend wird in dieser Arbeit postuliert, dass eine Steigerung der Missionseffizienz durch direkt und aus dem Cockpit geführte UAVs nur mit auftragsbasierter UAV-Führung unter der Maßgabe flexibler Operationsführung verzeichnet werden kann (Abbildung 3-2, rechts oben).

3.4.2 Folgerungen aus dem Delegationsverhältnis

Da die Gesamtverantwortung für das Handeln im Delegationsverhältnis beim Delegierenden liegt (vgl. Abschnitt 2.3.4), ist eine Realisierung der auftragsempfangenden UAVs als sog. „autonome Systeme“ a priori ausgeschlossen. Dadurch würden die Auftragsempfänger ermächtigt, von dem gegebenen Auftrag nach eigenem Ermessen abzuweichen und somit dem Delegierenden die Verantwortung bzgl. der ursprünglich übertragenen Aufgabe entreißen. Ferner wird in [Onken und Schulte 2010] dargelegt, dass einem rein technischen System aus pragmatischen und ethischen Gründen nicht die Autorität zur Modifikation seines Arbeitsziels übertragen werden darf. Das System darf also nur innerhalb der ihm übertragenen Aufgaben und Befugnisse agieren. Daher resultiert auch die Forderung mit jeder delegierten Aufgabe – explizit oder implizit – den Handlungsspielraum festzulegen, in dem sich der Empfänger des Auftrags bewegen darf. Innerhalb dieses „window of authority“ [Miller 2005] kann jedoch das System eigenständig als „semiautonomes System“ [Onken und Schulte 2010] agieren.

Die Forderung nach Wissen um den Auftrag im Kontext des Domänenwissens und der aktuellen Situation (Abschnitt 2.3.4) legt eine Realisierung des Auftragsempfängers als technisches System durch ein *wissensbasiertes System* nahe. Da dieses zur Kommunikation mit dem Delegierenden *Sachverhalte im Kontext des Auftrags verbalisieren* muss, müssen zumindest die dafür notwendigen Bestandteile des Wissens in symbolischer Form vorliegen und können z.B. nicht exklusiv etwa als künstliches neuronales Netz oder in einer anderen rein parametrischen Form repräsentiert sein.

Ein speziell zu verbalisierender Sachverhalt sind Handlungsziele. Diese müssen auf der Seite des Auftragsempfängers verstanden werden und er muss über die Fähigkeit verfügen, im Sinne dieser Ziele zu handeln. Somit kann die Realisierung eines künstlichen Auftragsempfängers nur mit einem *zielebasierten System* erfolgen. Im Dialog mit dem Auftraggeber und anderen Auftragsempfängern sollen die Ziele im Kontext der Mission formuliert werden. Das resultiert in einer Führungsebene, in der domänenspezifische Termini im Dialog verwendet werden können.

Zusammenfassend muss also jedes technische System, an das der Mensch Aufgaben im Sinne dieser Arbeit delegieren kann, folgende Eigenschaften aufweisen:

1. Das System muss semiautonom sein und darf nicht vollständig autonom handeln.
2. Es soll sich um ein wissensbasiertes System handeln.
3. Das Wissen muss die für das Auftragsverständnis notwendigen Teile des Domänenwissens beinhalten.
4. Dieses Domänenwissen ist symbolisch zu repräsentieren.
5. Es muss sich um ein zielebasiertes System handeln.

In Kapitel 4 wird das Framework COSA vorgestellt, mit dem sich diese Systemanforderungen vollständig umsetzen lassen.

Die aus der Principal-Agent-Theorie abgeleiteten Betrachtungen (vgl. Kapitel 2.3.4) hinsichtlich der Gefahren von Informationsasymmetrie, Umweltunsicherheiten und Interessenskonflikten sollen ebenfalls in der Umsetzung der UAV-Automatisierung berücksichtigt werden.

Um der Gefahr einer Informationsasymmetrie zu begegnen, die das Handeln innerhalb der Delegationsbeziehung Mensch-Maschine erschwert, soll die wissensbasierte UAV-Automatisierung kontinuierlich das Ziel verfolgen, *relevante Informationen mitzuteilen*. Das bewirkt, dass relevante Änderungen des Situationswissens von der Maschine sowohl an den menschlichen Operateur als auch an andere UAVs übertragen wird. Diese Anforderung resultiert wiederum in der Notwendigkeit der Beurteilung, welche Wissensänderungen als relevant eingestuft werden sollen. Im System ist also die Fähigkeit vorzusehen, Wissen über Wissen – sogenanntes *Metawissen* – zu hinterlegen und zu nutzen. Die aus menschlichen Teams bekannte Fähigkeit, Wissensbedarfe der Teammitglieder zu kennen und aktiv das eigene Wissen mittels Metawissen daraufhin zu überprüfen [Busch 2008], soll auch eine Fähigkeit der UAV-Automatisierung sein.

Umweltunsicherheiten lassen sich in einer militärischen Helikoptermission nicht vollständig vermeiden. Jedoch ist gerade der Zweck des UAV-Einsatzes, diese durch aktuelle Aufklärungsergebnisse auf ein Minimum zu reduzieren. Aus diesem Grund sollen die UAVs nach Möglichkeit nicht nur bei expliziter Beauftragung, sondern auch *parallel zur Durchführung anderer Aufträge zur weiteren Informationsgewinnung beitragen*, wenn dies die Durchführung der Hauptaufgabe – also derjenigen, die aus den

Aufträgen des Operateurs resultieren – nicht beeinträchtigt. Interessenskonflikte können im Umgang mit einem maschinellen System entstehen, wenn dessen Umsetzung der übertragenen Zielsetzung nicht der Intention des menschlichen Bedieners entspricht. Der Grund dafür ist ein unvollständiges oder falsches Modell des Bedieners über die Umsetzung der Aufträge durch das UAV. Obwohl der Problematik solcher Modellfehler in Kapitel 3.4.3 begegnet wird, lassen sie sich nicht vollständig ausschließen. Um eine Auftragsumsetzung zu verhindern, die nicht der Intention des menschlichen Bedieners entspricht, wird eine *Interventionsmöglichkeit* vorgesehen: Getrieben durch sein Metawissen teilt die Maschine dem menschlichen Benutzer mit, wie ein Auftrag umgesetzt werden soll. Dazu verwendet sie exklusiv die Ontologie und das Abstraktionsniveau, auf dem auch die Aufträge selbst erstellt werden können. Damit wird dem Operateur die Möglichkeit gegeben, die „Intention“ des UAVs mit der eigenen Vorstellung abzugleichen und ggf. durch eine gezielte Intervention den Auftrag hinsichtlich seiner Ausführung zu verfeinern.

Nach [Freed et al. 2005] sind Bediener beim Einsatz intelligenter Systeme zurückhaltend. Es fehlt das notwendige Vertrauen (engl.: trust) in das System. Durch die Möglichkeit der Intervention ist eine Adaptierbarkeit der Automation gegeben, die diesem Effekt entgegenwirkt:

“Trust in the automation (and in the system as a whole) should increase with time and experience, especially if the system supports fine control over the degree of autonomy exercised by the intelligent controller.” [Freed et al. 2005]

Die Folgerungen aus der Anforderung einer durch Delegation und Intervention adaptierten Automation werden in Abschnitt 3.6.5 im Detail betrachtet.

3.4.3 Folgerungen aus dem Mensch-Maschine-Verhältnis

Die in Abschnitt 2.3.2 aufgeführten Probleme komplexer Automation sollen im Rahmen der auftragsbasierten Führung adressiert werden.

Eine Erhöhung der Komplexität ist per se durch die Einführung einer weiteren Automation in den Operation Supporting Means nicht zu vermeiden. Jedoch können ihre Auswirkungen gemindert werden. Zur Reduktion der negativen Folgen von *Complexity* findet die Kommunikation mit den UAVs auf einer Auftragsebene statt, welche es erlaubt, die vom Bediener verfolgten Ziele zu spezifizieren. Hierdurch wird das nötige Verständnis der Automation durch den Bediener auf ein gemeinsames Verständnis von Zielen und Aufträgen reduziert. Diese werden in der Terminologie der aktuellen Mission verfasst, so dass die Umsetzung der Ziele in einzelne Handlungsschritte nicht durch den Menschen erbracht werden muss (vgl. Abschnitt 3.3). Die kognitive Leistung der Umsetzung von Handlungszielen in Bedienaktionen einzelner UAV-Subsysteme, deren Überwachung auf Parameterebene hinsichtlich Fehlfunktionen und der Kontrolle der Systemreaktion in Bezug auf die Erfüllung des Handlungsziels muss nicht mehr durch den Bediener erbracht werden. Stattdessen präsentiert sich die Automation dem Bediener als Einheit mit geringerer Komplexität, indem sie diese kognitiven Leistungen zu großen Teilen selbst erbringen kann.

Um *Brittleness* zu adressieren soll die Automation unter Berücksichtigung der Einsatzgrundsätze agieren, welche für die jeweilige Mission ausgegeben wurden. Da diese nicht als Algorithmen, sondern als Ziele hinterlegt werden, wird ihre Einhaltung auch in Situationen verfolgt, welche im ursprünglichen Systemdesign nicht vorgesehen sind.

Opacity und *Inadequate Feedback* können verringert werden, indem auch die Rückmeldung der Automation auf der Abstraktionsebene der Aufträge und Aufgaben erfolgt. Die durchgängige Verwendung des Auftragsbegriffs in der Auftragsvergabe schafft ein gemeinsames Vokabular von Mensch und Maschine auf einer hohen Abstraktionsebene in welcher Handlungsziele und Umsetzungsabsichten im Missionskontext zwischen Operateur und UAV ausgetauscht werden können. Die Interpretation des Auftrags in der jeweiligen Situation durch die Automation sowie der Darstellung der aktuell durchgeführten und künftigen Aufträge im Feedback soll damit den Benutzer die Lage versetzen, sich einfach ein korrektes mentales Modell der Automation bilden und die aktuellen und künftigen Aktionen den von ihm erteilten Aufträgen zuordnen zu können.

Im Gegensatz zu prozeduraler Automation sollen explizite und abstrakt formulierte Handlungsziele verfolgt werden. Dies wirkt *Literalism* entgegen, da allgemeingültige Ziele in Bezug auf die jeweils aktuelle Situation interpretiert und die Handlungsalternativen entsprechend ausgewählt werden.

Zusammengefasst wird den von Billings [Billings 1997] angeführten Problemen komplexer Automation dadurch begegnet, dass die klassische Funktionsteilung zwischen Mensch (kognitiv, überwachend) und Maschine (sensomotorisch, ausführend) aufgebrochen wird. Die Folgerung daraus ist, dass auch die Maschine kognitive Aufgaben übernehmen muss.

3.5 Vorgehensmodell zur Wissensmodellierung

Den in den Abschnitten 2.3.3 und 2.3.4 erläuterten Nachteilen aus unterschiedlichen Modellannahmen von Systementwickler und Systembediener soll dadurch begegnet werden, dass die Interpretation des Domänenwissens nicht exklusiv durch den Systementwickler erfolgt, sondern zur Laufzeit im System. Die direkte Codierung des Domänenwissens von erfahrenen Experten und Operateuren kann – wie in [Meitinger 2008] nachgewiesen – genutzt werden, um in unbekanntem Situationen sinnvolles Systemverhalten zu generieren, welches vom Systementwickler nicht vorgesehen war.

Aus diesem Grund wird für die auftragsbasierte Führung mehrerer unbemannter Fluggeräte ebenfalls Domänenwissen direkt codiert und im System hinterlegt. Die Wissenserhebung und -codierung dazu erfolgt auf den Gebieten der Interpretation der Umwelt, der Kommunikation mit dem menschlichen Vorgesetzten, der Durchführung von Missionen, der Kooperation von Operateuren unterschiedlicher unbemannter Fluggeräte, der Einhaltung allgemeiner und spezieller Einsatzgrundlagen sowie dem zur Kooperation nötigen Wissen um die gemeinsame Durchführung eines Auftrags. Für eine genauere Beschreibung der einzelnen Wissensbereiche und deren Zusammenwirken sei an dieser Stelle auf Abschnitt 4.6.1 verwiesen. Diese Aufteilung des Domänenwissens folgt in weiten Teilen der bei menschlichen Piloten zu beobachtenden Unterteilung [Schutte und Trujillo 1996; Kriegel 2011] nach Flugregelungswissen, Navigationswissen, Systemmanagement, Kommunikation und Missionswissen (nach [Schutte und Trujillo 1996] engl.: *aviate, navigate, manage systems, communicate, task*).

3.5.1 Definition von Wissen

Zur genaueren Betrachtung des Begriffs „Wissen“ soll dieser von den verwandten Begriffen „Daten“ und „Information“ abgegrenzt werden. Nach [Schreiber et al. 2000] handelt es sich bei *Daten* um uninterpretierte Signale von Sensoren bzw.

Sinnesorganen. Konventionelle Automation und Computer können Daten schnell und in großer Menge verarbeiten. Den Daten selbst ist jedoch keinerlei Bedeutung zugeordnet.

Werden die Signale interpretiert und ihnen eine Bedeutung zugeordnet, so entstehen nach [Schreiber et al. 2000] aus den Daten *Informationen*. Der Interpretationsprozess ist vom Vorwissen des interpretierenden Individuums abhängig.

Schreiber führt weiter aus, dass *Wissen* aus der Gesamtheit der Informationen und Daten besteht, die angewendet werden, um Aufgaben durchzuführen und neue Informationen aus Daten zu generieren:

“Knowledge adds two distinct aspects: first, a sense of purpose, since knowledge is the ‘intellectual machinery’ used to achieve a goal; second, a generative capability, because one of the major functions of knowledge is to produce new information. It is not accidental, therefore, that knowledge is proclaimed to be a new ‘factor of production’.” [Schreiber et al. 2000]

	Charakteristik	Beispiel
Daten	Uninterpretiert	... --- ...
Informationen	mit Bedeutung versehene Daten	S O S
Wissen	<ul style="list-style-type: none"> • Zweck und Fähigkeit, Informationen zu generieren • Möglichkeit, Handlungen zu bewirken 	<p>Notruf / Alarm</p> <p>→ Starte Hilfsmaßnahmen</p>

Tabelle 3-1: Unterscheidung zwischen Daten, Information und Wissen nach [Schreiber et al. 2000]

Die menschliche Fähigkeit, Wissen zu Nutzen um zusätzliche Informationen zu generieren und Handlungen zu bewirken, soll im Rahmen dieser Arbeit auf Maschinen zur Führung unbemannter Fluggeräte übertragen werden.

Die maschinelle Verwendung von Wissen soll dabei nach *Modellen menschlicher Informationsverarbeitung* erfolgen. Dazu gehören insbesondere die Fähigkeit zur parallelen Wissensverarbeitung und dem Bilden von Situationswissen (Arbeitsgedächtnis) anhand der Sequenz der Wahrnehmungen in Verbindung mit dem vorhandenen Vorwissen (Langzeitgedächtnis). Entsprechende Modelle menschlicher Kognition werden in Abschnitt 4.1.1 ausführlicher betrachtet. Bei der Systemmodellierung und Wahl des Wissensverarbeitungssystems ist im Gegensatz zu Bereichen der Kognitionswissenschaften die Nachbildung menschlicher Limitationen bei der Wissensverarbeitung nicht relevant.

3.5.2 Wissenserhebung und -operationalisierung

Die Erhebung, Gewinnung und Operationalisierung dieses Wissens orientiert sich an dem Wissenserwerb für Expertensysteme bzw. kognitive Agenten [Schreiber et al. 2000] und der von Putzer [Putzer 2004] formulierten *KP-Methode*. Aus Beobachtung von Piloten bei der Führung von unbemannten Fluggeräten, aus den einschlägigen Vorschriften zum Führungsprozess der Bundeswehr im allgemeinen und militärischen

Helikoptermissionen im speziellen sowie aus Interviews mit Piloten und UAV-Führern wird das Wissen gewonnen. Die von [Schreiber et al. 2000] formulierten Probleme bei der Operationalisierung von Wissen aus Interviews mit den Experten müssen dabei beachtet werden:

“... experts will only produce what they can verbalize. This can arise from two causes. It may be that the knowledge was never explicitly represented or articulated in terms of language. ... Then there is the situation where the knowledge was originally learned explicitly in a propositional or language-like form. However, in the course of experience it has become routinized or automatized. We often use computing analogy to refer to this situation and speak of the expert as having compiled the knowledge.” [Schreiber et al. 2000]

Dieses auch bei der Wissensgewinnung für die Führung unbemannter Fluggeräte aufgetretene Problem kann – wie im obigen Zitat angedeutet – dadurch gemindert werden, dass in die Interviews Ausbilder einbezogen werden, welche in der Verbalisierung und Weitergabe des Wissens geübt sind. Als Vorteil erweist sich hierbei, dass Ausbilder meist zugleich einsatzerfahrene Experten sind.

Ein weiterer Effekt tritt auf, wenn Experten in retrospektiven Interviews ihr eigenes Verhalten erklären und begründen:

“Another problem arises from the observation that people (and experts in particular) often seek to justify their decisions in any way they can. It is a common experience of the knowledge engineer to get a perfectly valid decision from an expert, and then to be given a spurious justification.” [Schreiber et al. 2000]

Diesem Problem kann begegnet werden, wenn in den Interviews Piloten und UAV-Bediener einzeln zu ihren Entscheidungen befragt werden. Den Interviewpartnern ist zu verdeutlichen, dass sie ihr Verhalten nicht zu rechtfertigen haben. Insbesondere bei alternativen Entscheidungen, die ebenfalls zur Lösung geführt hätten, können die Experten oft nicht begründen, wieso die beobachtete Entscheidung durch sie getroffen wurde.

Bei der Umsetzung der aus den Interviews und Expertenbeobachtungen gewonnenen Daten in maschinell verarbeitbares Wissen hat sich folgende, in Abbildung 3-3 visualisierte Adaption der KP-Methode für die Wissensoperationalisierung als zweckmäßig erwiesen:

1. In einem ersten Schritt wird die *Situation identifiziert*, die beobachtet oder beschrieben wird. Eine komplette Mission wird in diese Situationen unterteilt. Situationen werden anhand auslösender Ereignisse identifiziert, z.B. der Landung eines Helikopters im Einsatzgebiet, oder umfassen Missionsphasen, z.B. den Anflug des Zielgebiets.
2. Für jede dieser Situationen wird bestimmt, welche *Ziele* handlungsbestimmend sind. Es wird hierbei unterstellt, dass sämtliche Handlungen auf die Erfüllung der in dieser Situation aktiven Ziele ausgerichtet sind, d.h. „*im Extremfall wird ohne Ziele entsprechend keine Handlung erzeugt.*“ [Putzer 2004]
3. Sind in einer Situation potentiell mehrere Ziele aktiv, welche sich gegenseitig ausschließen, so ist zu bestimmen, anhand welcher Kriterien die *Zielpriorisierung* erfolgt.

4. Für jedes identifizierte Ziel wird bestimmt, welches Wissen notwendig ist, um die Verletzung des Ziels zu erkennen. Existieren die entsprechenden Umweltmodelle noch nicht, so werden sie in diesem Schritt angelegt und beschrieben.
5. Alle *Handlungsmöglichkeiten*, die identifizierten Ziele zu erreichen, werden beschrieben. In diesem Schritt ist unerheblich, ob die Handlungsmöglichkeit bei der Beobachtung des Experten tatsächlich gewählt wurde. Für jede Handlungsmöglichkeit ist zu bestimmen, nach welchen Kriterien die Durchführung möglich ist. Fehlen die zur Bestimmung notwendigen Umweltmodelle, so werden sie in diesem Schritt angelegt. Ferner werden die Vorbedingungen der Handlungsmöglichkeiten modelliert. Stehen mehrere Handlungsmöglichkeiten zur Auswahl, so ist für den Fall, dass zwei oder mehr durchführbar sind, Selektionswissen zu modellieren.



Abbildung 3-3: Adaption des Spiralmodells zur Wissensmodellierung

Wie in [Putzer 2004] vorgeschlagen, bilden diese einzelnen Schritte die Phasen einer Iteration im Spiralmodell [Balzert 2011] und werden so lange wiederholt, bis das Modell den notwendigen Reifegrad erreicht hat. Dies ist daran zu erkennen, dass zu allen Zielen und Handlungsalternativen deren Umweltwissen und Vorbedingungen modelliert sind. Ferner sind Ziele und Handlungsalternativen konfliktfrei oder werden anhand des Umweltwissens konfliktfrei selektiert.

In der Entwicklungs- und Verifikationsphase werden zunächst die Modelle mit ihren Attributen und den aus der objektorientierten Modellierung bekannten Vererbungs- und Assoziationsbeziehungen implementiert. Dies entspricht dem *statischen Modell* nach [Putzer 2004]. Im Anschluss wird das Verhalten der Wissensmodelle umgesetzt, das die Reaktion der in der Iteration neu erstellten Modelle auf Änderungen im Situationswissen (Arbeitsgedächtnis) darstellt. Nach [Putzer 2004] stellt die Gesamtheit des Verhaltens der Wissensmodelle das *dynamische Modell* dar.

Durch das Vorgehen mittels Spiralmodell wird das Risiko fehlerhafter Modelle bzw. aufwendiger Fehlersuche minimiert, da in jedem Durchlauf eine gut abgegrenzte Änderung am Modell durchgeführt wird. Balzert formuliert dies mit

„Beginne im Kleinen, halte die Spirale so eng wie möglich und erreiche so die Entwicklungsziele mit minimalen Kosten.“ [Balzert 2011]

Da das in der Iteration erarbeitete Modellwissen direkt in operationelles Wissen eines Prototyps umgesetzt werden kann, ergibt sich wie in Abbildung 3-3 dargestellt die Möglichkeit jeden Durchlauf der Spirale in der Simulation zu testen und Fehler bzw. Lücken im Wissensmodell zu identifizieren. Wird dies konsequent angewandt, kann der Vorteil der Risikominimierung effektiv genutzt werden.

3.6 Automationsgrade

In UAV-Führungssystemen ist eine große Bandbreite von Automatisierungsebenen und -modi vertreten. Diese sollen im Folgenden betrachtet werden.

3.6.1 Abstraktion

Abstraktion bezeichnet das Weglassen von Details und die deduktive Ableitung von allgemeinen Prinzipien aus konkreteren.

Experten eines Fachgebiets zeichnen sich dadurch aus, dass sie im Gegensatz zu Laien neben konkretem Faktenwissen auch abstrakte Konzepte zur Situationsrepräsentation und Problemlösung verwenden:

“Available evidence suggests that experts reason at a more abstract or principled level than novices. Like novices, experts form a mundane, literal level of mental representation. Yet, unlike novices, experts also appear able to create more complex, abstract representations.” [Zeitz 1997]

Nach [Zeitz 1997] abstrahieren dabei Experten auf einem Niveau, der für die jeweilige Problemstellung und Situation angemessen ist. *„It is suggested that a moderately abstract conceptual representation (MACR) is formed through the encoding of the current situation in relation to the categories that are functional in the domain.“* [Zeitz 1997] Dadurch entsteht nach Zeitz für diese Experten eine Reihe von Vorteilen:

- Im Vergleich zu einer nur flüchtigen oder sich ändernden Situation, hat das abstrakte Konzept eine höhere *Stabilität*. Diese Stabilität verringert die Gefahr, dass neu Erlerntes den Abruf von älterem Wissen unterdrückt (engl.: *“retroactive interference“* [Wohldmann et al. 2008]).
- Durch die Wahl eines geeigneten Abstraktionsniveaus kann die aktuelle Situation besser mit höher abstrahierten Konzepten verknüpft werden. Abstraktion bildet eine *Brücke zwischen der konkreten Situation und allgemeinen Konzepten*.
- Das Denken in Schemata und Analogien führt dazu, dass *allgemeine Schlussfolgerungen* verwendet werden können. Die Interpretation der konkreten Situation wird dadurch unterstützt.
- Durch die *Eliminierung unrelevanter Details* bei der Abstraktion wird die Erkennung allgemeiner Abhängigkeiten erleichtert.

Um die Vorteile von Abstraktion auch beim Umgang mit unbemannten Fluggeräten nutzen zu können, kann die Interaktion zwischen Benutzer und Fluggerät je nach dessen Automatisierung auf unterschiedlichen Abstraktionsniveaus erfolgen.

Die Betrachtungsweise von Automationsebenen orientiert sich somit an der Abstraktion des Fluggeräts, die durch die Automation für den Bediener erreicht wird. Diese reicht von manuell geführten Flugsystemen [Eisenbeiss 2004] über wegpunktbasierte Führung [Uhrmann et al. 2009] und vorprogrammierten Verhaltensweisen [Miller et al. 2005] bis schließlich zu der in dieser Arbeit behandelten auftragsbasierten Führung (vgl. auch [Uhrmann et al. 2010; Uhrmann und Schulte 2011, 2012]).

Abbildung 3-4 stellt die genannten Abstraktionsebenen für Flugführung, Nutzlastführung und Missionsführung dar.

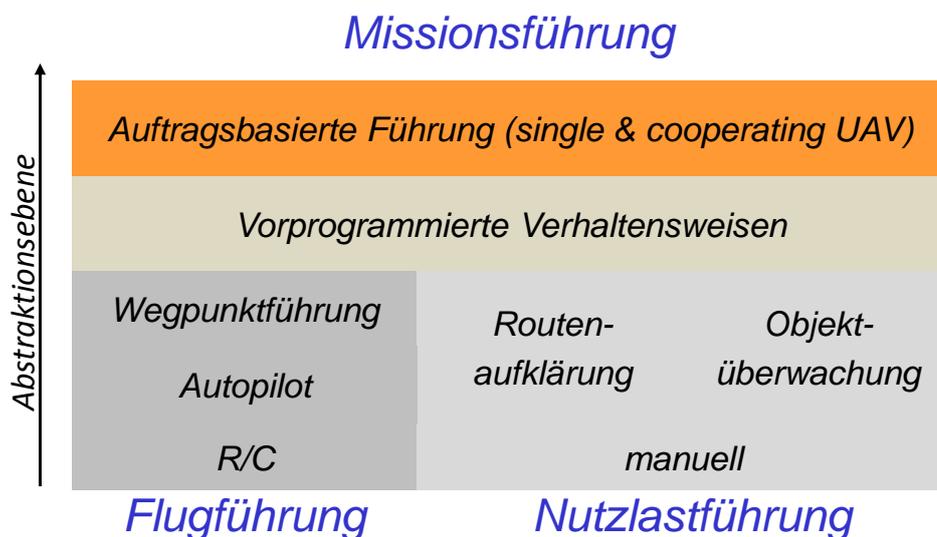


Abbildung 3-4: Abstraktionsebenen der UAV-Führung [Uhrmann und Schulte 2011]

Auf der untersten Abstraktionsebene werden Nutzlast- und Flugführung manuell durchgeführt, d.h. die menschlichen Bediener sind als Regler in einem zur Führung des Fluggeräts und seiner Sensorik notwendigen Regelkreis kontinuierlich eingebunden. Auf den nächsthöheren Abstraktionsebenen wird dieses kontinuierliche Vorgeben von Sollgrößen abgelöst durch die diskrete Vorgabe von Sollgrößen wie Kursen, Geschwindigkeiten, Steigraten oder Wegpunkten bei der Flugführung und erdfesten Koordinaten oder Routenverläufen für die Sensorführung.

Eine Besonderheit beim Übergang zu vordefinierten Verhaltensweisen stellt die Unterstützung des Bedienkonzepts „UAV als Einheit“ dar, indem die Trennung zwischen Flugführung und Nutzlastbedienung auch seitens der Bedieninteraktionen aufgehoben wird und in der Missionsführung aufgeht.

Um die in Abschnitt 3.4 angeführten Anforderungen erfüllen zu können und das UAV in einer der menschlichen Führung angelehnten Art in den Gesamtkräfteansatz integrieren zu können, ist eine weitere Abstraktion notwendig, die eine Übertragung von Aufträgen an das UAV zulässt, die die von Miller [Miller 2005] aufgestellten Anforderungen an Delegationsbeziehungen erfüllt.

3.6.2 Verteilung der Autorität zwischen Mensch und Maschine

Sheridan und Verplank [Sheridan und Verplank 1978] beschreiben eine weitere Sicht auf Automationsebenen. Diese ist in weiten Teilen unabhängig von der gewählten Abstraktionsebene und bezieht sich vor allem auf die *Verteilung der Autorität* zwischen Automation und Bediener. Diese Unterteilung nach Entscheidungs- und Handlungs-

befugnis wird in [Parasuraman et al. 2000] aufgegriffen und in zehn Automationsgrade (engl.: Levels of Automation) diskretisiert:

1. Die Automation bietet keinerlei Unterstützung. Der Mensch trifft alle Entscheidungen und führt alle Handlungen durch.
2. Die Automation bietet eine vollständige Liste an Entscheidungsvorlagen bzw. Handlungsalternativen zur Auswahl an.
3. Die Auswahl an Handlungsalternativen wird durch die Automation vorselektiert.
4. Es wird eine Handlungsalternative durch die Automation vorgeschlagen.
5. Die eine vorgeschlagene Handlungsalternative wird durch die Automation durchgeführt, wenn der Mensch aktiv zustimmt.
6. Eine durch die Automation bestimmte Handlungsalternative wird durchgeführt, wenn der Mensch nicht innerhalb einer definierten Zeit interveniert.
7. Eine durch die Automation bestimmte Handlungsalternative wird automatisch durchgeführt und der Mensch wird in jedem Fall anschließend darüber informiert.
8. Die Automation informiert über die automatisch durchgeführte Handlungsalternative nur auf Nachfrage des Menschen.
9. Der Mensch wird nur über die automatisch durchgeführte Handlungsalternative informiert, wenn dies die Automation so entscheidet.
10. Die Automation informiert den Menschen nicht und handelt selbständig. („... *acts autonomously, ignoring the human.*“ [Parasuraman et al. 2000])

Hinsichtlich dieser Klassifizierung ist bei einem unbemannten Fluggerät nach der automatisierten Komponente zu unterscheiden. Es kann – mit Ausnahme eines nichtautomatisierten, vollständig manuell geführten Systems – keine einheitliche Automatisierungsstufe nach [Parasuraman et al. 2000] angegeben werden. Deutlich wird dies in wegpunktbasierten Systemen wie ab Abschnitt 2.2 beschrieben. Die Definition der Wegpunkte ist in diesen Systemen exklusiv dem menschlichen Operateur zugeordnet und wird nicht durch die Automation unterstützt, erfolgt also auf Automatisierungsebene 1. Ein ebenfalls vorhandenes Flugabbruchsystem kann jedoch auslösen, ohne dass der menschliche Bediener dies verhindern könnte, er wird lediglich anschließend über die Auslösung informiert [Delogne 1999; Fudge et al. 2003] (Automatisierungsebene 7 nach [Sheridan und Verplank 1978] und [Parasuraman et al. 2000]). In [Johnson et al. 2007] werden unterschiedliche Automationsgrade in den Bereichen Sensorbildanalyse, Waffenfreigabe, Aufgabenzuweisung und Modifikation der Flugroute betrachtet.

Im Rahmen der in dieser Arbeit vorgestellten, auftragsbasierten Führung werden Aufträge an die unbemannten Fluggeräte übergeben. Eine Übertragung auf einzelne Handlungsalternativen erfolgt durch das UAV. Die Handlungsmöglichkeiten im Sinne der obigen Liste entsprechen demnach der Menge aller möglicher zu erteilender Aufträge. Über deren Durchführung ist der Operateur in jedem Fall zu informieren (vgl. Abschnitt 3.4.2), wodurch die Automationsgrade 8 – 10 ausgeschlossen werden. Bereits erteilte Aufträge werden je nach Art des Auftrags und der Freigabe durch den Operateur automatisch durchgeführt (Automationsgrad 6) oder müssen durch den Operateur aktiviert werden (Automationsgrad 5). Die Umsetzung dieses Aspekts wird in den Abschnitten 4.6.2.4 und 4.8.2 im Detail erläutert.

Für die Nutzung günstiger Gelegenheiten zur Informationsgewinnung, welche sich nur mittelbar aus den übertragenen Aufträgen ableiten lassen, wird exklusiv der Automationsgrad 7 genutzt (vgl. Abschnitt 4.5 für eine detaillierte Begründung).

3.6.3 Interoperabilität

Auch die Integration der unbemannten Fluggeräte in einen aus bemannten und unbemannten Komponenten bestehenden Einsatzverband und die daraus resultierende Interoperabilität kann als Maß für die Automatisierung dienen. So definiert [STANAG 4586 2007] fünf *Level of Interoperability*:

1. Die durch die unbemannte Komponente gewonnenen Daten werden indirekt, d.h. aufbereitet durch eine dedizierte Kontrollstation, an die bemannten Einheiten der Mission weitergeleitet.
2. Die Daten der unbemannten Komponente werden direkt durch die bemannten Einheiten empfangen.
3. Zusätzlich zu Level 2 kann die Nutzlast direkt geführt werden.
4. Das UAV wird von der bemannten Komponente geführt, außer bei Start und Landung.
5. Das unbemannte Fluggerät wird auch bei Start und Landung durch die bemannte Komponente geführt.

[STANAG 4586 2007] merkt an, dass bei den Levels of Interoperability Mischformen möglich sind, so dass beispielsweise die Flugführung nach Level 4, die Nutzlastführung aber nach Level 1 erfolgen kann.

Da bei der auftragsbasierten Führung die unbemannten Fluggeräte als geschlossene Einheiten aus dem Cockpit des bemannten Helikopters geführt werden, setzen sie Systeme nach Level 4 oder Level 5 voraus. Die Einschränkung auf Level 4 reduziert lediglich die Menge der Auftragsarten, da keine Aufträge vergeben werden können, die Start oder Landung beinhalten.

In den weiteren Betrachtungen und in der experimentellen Evaluierung (Kapitel 5) wird ein System mit Interoperabilitätsgrad 5 angenommen bzw. simuliert.

3.6.4 Neglect Tolerance

Eine Intention der Einführung von Automation ist die Erhöhung der Zeit, in der das automatisierte System ohne Steuerungseingriff durch seinen Bediener operieren kann. Anders ausgedrückt soll durch die Automation das Absinken der Effektivität der Durchführung einer Aufgabe ohne menschlichen Eingriff möglichst langsam erfolgen. [Olsen und Goodrich 2003] bezeichnet diese Eigenschaft eines Robotersystems mit *Neglect Tolerance*. Der für diese Definition verwendete Begriff der Effektivität beschreibt pauschal, wie gut ein Team aus Mensch und Maschine eine bestimmte Aufgabe bewältigt, ohne eine spezifische Metrik hierfür vorzugeben [Olsen und Goodrich 2003]. Gefordert wird jedoch, dass eine Metrik verwendet werden muss, um das Absinken der Effektivität unter eine vordefinierte Schwelle bestimmen zu können. Die Zeit zwischen dem letzten Eingriff des menschlichen Bedieners und dem Unterschreiten dieser Effektivitätsschwelle wird als *Neglect Time* [Olsen und Goodrich 2003] bezeichnet.

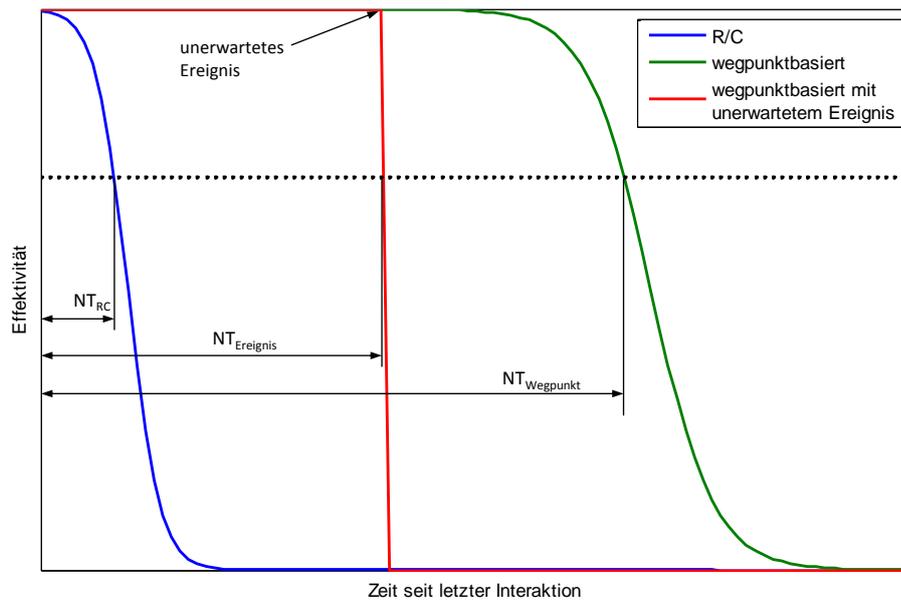


Abbildung 3-5: Effektivitätsverläufe unterschiedlicher Automationsgrade

Bezogen auf die Führung unbemannter Fluggeräte dient die Neglect Tolerance als weiterer Automationsgrad, weil durch sie die Frequenz der notwendigen Eingriffe durch den Bediener bestimmt wird. Abbildung 3-5 zeigt qualitativ den angenommenen Verlauf der Effektivität eines niedrig automatisierten, manuell geführten Fluggeräts (blau) im Vergleich zu einem durch vorprogrammierte Wegpunkte geführten Fluggeräts (grün) ab dem letzten Eingriff durch den Operator. Olsen postuliert in [Olsen und Goodrich 2003] die für diese beiden UAVs abgebildeten sigmoidartigen Verläufe der Effektivität. Für höhere Automationsarten können diese jedoch nicht in jedem Fall angenommen werden, da bei der Bedienung der Automation durch den Operator Grundannahmen über den weiteren Verlauf der Mission getroffen werden. Tritt ein Ereignis ein, das diesen Annahmen widerspricht und durch die Automation nicht kompensiert werden kann, so kann ein plötzliches Unterschreiten der gewünschten Mindesteffektivität eintreten und die Neglect Time verkürzen. Dies ist in Abbildung 3-5 rot dargestellt.

Ändert sich beispielsweise bei einem zur Aufklärung eingesetzten Fluggerät die Situation im Missionsverlauf, so dass die Aufklärungsfähigkeit zeitnah an einem in der Missionsvorplanung nicht berücksichtigtem Gebiet nötig ist, so sinkt sprunghaft die Effektivität des Fluggeräts hinsichtlich der neuen Aufgabe, Aufklärungsinformationen bereitzustellen. Ohne derartige Ereignisse sinkt die Effektivität nicht bzw. deutlich später unter die vorgegebene Schwelle.

Wird die Robustheit gegenüber solchen Ereignissen, wie sie in flexiblen, dynamischen Missionen auftreten (vgl. Abschnitt 2.3.1), bei der Bewertung der Neglect Tolerance berücksichtigt, dann ist sie kein unmittelbares Äquivalent zum durch Automation erreichten Abstraktionsgrad (Abschnitt 3.6.1), weil sich je nach Systemausprägung auch bei gleichem Abstraktionsgrad die Reaktion auf nichtantizipierte Ereignisse unterscheiden kann.

Im Rahmen dieser Arbeit wird die Neglect Tolerance durch die auftragsbasierte Führung erhöht, indem Handlungsziele in Form von Aufträgen an die unbemannten Fluggeräte vergeben werden. Treten vom Bediener nicht vorhergesehene Ereignisse ein, so ist dennoch nur dann eine Bedieninteraktion notwendig, wenn dieses Ereignis das

beauftragte Handlungsziel obsolet macht. Konkret zeigt sich dies am Beispiel der Aufklärung einer Flugroute: Wird während des Abflugs der Route durch das unbemannte Fluggerät bekannt, dass sich eine zu umfliegende Bedrohung auf dieser Route befindet, so muss bei einer wegpunktbasierter UAV-Führung durch Bedienaktionen der Flugweg innerhalb kurzer Zeit geändert werden. Bei Auftragsbasierter Führung wird die Information über die Bedrohung durch das UAV selbst hinsichtlich des Auftrags „erkunde eine bedrohungsfreie Route zum vorgegebenen Ziel“ (vgl. Abschnitt 4.6.2.5) interpretiert und die Route – unter Berücksichtigung weiterer Randbedingungen und Einsatzkonzepte (vgl. Abschnitt 4.6.2.7) – durch das UAV selbst passend geändert. Dazu ist keine weitere Bedieninteraktion notwendig. Zusätzlich kann die Führung auf einem geringen Stringenzniveau erfolgen, was die Dauer der Bedieninteraktionen verkürzt und somit die Neglect Time erhöht. Dies wird im Folgenden genauer erläutert.

3.6.5 Stringenz durch Delegation und Intervention

Im Rahmen der auftragsbasierten Führung soll eine weitere Skala der Automatisierung betrachtet werden. Wie in Abschnitt 3.4 beschrieben, überträgt der Operateur durch die Auftragsvergabe implizit Autorität an das UAV. Die Dekomposition der übergeordneten Zielsetzung in einen oder mehrere UAV-Aufträge erfolgt dabei durch den Menschen. Die Interpretation des Auftrags und die weitere Dekomposition in einzelne Aufgaben erfolgt durch das UAV. Kann der Mensch entscheiden, bis zu welcher Ebene die Dekomposition erfolgt, so kann er dadurch der unbemannten Komponente mehr oder weniger Autorität zugestehen. Der Grad der Autorität, die der Bediener der Automation zugesteht, kann als *Stringenz* (engl.: *Tightness*) [Uhrmann und Schulte 2012] der Führung verstanden werden: Je weniger Autorität die Automation erhält, desto stringenter ist sie an die Vorgaben des Menschen gebunden.

In dem in Abbildung 3-1 dargestellten Beispiel ist ersichtlich, dass bei der Dekomposition von Aufträgen in Aufgaben manche Aufgaben als Vorbereitungsaufgaben für andere dienen. Voraussetzung für die Erkundung der Landezone ist im Beispiel, dass diese zuerst durch das unbemannte Fluggerät angefliegen wird.

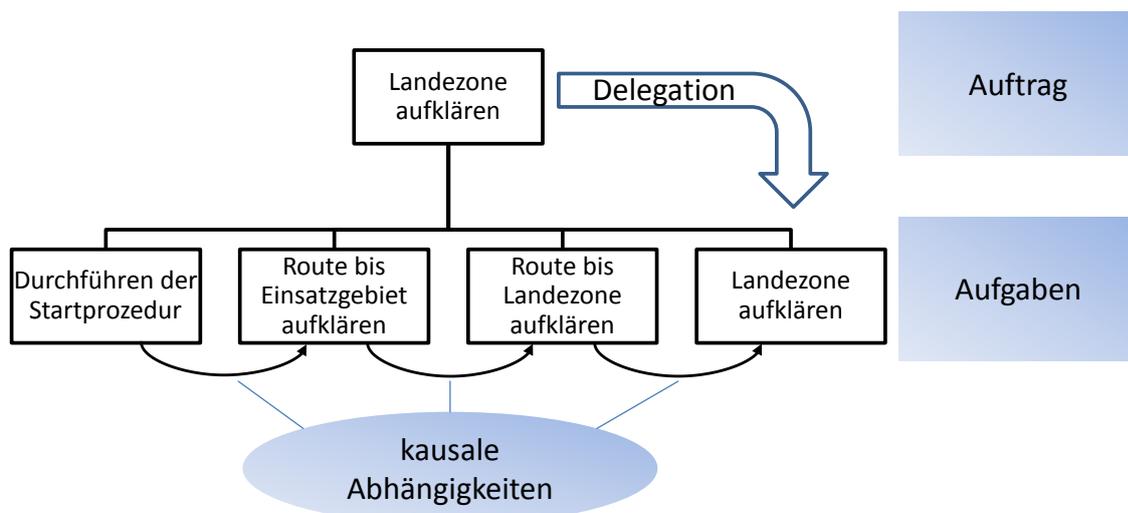


Abbildung 3-6: Auftragsinterpretation durch Auflösen kausaler Abhängigkeiten

Abbildung 3-6 greift das Beispiel erneut auf und zeigt, wie zuerst durch den Akt der Delegation der Auftrag unverändert als Aufgabe übernommen wird. Im Rahmen der

ersten Dekompositionsebene erzeugt werden. Somit gibt der Operateur den UAVs eine *Agenda* im Sinne von Kingdon vor:

“The agenda, as I conceive of it, is the list of subjects or problems to which [...] people [...] are paying some serious attention at any given time.”
[Kingdon und Thurber 2011]

Da die Vorgabe der Agenda durch den Operateur erfolgt, handelt es sich um eine Form *adaptierbarer Automation* nach [Oppermann 1994].

Im Gegensatz zu klassisch adaptierbarer Automation wird jedoch weder eine Betriebsart noch ein Automationsgrad explizit durch den Operateur vorgegeben. Stattdessen wird durch die Definition einer strikten oder losen Agenda der Automationsgrad implizit gewählt. Da auf der obersten Dekompositionsebene eine Rückmeldung über die vom System aus der Agenda erstellte Aufgabenfolge erfolgt, kann der Operateur zudem feststellen, ob die Agenda nach seiner Intention umgesetzt wird. Damit wird die in [OSD/ATL/PSA-UW 2011] aufgestellte Forderung nach intentionsangepasster Automation erfüllt. Durch die fehlende Notwendigkeit einen Automationsgrad explizit vorzugeben wird zudem vermieden, dass ein Bediener stets nur einen Automationsgrad verwendet bzw. nicht die volle Bandbreite der angebotenen Automationsgrade nutzt, wie von [Oppermann 1994] für klassisch adaptierbare Automation postuliert.

Die Möglichkeit, den Automationsgrad jederzeit durch Intervention zu senken, adressiert das von [Funk und Miller 2001] angesprochene Akzeptanzproblem komplexer Automation:

“We have found, however, that applying sophisticated, adaptive and intelligent automation to manage information flow to human consumers in complex systems and domains is not a panacea. Users in complex, high consequence domains are very demanding and critical of automation that does not behave according to their standards and expectations, and it has proven difficult to create systems that are correct enough to achieve user acceptance.” [Funk und Miller 2001]

Da das Feedback der Automation im Missionskontext erfolgt, ist eine Diskrepanz zwischen der Erwartung und der geplanten Auftragsumsetzung durch das UAV durch den Operateur einfach zu erkennen. Durch die Intervention – die auf der Abstraktionsebene der Auftragsvergabe erfolgt – kann die Diskrepanz beseitigt werden.

Nach [Johnson et al. 2007] ist die Möglichkeit der Intervention auch deshalb vorzusehen, weil Automation versagen kann oder das Wissen bzw. das Modell der Automation fehlerhaft sind:

“While autonomous operations will play an important role in achieving multi-vehicle control, the human factor is critical. One obvious role for the human is to intervene in case of system failure. Another important role is for the operator to intervene when automated tools fail because of invalid modelling assumptions or algorithmic idiosyncrasies. Automated mission planning tools use underlying models of the real world and algorithms to solve problems. On rare occasions, the solutions will be suboptimal due to invalid underlying assumptions. Automated tools may also produce poor results because of bad data. In such cases, the operator must intervene to modify the answer. Making use of human experience and knowledge is an important aspect of optimizing multi-vehicle control system performance.”
[Johnson et al. 2007]

Hat beispielsweise das UAV den Auftrag erhalten, Aufklärungsinformationen über ein Gebiet einzuholen, so kann es – im Rahmen des Auftrags, der Situation und der Einsatzgrundsätze – entscheiden, wie dieses Gebiet angefliegen wird. Diese Entscheidung teilt es dem Operateur in Missionsbegriffen mit: „geflogen wird Transit zu Korridor ‚Zulu‘, von dort wird eine Anflugroute auf das Gebiet aufgeklärt und dann das Gebiet selbst“. Der Operateur kann durch diese Art der Rückmeldung direkt entscheiden, ob die Wahl des Korridors „Zulu“ mit seiner ggf. vorhandenen eigenen Vorstellung der Auftragsinterpretation übereinstimmt. Ist dies nicht der Fall, kann er durch gezielte Intervention die Aufgabe „geflogen wird Transit zu Korridor ‚Zulu‘“ zu „geflogen wird Transit zu Korridor ‚Bravo‘“ modifizieren. Damit wird diese nun modifizierte Aufgabe zum Teil des Auftrags. Dieser lautet „fliege zu Korridor ‚Bravo‘ und hole dann Aufklärungsinformation über das Zielgebiet ein“.

3.7 Kooperation

Führt die Vergabe von Aufträgen an mehrere UAVs zu identischen Auftragssegmenten, wie z.B. der Routenaufklärung eines gemeinsamen Streckenabschnitts, so sollen diese Auftragssegmente von den beteiligten Fluggeräten *kooperativ* bearbeitet werden. Kooperation bezeichnet hierbei das Zusammenwirken mehrerer Teilnehmer zur Erfüllung der gemeinsamen Aufgaben. Falls die beteiligten Systeme eng kooperieren, dann übersteigt nach [Baishya und Lewis 2009] der Führungsaufwand zur Führung dieser Systeme die Summe des Aufwands zur Führung der einzelnen Systeme für unabhängige Aufträge deutlich. Baishya und Lewis kommen daher zu der Schlussfolgerung, dass jede Koordination zu automatisieren ist:

“[...] for all but the simplest tasks coordination will need to be automated for robots to remain amenable to human control.” [Baishya und Lewis 2009]

Im Gegensatz zu speziellen Ansätzen für einzelne Anwendungsfälle der Kooperation wie z.B. der gemeinsamen Geolokalisierung von Radarstellungen [Drake et al. 2003], wird hierfür im Rahmen dieser Arbeit ein allgemeiner Ansatz gewählt. Dieser orientiert sich an der Kooperation zwischen Menschen, indem sie den Begriff von *Rollen*, die Menschen bei der gemeinsamen Bearbeitung eines Auftrags wahrnehmen, auf maschinelle Agenten überträgt. Für den alternativen Ansatz der Bearbeitung unterschiedlicher Aufgaben nach der Dekomposition einer gemeinsamen, abstrakteren Aufgabe sei an dieser Stelle auf [Meitinger 2008] verwiesen.

Der Begriff der Rolle wird in Anlehnung an Rollen menschlicher Akteure in einem sozialen Umfeld verwendet. Hierfür nennt [Herrmann et al. 2003] vier Bestimmungsmomente:

1. *„Einer Rolle liegt eine Position zugrunde und eine damit verknüpfte Funktion bzw. Aufgaben.“* [Herrmann et al. 2003]
2. *„Mit der Position sind bestimmte Funktionen bzw. Aufgaben verbunden, meist in Form von [...] Erwartungen, Rechten und Pflichten“* [Herrmann et al. 2003]
3. Eine Rolle kann *Erwartungen* an denjenigen beinhalten, der die Rolle innehat. Dies geht soweit, dass die Rolle durch einen Akteur bereits dadurch eingenommen wird, dass den Erwartungen der Rolle entsprochen wird.
4. Eine Rolle kann sich auf *Interaktionen* beziehen, die der Rolleninhaber *„in konkretes Verhalten umsetzt“*. [Herrmann et al. 2003]

Weiter führt [Herrmann et al. 2003] aus, „*dass sich der Umgang mit Rollen i.d.R. unbewusst abspielt.*“ Es handelt sich damit um wissensbasierte, jedoch beim Menschen unbewusst stattfindende Koordinierungsmechanismen. Konsequenterweise ist bei der Kooperation mehrerer UAVs der menschliche Bediener in die Rollenzuweisung nicht aktiv eingebunden. Vielmehr erteilt er mehreren UAVs Aufträge, welche in gemeinsamen Auftrags-elementen resultieren und die ACUs ermitteln selbständig eine zur Erfüllung der gemeinsamen Auftrags-elemente geeignete Verteilung der Rollen.

Dazu sind folgende Voraussetzungen im Design der ACU zu berücksichtigen:

- Um zu erkennen, dass in mehreren UAVs identische Auftrags-elemente zu bearbeiten sind, müssen diese die Auftrags-elemente *kommunizieren*.
- Aus der Situation, der an den Auftrags-elementen beteiligten Fluggeräten und der Art des Auftrags-elementes sind *die zu besetzenden Rollen* zu ermitteln. Die ACUs sind mit dem nötigen Wissen und den Fähigkeiten auszustatten, diese Rollenkonfigurationen zu ermitteln.
- Durch geeignete Kommunikation ist sicherzustellen, dass *jeder Rolle genau ein Fluggerät zugeordnet* ist und keine Rolle unbesetzt bleibt.
- In Kombination mit dem Auftrags-element bestimmt die eingenommene Rolle das konkrete Verhalten eines Fluggeräts.

Für die Umsetzung der letzten Voraussetzung kann die gewählte Rolle Parameter für Optimierungsalgorithmen liefern, welche das konkrete Verhalten des Fluggeräts in der Rolle definieren. Beispielsweise können zwei UAVs gemeinsam ein Gebiet überwachen und durch ihre individuellen Rollen das Gebiet aufteilen, um die Effizienz der Überwachung zu erhöhen. Die dafür verwendeten Algorithmen – z.B. die Polynomdekomposition nach [Maza und Ollero 2007] – verwenden die ermittelten Rollen als Eingabedaten und liefern die Vorgaben für das konkrete Verhalten.

Damit ist der intelligente Einsatz von spezialisierten Algorithmen in einem allgemeinen, wissensbasierten Framework ein wesentlicher Aspekt der kooperativen Bearbeitung gemeinsamer Auftrags-elemente.

Abschnitt 4.4 präsentiert die Umsetzung von rollenbasierter Kooperation in einem wissensbasierten Agenten. Abschnitt 4.6.2.9 stellt das dafür notwendige Wissen dar und zeigt am Beispiel der gemeinsamen Aufklärung einer Flugroute durch mehrere unbemannte Fluggeräte, wie sich diese die Rollen „fliege links versetzt zur Route“ und „fliege rechts versetzt zur Route“ aushandeln, um die Sensorabdeckung zu erhöhen.

4 Design und Implementierung

Im Folgenden werden der Entwurf und die Umsetzung einer UAV-Automatisierung, welche auftragsbasiertes Handeln ermöglicht, beschrieben. Wie in den Kapiteln 2 und 3 dargelegt, handelt es sich bei dieser UAV-Automatisierung um ein ziele- und wissensbasiertes System, dessen Wissensverarbeitungsprozess an Modellen menschlicher Wissensverarbeitung orientiert ist.

Als Beispielanwendung wird wie eingangs erläutert eine kooperative Mission herangezogen, welche den „luftgestützten Einsätzen“ der Heeresfliegertruppe der Bundeswehr entspricht.

4.1 Kognitiver Prozess

Um die in Kapitel 2.3 dargelegten Anforderungen und die Konzepte der Führung von Menschen in ein technisches System zu überführen, ist zunächst ein Verständnis von Modellen menschlicher Informationsverarbeitung notwendig.

Dies soll im nächsten Schritt in ein Modell künstlicher Kognition überführt und durch das Einbringen von Wissen und Fähigkeiten in einem Prototypensystem implementiert werden.

4.1.1 Modelle menschlicher Kognition

Es existieren mehrere Modelle der Mechanismen menschlicher Kognition, deren Ziel ist, menschliche Wahrnehmung und Wissensverarbeitung nachzubilden. Ausgehend von der Struktur des menschlichen Gehirns wird im *Konnektionismus* versucht dessen Funktionsweise anhand der hohen Anzahl von Neuronen und deren Vernetzungsgrad abgebildet [Onken und Schulte 2010]. Die Verwendung dieser Modelle als Vorlage für Implementierungen führt zu *künstlichen neuronalen Netzen (KNN)*, welche die Funktion einzelner Neuronen innerhalb einer meist statischen Topologie abbilden. In einem einzelnen Neuron wird dabei die Summe der gewichteten Eingänge gebildet und als Parameter einer Aktivierungsfunktion übergeben. Diese Funktion liefert die Aktivierung des Neurons, welche über gewichtete Kanten an andere Neuronen übergeben oder als Ergebnis des neuronalen Netzes verwendet wird [Russell und Norvig 2010]. Durch Lernen – hier finden sowohl überwachte als auch nicht überwachte Verfahren Anwendung – werden die Kantengewichte aktualisiert. Trotz des erfolgreichen Einsatzes in den Bereichen der Mustererkennung und -assoziation können mit KNNs nicht alle Bereiche der künstlichen Intelligenz abgedeckt werden [Boden 2008].

Im Unterschied zu KNNs werden im *Symbolismus* Modelle menschlicher Kognition in der Annahme erstellt, dass menschliche Intelligenz hauptsächlich auf der Speicherung und Verarbeitung von diskreten Symbolen beruht. In [Newell und Simon 1976] wird die Hypothese formuliert, dass sich mit diesen Modellen menschliche Intelligenz ausreichend nachbilden lasse:

“A physical symbol system has the necessary and sufficient means for general intelligent action.” [Newell und Simon 1976]

Putzer schränkt jedoch in [Putzer 2004] ein, dass diese Aussage eher qualitativ zu betrachten sei „und zur Erzeugung kognitiven Verhaltens eine gewisse Größe bzw. Komplexität nötig ist“ [Putzer 2004].

Zur Vereinigung von Konnektionismus und Symbolismus in ein Modell menschlicher Kognition, das sowohl die Interaktion mit einer analogen, nichtsymbolischen Umwelt als auch die Fähigkeit des Menschen, in abstrakten Symbolen zu denken und Probleme zu lösen, abbildet, muss die Generierung von Symbolen und ihre Auswirkung auf die nichtsymbolische Informationsverarbeitung betrachtet werden.

Jens Rasmussen stellt dazu in [Rasmussen 1983] ein Modell menschlichen Verhaltens vor, bei welchem die Informationsverarbeitung auf drei Ebenen erfolgt (siehe Abbildung 4-1).

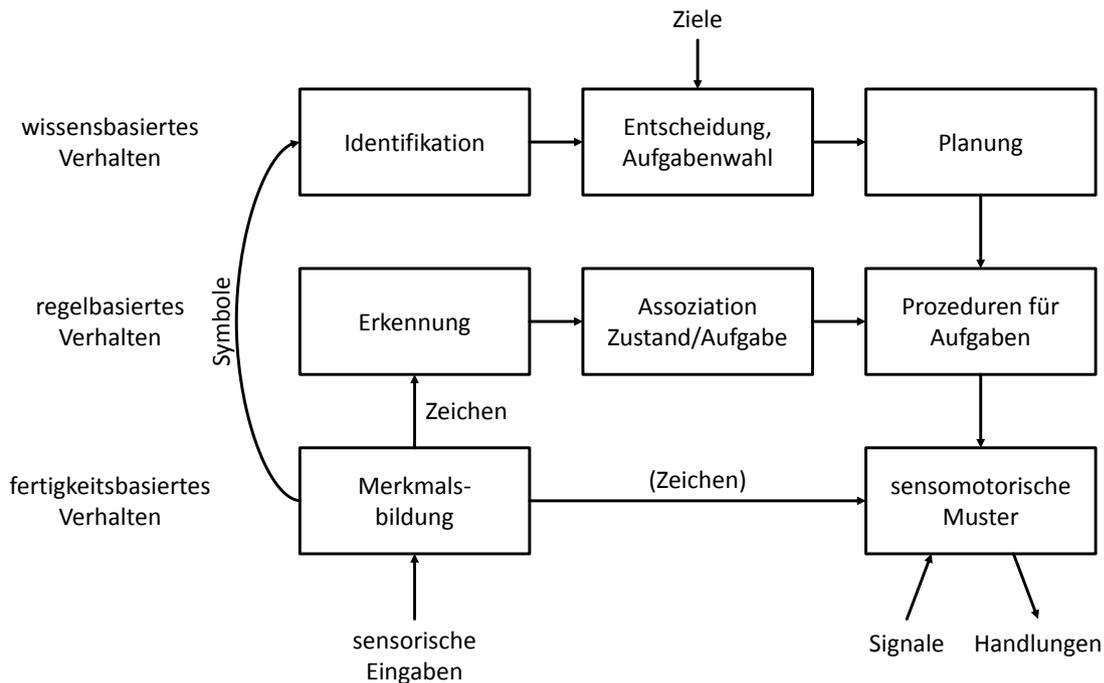


Abbildung 4-1: Menschliche Informationsverarbeitung nach Rasmussen [Rasmussen 1983]

Auf der Ebene des *fertigkeitsbasierten Verhaltens* werden *Signale* der Umwelt anhand *sensomotorischer Muster* direkt in *Handlungen* umgesetzt, welche auf die Umwelt zurückwirken. Es finden auf dieser Ebene keine Auswahl und Zielsetzung in Bezug auf die durchgeführten Handlungen statt. Auf dieser Verhaltensebene zeigt der Mensch die höchste Performanz (Frequenz der Handlungen). Ein Beispiel für Verhalten auf dieser Ebene ist das Folgen eines kurvenreichen Straßenverlaufs durch einen Autofahrer. Die Lenkbewegungen erfolgen unterbewusst als Reaktion auf Signale wie z.B. den Abstand zum Straßenrand.

Für Verhalten auf der regelbasierten Ebene werden sensorische Eingaben zuerst in Zeichen umgewandelt, welche dann erkannt werden. Im Beispiel des Autofahrers würde erkannt werden, dass die Bremslichter des vorausfahrenden Fahrzeugs aufleuchten. Anhand dieser Erkennung wird eine Assoziation zu einem Zustand bzw. einer in dem Zustand durchzuführenden Aufgabe getroffen. Zu dieser Aufgabe wird eine Prozedur abgerufen und mittels der passenden sensomotorischen Muster durchgeführt. Bei dem aufleuchtenden Bremslicht würde also beispielsweise assoziiert, dass das eigene Fahrzeug ebenfalls gebremst werden soll (Aufgabe) und das Bremspedal betätigt (Prozedur und sensomotorische Muster). Es findet dabei auf dieser Verhaltensebene

keine Prüfung statt, ob das Gesamtverhalten einem verfolgten Ziel dient. Im Beispiel würde also auch dann gebremst werden, wenn keine Kollisionsgefahr besteht, da das vorausfahrende Fahrzeug deutlich schneller als das eigene ist und auch nur geringfügig verzögert. Die Prozeduren werden nach [Rasmussen 1983] empirisch aus vorhergehenden, ähnlichen Situationen gewonnen, in denen sie erfolgreich waren, bzw. zwischen Menschen kommuniziert (im Beispiel: Fahrlehrer und Fahrschüler).

Auf der wissensbasierten Ebene werden durch die Merkmalsbildung Symbole aus den Sinneswahrnehmungen generiert und im Rahmen der Identifikation in einen passenden Kontext gebracht [Onken und Schulte 2010]. Anhand dieses Situationskontextes und der zu verfolgenden Ziele wird entschieden, welches Ziel aktuell zu verfolgen ist und in der Planung bestimmt, wie dieses erreicht werden kann. Danach werden die zugehörigen Prozeduren abgerufen und ausgeführt. Diese Verhaltensebene findet vor allem in unbekanntem Situationen Anwendung, wenn auf der regelbasierten Ebene keine Assoziation getroffen werden kann. Ein Beispiel aus [Onken und Schulte 2010] soll dies verdeutlichen: Hat der Autofahrer kein Wissen über die Reaktion auf die aufleuchtende Motorwarnleuchte, so muss er dieses Symbol in einen Kontext bringen: Eine rote Leuchte steht für eine Gefahr oder eine ernste Störung, das dargestellte Symbol weist auf den Motor hin. Aus den Zielen „Zielort der Fahrt erreichen“ und „Schaden am Fahrzeug begrenzen“ wird dann ausgewählt und für die getroffene Wahl ein Plan zum Erreichen des Ziels erstellt und mittels bekannter Prozeduren ausgeführt. Wissensbasiertes Verhalten ist im Vergleich zum fertigkeitbasierten und regelbasierten am langsamsten und am wenigsten durch den Menschen parallelisierbar.

Wie Rasmussen anmerkt, sind die Grenzen zwischen fertigkeit- und regelbasierter Ebene fließend [Rasmussen 1983]. Auch nach individuellem Trainings- und Wissensstand können verschiedene Individuen auf dieselbe Situation mit fertigkeit-, regelbasiertem oder wissensbasiertem Verhalten reagieren. Verfügt also ein Autofahrer über die Assoziation „bei aufleuchtender Motorwarnleuchte ist die Fahrt sofort zu unterbrechen“, so kann er auf die obige Situation auch mit regelbasiertem Verhalten reagieren.

In Anlehnung an das Rasmussen-Schema werden in einem künstlich kognitiven Prozess die einzelnen Verarbeitungsschritte in einem kontinuierlichen Wissenstransformationsprozess dargestellt. [Putzer 2004] definiert den daraus resultierenden, in Abbildung 4-2 dargestellten Prozess als „*Schema für Denkprozesse*“. Die ineinander geschachtelten Ovale bilden den Rumpf des kognitiven Prozesses. Das innere, dunkelgraue stellt das statische a-priori-Wissen dar, welches bei der Systementwicklung definiert wird.

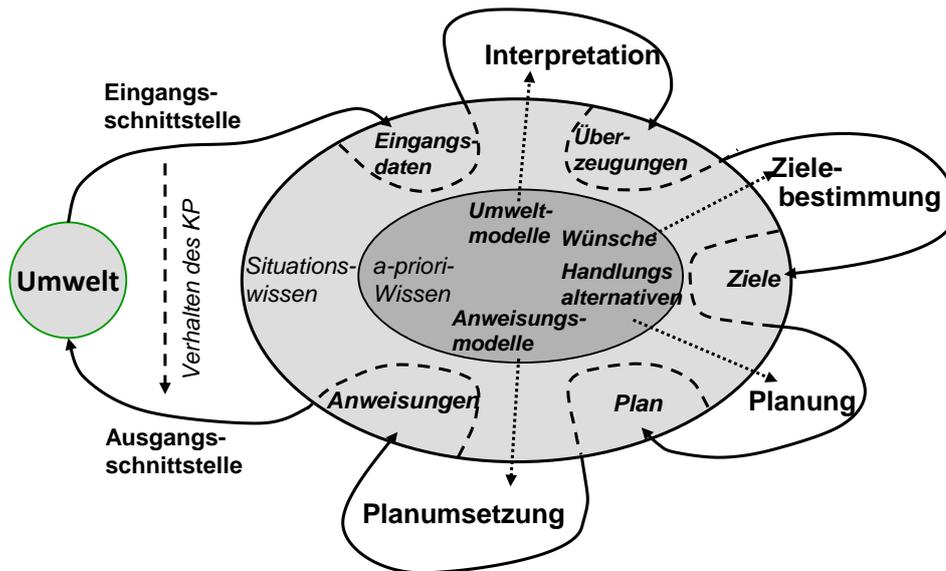


Abbildung 4-2: Kognitiver Prozess nach [Putzer 2004]

Im äußeren Oval ist das Situationswissen des kognitiven Prozesses dargestellt. Aus den Modellen des a-priori-Wissens wird dieses „Situationswissen [...] zur Laufzeit erzeugt und modifiziert“ [Putzer 2004]. Die Umwandlung und Erzeugung situativen Wissens erfolgt durch Eingangsschnittstelle, Ausgangsschnittstelle und die Transformatoren (1) Interpretation, (2) Zielebestimmung, (3) Planung und (4) Planumsetzung. Das Verhalten der Transformatoren ist durch die im a-priori-Wissen hinterlegten Produktionen festgelegt. Diese lesen kontinuierlich und parallel das gesamte Situationswissen und schreiben per Konvention exklusiv in dem ihnen zugeordneten Bereich des Situationswissens.

4.1.2 Sichtweisen des kognitiven Prozesses

Nach [Putzer 2004] kann der kognitive Prozess auf zwei Arten betrachtet werden:

In der *vertikalen Sicht*, die oben in Abbildung 4-2 dargestellt ist, wird das statische und dynamische Wissen in seine Stereotypen unterteilt. Die Transformatoren verwenden Elemente aus beiden Wissensarten, um neues dynamisches Wissen zu generieren. Dabei kann ein Transformator immer nur Wissen eines bestimmten Stereotyps generieren, z.B. werden bei der Interpretation der Eingangsdaten exklusiv Überzeugungen erstellt.

Da alle Transformatoren quasi parallel arbeiten, werden kontinuierlich Daten der Eingangsschnittstelle gelesen, interpretiert, Ziele bestimmt, Pläne selektiert und in Anweisungen umgewandelt, die an der Ausgangsschnittstelle ausgegeben werden. Durch diese Abarbeitung kann stets auf Änderungen der Umwelt reagiert werden und nach [Hanks et al. 1993] weisen Agenten mit dieser Eigenschaft eine höhere Performanz im Hinblick auf die durchzuführende Aufgabe auf als Agenten mit serieller Abarbeitung solcher Schritte.

Der in der vertikalen Betrachtungsweise genutzte Stereotyp „Ziel“ ist das verhaltensbestimmende Moment des kognitiven Prozesses (vgl. Abschnitt 3.5). Wünsche werden anhand des gesamten verfügbaren Wissens zu Zielen aktiviert und alle folgenden Verarbeitungsschritte des kognitiven Prozesses dienen der Erfüllung dieser Ziele. Die explizite Formulierung von Zielen bis in die Implementierungsebene ermöglicht allen Verarbeitungsschritten, das Wissen um aktive Ziele zu nutzen und ihre Aktivierung und Umsetzung zu prüfen:

“[...] the representation of goals is a necessary precondition when one wants reasoning about goals to become possible. Therefore, we claim that the usage of explicit goals should be extended from analysis- and design- to the implementation-level.” [Braubach et al. 2005]

Nach [Braubach et al. 2005] werden Ziele unterschieden anhand der (1) Erreichung eines bestimmten Zustands, (2) Aufrechterhaltung eines Zustands, der (3) Beendigung, (4) Vermeidung eines Zustands oder der (5) Optimierung einer Zielfunktion. Zur Wartung der Wissensbasis definieren [Braubach et al. 2005] ferner Ziele, die das (6) Vorhandensein einer Information prüfen oder die (7) Information anfragen. Braubach et al. nennen des Weiteren Ziele, die den (8) Erfolg eigener Handlungen bewerten und die nur aktiv sind, solange ein (9) bestimmter Zustand vorhanden ist.

Anhand dieser Taxonomie können die in der Wissensoperationalisierung (siehe Abschnitt 3.5) gefundenen Zielsetzungen eingeteilt werden. Je nach Kategorie ist für die Ziele ein eigener Lebenszyklus vorzusehen. Ein Framework, in dem die Ziele modelliert und implementiert werden, sollte in der Lage sein, alle Zieltypen abzubilden. Erlaubt das Framework die Negation von Bedingungen und die Definition beliebiger Lebenszyklen, so können die von [Braubach et al. 2005] angeführten Zieltypen ineinander und insbesondere in den Typ 1 (Erreichung eines Zustands) überführt werden.

Für die Umsetzung der auftragsbasierten Führung wurde dabei folgende Vorgehensweise genutzt, um alle diese Zieltypen abbilden zu können:

- Für Ziele von Typ 2 (Aufrechterhaltung des Zustands) kann ein äquivalentes Ziel modelliert werden, das diesen Zustand erreichen will und bereits aktiviert wird, wenn dieser *Gefahr läuft, verlassen zu werden*. Dies entspricht einer Verletzung der *“maintain condition”* nach [Braubach et al. 2005].
- Für Ziele von Typ 3 (Beendigung eines Zustands) wird ein negiertes Ziel von Typ 1 definiert.
- Für die Vermeidung eines Zustands S (Typ 4) wird ein Ziel definiert, das einen Zustand S' erreichen will, in dem nicht die Gefahr besteht, dass unmittelbar der Zustand S eintreten kann. So wird z.B. aus dem Ziel „Vermeide Unterschreitung des Sicherheitsabstands zu Flugabwehrstellungen“ das äquivalente Ziel „Erreiche einen Zustand, in dem der Sicherheitsabstand gewahrt ist“, wobei der Sicherheitsabstand größer gewählt wird, um auch die Gefahr einer Unterschreitung auszuschließen.
- Die Optimierung einer Zielfunktion (Typ 5) wird nicht durch explizite Ziele modelliert, sondern ist in spezielle Algorithmen ausgelagert, die von den Handlungsanweisungen des kognitiven Prozesses genutzt werden können.
- Da das Wissen im kognitiven Prozess für alle Transformatoren zur Verfügung steht, ist für die Prüfung auf Wissen (Typ 6) kein explizites Ziel zu modellieren.
- Die Anfrage nach Information (Typ 7) wird als zu erreichender Zustand modelliert, in dem diese Information vorhanden ist. Das Ziel wird nicht aktiv, wenn die Information bereits vorhanden ist.
- Die Überwachung der Ausführung einer Handlungsalternative (Typ 8) wird als Verantwortlichkeit der Anweisungsmodelle modelliert. Wissen zur Auswahl einer Handlungsalternative, also der Eignung einer Handlungsalternative, wird in den Handlungsalternativen selbst hinterlegt.
- Ziele von Typ 9 (Zielaktivierung, solange ein gewünschter Zustand erreicht ist), werden nicht modelliert. Sie dienen nicht der Modellierung von Zielen aus der

Wissensoperationalisierung, sondern als technische Vorbedingung für Handlungen: “[...] the preserve construct is merely called a goal. In fact, it represents just a guarded action.” [Braubach et al. 2005]

Durch diese Designregeln lassen sich alle von [Braubach et al. 2005] angeführten, verhaltensbestimmenden Zieltypen auf das allgemeine Basismodell eines Ziels zurückführen, welches im kognitiven Prozess Anwendung findet.

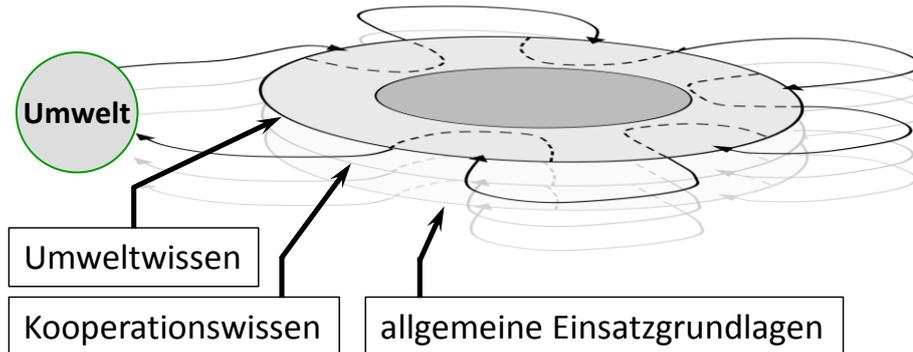


Abbildung 4-3: Horizontale Sicht auf den Kognitiven Prozess

Die *horizontale Sicht* (siehe Abbildung 4-3) entsteht durch die Unterteilung der einzelnen Wissensbereiche in ihre Teildomänen, welche auch Schichten des kognitiven Prozesses genannt werden. Nach Putzer [Putzer 2004] sind in allen Schichten alle Transformatoren vertreten. Je nach Teildomäne kann aber auch nur eine Untermenge der Transformatoren genutzt werden. So nutzt das in Abschnitt 4.6.2.3 dargestellte Umweltwissen hauptsächlich Transformatoren zur Situationsinterpretation.

Die Schichten des kognitiven Prozesses, die für die auftragsbasierte Führung identifiziert werden konnten, sind durch die in Abschnitt 4.6.2 im Detail beschriebenen Wissenspakete „Umweltwissen“, „Supervisory Control“, „Missionswissen“, „Kooperationswissen“, „Einhalten allgemeiner Einsatzgrundlagen“, „Einreihen neuer Auftrags Elemente“ und „Wissen für rollenbasiertes Verhalten“ repräsentiert. Drei dieser Schichten sind in Abbildung 4-3 exemplarisch dargestellt. Im Gegensatz zu der von Putzer angedeuteten Darstellungsweise kann jede Schicht auf die Umweltschnittstellen zugreifen.

Ein Transformator kann grundsätzlich aus allen Schichten lesen, jedoch nur Wissens Elemente seiner eigenen Schicht generieren. Im statischen Wissen können ferner Vorrangregeln definiert sein, welche die Ziele verschiedener Schichten pauschal zueinander priorisieren.

Die Einteilung des Wissens in Teildomänen bietet die Möglichkeit, die Umsetzung des wissensbasierten Systems zu strukturieren, Wissenspakete wiederzuverwenden und mit mehreren Entwicklern parallel an der Systementwicklung zu arbeiten.

4.2 Künstlich Kognitive Einheiten

Wie in Abschnitt 3.4 dargelegt, ist es das Ziel dieser Arbeit, dass UAV-Automation wissensbasiert und zielgetrieben unter Verwendung symbolischer, semantischer Informationen mit ihrer Umwelt interagiert. Damit handelt es sich nach [Russell und

Norvig 2010] um einen modell- und zielebasierten Agenten. Dieser implementiert den in Abschnitt 4.1 vorgestellten, kognitiven Prozess. Er muss dazu Schlussfolgerungen ziehen (Reasoning) und zwar auf einer für den menschlichen Bediener nachvollziehbaren Semantik. Für die Entwicklung derartiger Systeme werden *kognitive Architekturen* [Russell und Norvig 2010] als zugrundeliegende Frameworks verwendet. Bekannte Vertreter solcher Architekturen sind ACT-R (Adaptive Control of Thought-Rational) [ACT-R Research Group 2011] und Soar [Laird et al. 1986].

ACT-R dient dabei in erster Linie der Simulation und damit der Verifikation eines modulbasierten Modells menschlicher Kognition [Anderson et al. 2004]. Soar legt den Schwerpunkt auf die Modellierung von rationalen, kognitiven Verhalten per se ohne die Vorgabe, auch menschliche Einschränkungen abbilden zu müssen:

„[...] our intention is for Soar to support all the capabilities required of a general intelligent agent“ [Soar group 2011]

Trotz der ursprünglich unterschiedlichen Zielsetzung der Architekturen, sind beide für die Umsetzung von intelligenten Agenten geeignet und verwendet worden [Laird et al. 1998; ACT-R Research Group 2011]. [Russo et al. 2006] betrachtet ausführlich beide Architekturen bezüglich der Verwendung und Optimierung für die Pfadplanung mehrerer UAVs.

Basierend auf Soar wurde an der Universität der Bundeswehr München die COSA (Cognitive System Architecture) entwickelt [Putzer 2004]. Diese setzt den in Abschnitt 4.1 beschriebenen kognitiven Prozess systemisch in einem Softwareframework um. Ferner erweitert sie Soar um die Möglichkeit, die aus der Wissensakquise abgeleiteten Wissensmodelle als statisches Wissen des kognitiven Prozesses in Klassen einschließlich Vererbungsbeziehungen und der Nutzung von vererbten Attributen [Cardelli und Wegner 1985] zu formulieren.

Basierend auf COSA wurde im Rahmen dieser Arbeit eine künstliche, kognitive Einheit (engl.: ACU – Artificial Cognitive Unit) zur UAV-Automatisierung entwickelt, die an Bord des unbemannten Fluggeräts (vgl. Abschnitt 2.5.3) Aufträge entgegennehmen und zielgerichtet umsetzen kann.

4.3 Adaptierbare Automation

Für die Realisierung einer Automation, die durch den Bediener angepasst werden kann, soll der Fokus auf einer variablen Stringenz nach Abschnitt 3.6.5 liegen. Um die dort beschriebenen Mechanismen umzusetzen, sind in der ACU Funktionalität vorzusehen, welche die Aufträge des Bedieners interpretieren kann.

Diese Interpretation eines Auftrags hat einen horizontalen und vertikalen Aspekt⁴. Der *vertikale Aspekt* beschreibt die Dekomposition. Durch diese wird ein Auftrag in einzelne Aufgaben zerlegt, die einzelnen Aufgaben wiederum werden konkretisiert bis sie sich auf einzelne Handlungen abbilden lassen. Johannsen beschreibt diese Dekomposition als Hierarchie von „*arbeitspsychologischen Begriffsebenen*“ [Johannsen 1993], die einen Prozess in Teilprozesse, Betriebssituationen, Funktionen, Aufträge, Aufgaben, Handlungen und Tätigkeiten unterteilt. Da die Führung der unbemannten Fluggeräte auf Auftragsebene erfolgen soll, ist die weitere Dekomposition

⁴ Diese Betrachtung des vertikalen und horizontalen Aspekts der Auftragsinterpretation ist unabhängig von der in Abschnitt 4.1.2 beschriebenen horizontalen und vertikalen Betrachtung des kognitiven Prozesses.

eines Auftrages in der Verantwortlichkeit der ACU. Diese verwendet dafür den Means-Ends-Algorithmus [Simon 1996], bei dem die Erfüllung der übertragenen Aufträge als Wunsch modelliert ist. Die Handlungsalternativen (Means) beinhalten dabei die möglichen Verwendungen zur Erreichung der Ziele (Ends).

Der *horizontale Aspekt* beschreibt die Sicherstellung einer konsistenten Liste von Auftrags-elementen nach den Prinzipien der bei der Wissenserhebung gewonnenen, allgemeinen Einsatzgrundsätze. Um die Einhaltung dieser Einsatzgrundsätze sicherzustellen, wird diese als Wunsch modelliert. Sind Einsatzgrundsätze verletzt, so wird dieser Wunsch zu einem aktiven Ziel und entsprechende Handlungsalternativen bewirken eine Wiederherstellung eines mit den Einsatzgrundsätzen konformen Plans des UAVs.

Die Operating Force des Arbeitssystems ist über das aktuelle Vorhaben und die künftigen Pläne des UAVs zeitnah zu informieren. Diese Forderung ist als Wunsch in der ACU des UAVs hinterlegt. Sie bewirkt, dass als relevant modelliertes Wissen an den Operateur übertragen wird, nachdem es generiert, modifiziert oder entfernt wurde.

In Kombination bewirken die Wünsche des UAVs nach Dekomposition, Sicherstellung der Einsatzgrundsätze und Information des Operateurs ein Verständnis des übertragenen Auftrags mit entsprechendem Feedback an den Operateur über die durch das UAV beabsichtigte Durchführung des Auftrags. Da nicht nur der ursprünglich vergebene Auftrag kommuniziert wird, sondern auch alle Maßnahmen, die das Einhalten der Einsatzgrundsätze sicherstellen, kann sich der Operateur auf diese Maßnahmen beziehen, sie modifizieren, ersetzen oder löschen. Ferner kann sich der Operateur entweder auf die Fähigkeit des UAVs zur Komplettierung der Auftrags-elemente verlassen oder einzelne, feingranulare Aufträge vergeben. Dadurch wird die in Abschnitt 3.6.5 geforderte variable Stringenz erreicht.

Die Wissensmodelle, deren Zusammenspiel die variable Stringenz ermöglichen, sind in Abschnitt 4.6.2 im Einzelnen beschrieben.

4.4 Rollenbasierte Kooperation

Die Kooperation mehrerer UAVs bei der Erfüllung eines gemeinsamen Auftrags bzw. bei der Arbeit an einem gemeinsamen Auftrags-element erfolgt – wie in Abschnitt 3.7 angeführt – anhand individueller Rollen bei der Bearbeitung des gemeinsamen Auftrags-elementes.

Die Erkennung einer möglichen Synergie bei der Zusammenarbeit mehrerer UAVs kann als ein Spezialfall einer *Erkennung einer günstigen Gelegenheit* betrachtet werden. Insofern ist die Kooperation mehrerer, an denselben Auftrags-elementen arbeitender UAVs ein *Handlungsziel* der künstlich kognitiven Einheiten.

Um die sozialwissenschaftliche Definition einer Rolle (vgl. [Herrmann et al. 2003] und Abschnitt 3.7) in einen technischen Entwurf zu überführen, wird der Rollenbegriff für kooperative Softwareagenten nach [González et al. 2011] genutzt:

“[...] each agent in a micro-society assumes one of the required cooperative roles.” [González et al. 2011]

González et al. betrachten dabei die Rolle als Mittel der Aufgabendekomposition auf niedriger Abstraktionsebene („micro-society“), durch die ein individueller Verantwortungsbereich pro Agent definiert wird. Veranschaulicht wird dies in [González et al. 2011] anhand der Rollen im (Roboter-)Fußball:

“The goalkeeper robot has a well-defined role. The three other robots have dynamic roles: a robot with the active role (related with a direct action on the ball), other has the strategic role (supports the defense) and the last one has the role of support (support to the defense or pass receiver).” [González et al. 2011]

Obwohl auch in der auftragsbasierten UAV-Führung Rollen angewendet werden, so dienen sie der Koordination *innerhalb* eines Auftragslements. Die Aufgabendekomposition selbst wird nicht beeinflusst.

Für alle Arten von Auftragslementen und jeder möglicher Anzahl von UAVs, die ein solches Element gemeinsam bearbeiten können, wird dazu eine *Rollenkonfiguration* definiert. Sie enthält alle notwendigen und optionalen Rollen, die die Akteure bei der Bearbeitung des Auftragslements einnehmen können.

Folgende Eigenschaften sind durch die ACU bei der Rollenverteilung vorzusehen:

1. Es muss allen UAVs bekannt sein, ob sie gemeinsam ein Auftragslement bearbeiten oder bearbeiten werden.
2. Die Rollenkonfiguration, die zur gemeinsamen Aufgabe, deren Art und Anzahl der beteiligten UAVs passt, muss bekannt sein.
3. Wird ein UAV vom gemeinsamen Auftragslement abgezogen wird oder ein weiteres hinzugezogen wird, so ist die Rollenkonfiguration entsprechend anzupassen.
4. Jedes UAV muss pro Auftragslement eine *individuelle, eindeutige* Rolle der dafür gültigen Rollenkonfiguration einnehmen.
5. Bei der Durchführung und Handlungsplanung ist die individuelle Rolle zu berücksichtigen.

Um die erste Eigenschaft zu erfüllen, müssen sich alle UAVs gegenseitig über den jeweils aktuellen Status der Rollenzuweisung informieren. In Abschnitt 4.6.2.6 wird dafür ein entsprechender Wunsch definiert und erläutert.

Für die zweite Eigenschaft sind in der ACU Wissensmodelle über Rollenkonfigurationen definiert. Diese werden in Abschnitt 4.6.2.9 in ihrem statischen und dynamischen Verhalten im Detail erläutert.

Die dritte Eigenschaft wird durch das Truth-Maintenance-Eigenschaft (siehe auch Abschnitt 4.6.1) des kognitiven Prozesses sichergestellt, d.h. eine Rollenkonfiguration und die darauf basierenden Rollenzuweisungen werden automatisch durch das Laufzeitsystem entfernt, wenn die dafür nötigen Grundannahmen – wie z.B. die Anzahl der beteiligten UAVs – nicht mehr zutreffen.

Im speziellen Wissenspaket für die Rollenzuweisung (Abschnitt 4.6.1) werden die in (4) geforderten Eigenschaften als explizite Wünsche modelliert.

Das Missionswissen (Abschnitt 4.6.2.5) berücksichtigt die ausgehandelte Rolle (Eigenschaft 5).

4.5 Günstige Gelegenheiten

Neben der Gelegenheit zur Kooperation (vgl. Abschnitt 4.4) können weitere günstige Gelegenheiten durch ein UAV erkannt und genutzt werden. Folgende Charakteristika und Voraussetzungen kennzeichnen eine günstige Gelegenheit:

1. Die Nutzung der Gelegenheit steht nicht im Widerspruch zur Durchführung des aktuellen Auftrags. Diese Voraussetzung schließt eine negative Beeinflussung des Auftrags durch zeitliche Verzögerungen ein.
2. Für die Nutzung wird keine Ressource benötigt, die aktuell bzw. zum Zeitpunkt der Nutzung anderweitig allokiert ist.
3. Günstige Gelegenheiten sind nicht Bestandteil eines von der Operating Force delegierten Auftrags.
4. Die Nutzung der Gelegenheit bietet einen Gewinn im Hinblick auf die übergeordnete Mission der Operating Force.

Mit der ersten Voraussetzung wird sichergestellt, dass der menschliche Bediener die oberste Entscheidungsinstanz bleibt (vgl. Abschnitt 3.4) und die von ihm delegierten Aufträge ohne Einschränkung durchgeführt werden.

Die zweite Voraussetzung definiert, dass eine Gelegenheit nur dann als solche erkannt wird, wenn die Mittel sie zu nutzen auch vorhanden sind.

Das dritte Charakteristikum fordert, dass ein UAV *proaktiv* günstige Gelegenheiten erkennt und kontinuierlich die wahrgenommene Umwelt auf günstige Gelegenheiten prüft. Dazu muss Planungs- und Durchführungswissen vorhanden sein, um auch abseits der erteilten Aufträge Handlungen durchzuführen, die die günstige Gelegenheit nutzen. Das dazu nötige Maß an Autorität liegt demnach in dem Bereich von 2 bis 10 nach der Skala von [Parasuraman et al. 2000] (vgl. auch Abschnitt 3.6.2). Da für die Nutzung von günstigen Gelegenheiten in der Informationsgewinnung ein enges Zeitfenster angenommen werden kann, soll das UAV die Autorität erhalten, Gelegenheiten instantan zu nutzen. Dadurch verbleiben die Automationsgrade 7 bis 10. Da der menschliche Operateur über eine genutzte Gelegenheit informiert werden muss, kann schließlich eine Umsetzung ausschließlich mit Automationsgrad 7 der Skala von [Parasuraman et al. 2000] erfolgen.

Im Zusammenhang mit der vierten Voraussetzung ergibt sich die Notwendigkeit nach der Einschätzung einer günstigen Gelegenheit für die Nützlichkeit hinsichtlich der übergeordneten Zielsetzung. Diese kennt jedoch das per Supervisory Control geführte UAV per Definition nicht (vgl. Abschnitt 2.5.3). Um ohne Kenntnis des übergeordneten Arbeitsziels dennoch zu dessen Erreichung eigeninitiativ beitragen zu können, muss zumindest für die Nutzung von Gelegenheiten notwendiges Wissen des übergeordneten Auftrags auf die ACU übertragen werden. Dies kann in der Form allgemeiner Heuristiken erfolgen.

Eine für die Detektion günstiger Gelegenheiten in der Umsetzung des Forschungsprototypen genutzte Heuristik ist die Annahme, dass Informationsgewinnung über Bodenkräfte, die als „unbekannt“ eingestuft sind, immer im Sinne der übergeordneten Zielsetzung sind. Dies gilt nur unter der Voraussetzung, dass die genannten vier Grundcharakteristika zutreffen.

Das für die Erkennung und Nutzung notwendige Wissen ist Teil des Missionswissenspakets und wird in Abschnitt 4.6.2.5 ab Seite 88 im Detail beschrieben.

4.6 Wissensrepräsentation und -struktur

Das statische Wissen der kognitiven Einheit wird in dem verwendeten Framework COSA in der Sprache CPL (engl.: Cognitive Programming Language) formuliert [Putzer 2004; Meitinger 2008; Jarasch et al. 2010; Kriegel 2011]. Diese Codierung erlaubt die direkte Repräsentation von Wissen und Verhalten in den semantischen Begriffen der Domäne. Listing 4-1 auf Seite 84 zeigt ein Wissensmodell in CPL.

4.6.1 Einordnung in den kognitiven Prozess

Die Einordnung des Wissens erfolgt als a-priori-Wissen in den in Abbildung 4-2 dargestellten kognitiven Prozess. Orientiert an der vertikalen Sicht auf den kognitiven Prozess (vgl. Abschnitt 4.1.2) wird das mit der KP-Methode operationalisierte Wissen (vgl. Abschnitt 3.5) in die Stereotypen Umweltmodell, Wunsch, Handlungsalternative und Anweisungsmodell unterteilt [Putzer 2004].

Umweltmodelle enthalten statisches Wissen für die Bildung von Überzeugungen aus dem situativen Wissen. Hervorzuheben ist dabei, dass die Umweltmodelle zwar in erster Linie zur Bildung von Überzeugungen die Eingangsdaten auswerten, jedoch auch weiteres situatives Wissen – insbesondere bereits existierende Überzeugungen – zur Bildung von Überzeugungen genutzt werden kann.

Dazu sind in den Umweltmodellen Produktionen hinterlegt, welche die Interpretation des situativen Wissens steuern.

Wünsche definieren Vorlagen für die durch das kognitive System zu erreichenden Ziele. Ihre Produktionen definieren, wie die Zielebestimmung aus dem aktuellen situativen Wissen erfolgt. Zur Zielebestimmung werden primär die Überzeugungen – also Instanzen von Umweltmodellen – als auch Pläne herangezogen. Die Nutzung weiteren Situationswissens ist möglich. Die direkte Verwendung von Eingangsdaten zur Zieleaktivierung ist jedoch unzweckmäßig und zu vermeiden, da dadurch die Interpretation der Daten von den Umweltmodellen auf die Wünsche verschoben würde und somit notwendiges situatives Wissen über die Interpretation der Daten nicht semantisch korrekt als Umweltmodell im situativen Wissen repräsentiert würde.

Die Aktivierung – also Instanziierung – eines Wunsches zu einem Ziel erfolgt grundsätzlich, wenn der Wunsch im situativen Wissen eine *Verletzung des Wunsches* feststellt. So wird beispielsweise der Wunsch nach einer konsistenten Aufgabenliste nur dann zu einem Ziel aktiviert, wenn die im Situationswissen vorhandenen Aufgaben Inkonsistenzen aufweisen.

Wünsche enthalten ebenfalls Wissen um zu erkennen, dass ein aktiviertes Ziel bereits erfüllt ist. Dieser Umstand wird entweder mit entsprechenden in CPL formulierten Produktionen abgeprüft oder nutzt die Truth-Maintenance-Eigenschaft von COSA [Matzner 2009]. Diese bewirkt, dass eine Zielaktivierung automatisch zurückgenommen wird, wenn sich die Fakten, die zur Zielaktivierung führten, als nicht oder nicht mehr wahr herausstellen. In diesen Fällen wird das Ziel deaktiviert und nicht weiter verfolgt. COSA erlaubt für einzelne Produktionen, die Truth-Maintenance-Eigenschaft zu deaktivieren („o-support“-Produktionen, vgl. [Laird et al. 2011]). Dadurch kann mit COSA ein Agent entwickelt werden, der auf Änderungen der Umwelt sowohl reaktiv und schnell reagieren als auch an einem aktivierten Ziel festhalten kann, was der Empfehlung von Hanks et al. entspricht: *“Rational agents sometimes should deliberate about, and commit to, plans, and*

other times, they should react more immediately to their environment.” [Hanks et al. 1993]

Weiteres wesentliches Element von Wünschen ist die Möglichkeit, Wissen zur Priorisierung zu hinterlegen. Diese Priorisierung kann statisch anhand des konkreten Typs des Ziels unterscheiden [Meitinger 2008] oder das gesamte vorhandene Situationswissen zur Unterscheidung nutzen, was bei der auftragsbasierten UAV-Führung zur Einhaltung der Einsatzgrundlagen verwendet wird (vgl. Abschnitt 4.6.2.9).

Wünsche bzw. Ziele als deren Instanzen werden unterschieden in *Fundamentalziele* und *Instrumentalziele*⁵. Ein Fundamentalziel ist ein Ziel, dessen Aktivierung weder mittelbar noch unmittelbar der Erreichung eines anderen Ziels dient. Ein Instrumentalziel dagegen wurde aktiviert, um einen Umweltzustand herzustellen, der die Erreichung eines anderen, fundamentaleren Ziels ermöglicht. Nach [Eisenführ und Weber 2003] ist die Unterteilung in Fundamental- und Instrumentalziel abhängig vom betrachteten Kontext: „*Ein Fundamentalziel ist immer nur in einem gegebenen Kontext fundamental.*“ [Eisenführ und Weber 2003] Ein Ziel, das in einem gegebenen Kontext fundamental ist, kann aus der Sicht eines übergeordneten Kontexts instrumental sein.

Was [Eisenführ und Weber 2003] mit Kontext bezeichnen, kann als Grenze der Autorität des Handelnden angesehen werden (vgl. Abschnitte 3.4 und 3.6). Die Befolgung eines durch den Menschen an ein UAV übertragenen Auftrags ist für das UAV *fundamental*, d.h. dem UAV wird nicht die Autorität zugestanden, den Auftrag zu ignorieren oder stattdessen einen anderen auszuführen. Für den Menschen hingegen ist die Erteilung des Auftrags ein *Instrument* zur Erfüllung seiner Mission, also seines Fundamentalziels.

Pläne entstehen, indem Handlungsalternativen basierend auf den aktuell aktiven Zielen ausgewählt werden. Bei diesem zweistufigen Prozess werden zunächst alle Handlungsalternativen, die für die Erfüllung der aktiven Ziele in der *aktuellen Situation potentiell möglich* sind zu Plänen instanziiert. Diese Pläne können Selektionswissen enthalten, das bestimmt, welche Handlungsalternativen präferiert werden. Die Erzeugung von Plänen kann die Aktivierung weiterer Wünsche nach sich ziehen, welche die Voraussetzungen für die Plandurchführung modellieren. Diese sind dann Instrumentalziele im obigen Sinn. Sind alle Präferenzen und Vorbedingungen bestimmt, so kann im zweiten Schritt der Planung aus den möglichen Plänen derjenige mit der höchsten Präferenz zur Ausführung selektiert werden.

Bei der Zuordnung von Plänen zu Zielen wird nach Means-Ends vorgegangen [Meitinger 2008; Simon 1996]. Zusätzlich können Umweltmodelle antizipierte Zustände modellieren, welche bei der Zuordnung ebenfalls berücksichtigt werden (vgl. Abschnitt 4.6.2.7).

Anweisungsmodelle repräsentieren statisches Wissen über die Durchführung von Plänen. Basierend auf dem aktuell zur Durchführung selektierten Plan werden diese Modelle zu Anweisungen instanziiert. Diese nutzen weiteres Situationswissen und schreiben Anweisungen für die subsymbolisch arbeitenden Ausführungsschichten (vgl. Abschnitt 4.7) auf die Ausgangsschnittstelle.

⁵ Die Begriffe „Fundamentalwunsch“ und „Instrumentalwunsch“ sind in der Literatur nicht geläufig, da meist nicht zwischen Wunsch und Ziel unterschieden wird.

Die Transformatoren im kognitiven Prozess bilden ein Truth-Maintenance-System (TMS) [Martins 1990; Matzner 2009]. Dieses stellt sicher, dass alle im Situationswissen befindlichen Fakten als wahr bezüglich der Eingangsdaten angenommen werden können. Diese Eigenschaft wird dadurch erreicht, dass alle Schlussfolgerungen, deren Voraussetzungen nicht mehr erfüllt sind, durch das Laufzeitsystem automatisch aus dem Situationswissen entfernt werden [Laird et al. 2011].

Ausnahmen von diesem Verhalten können in den Produktionen des statischen Wissens hinterlegt werden oder werden durch COSA selbst definiert. Folgende Abweichungen von der Truth-Maintenance-Eigenschaft existieren bei der auftragsbasierte UAV-Führung:

- Bildet ein Umweltmodell eine Überzeugung aus Eingangsdaten, die nur temporär an der Eingangsschnittstelle verfügbar sind, so gilt die Überzeugung auch dann noch, wenn die Eingangsdaten nicht mehr zur Verfügung stehen. Dies trifft insbesondere für Nachrichten des Operateurs und Aktualisierungen der taktischen Lage zu, da diese auch ohne kontinuierliche Wiederholung als relevant angesehen werden müssen.
- Jede Art von Hysterese steht im Widerspruch zum Truth-Maintenance-System, da je nach Abfolge der auslösenden Ereignisse verschiedene Schlussfolgerungen aus derselben Wissensbasis abgeleitet werden. Ein Beispiel für eine solche Hysterese ist im Ziel, mit den Sensoren des UAVs das Terrain aufzuklären. Dieses Ziel ist erfüllt, sobald die Sensoren des UAVs die entsprechende Konfiguration bestätigt haben. Wird die Sensorkonfiguration verändert, bleibt das Ziel jedoch solange erfüllt, bis sich entweder aus der lateralen Bewegung des UAVs oder durch die zeitliche Verzögerung die Gefahr einer Aufklärungslücke bildet.
- Alle aufgrund des aktuell auszuführenden Plans von Anweisungsmodellen durchgeführten Änderungen am Situationswissen sind persistent, folgen also nicht dem TMS-Schema. Anweisungen an der Ausgangsschnittstelle werden erst entfernt, wenn deren Abarbeitung durch die Ausgangsschnittstelle bestätigt wurde. Dieses Verhalten verhindert inkonsistente Anweisungen, welche entstehen können, falls eine Anweisung während ihrer Ausführung modifiziert wird.

4.6.2 Wissenspakete

Die in [Putzer 2004] vorgesehene Unterteilung in verschiedene Pakete erlaubt die Gliederung des a-priori Wissens anhand der darin abgebildeten Domänen bzw. Teildomänen. Dies entspricht der horizontalen Sicht des kognitiven Prozesses, wie in Abschnitt 4.1.2 beschrieben. Unabhängig von der Zugehörigkeit zu einzelnen Paketen ist für jede Wissensklasse weiterhin das gesamte Situationswissen verfügbar. [Kriegel 2011] erläutert, wie sich die Kluft zwischen generischem Wissen aus verschiedenen Domänen überwinden lässt um trotz der gewünschten losen Kopplung [Offutt et al. 1993] des Wissens der Domänen ein wissensbasiertes Gesamtsystem zu erstellen.

Im Rahmen dieser Arbeit wurde das statische Wissen der UAV-ACU in die nachfolgend beschriebenen Pakete gegliedert.

4.6.2.1 Metawissen zur Unterstützung polymorphen Verhaltens

Bei der Repräsentation von Wissen soll dieses möglichst redundanzfrei gehalten werden, um die Wartbarkeit der Wissensbasis zu erhöhen. Ein aus der objektorientierten Softwareentwicklung bekanntes Muster hierzu ist die Verwendung von Vererbungsbeziehungen, die gemeinsames Verhalten und Wissen in Basisklassen

zusammenfasst und zugleich Spezialisierungen erlaubt. Um eine performante Unterstützung von Vererbung und polymorphen Verhalten auch in einem auf Inferenz basierendem, wissensverarbeitendem System zu ermöglichen, soll in jeder Klassendefinition Attribute vorgehalten werden, welche die Liste der Basisklassen enthalten.

Das für die automatische Generierung dieser Attribute verwendete *Metawissen* im Sinne dieser Arbeit ist folglich Wissen, das keiner anwendungs-spezifischen Domäne der UAV-Führung zuzuordnen ist, sondern domänenunabhängig die Struktur anderer Wissenspakete analysiert um diese auszuwerten und anzureichern.

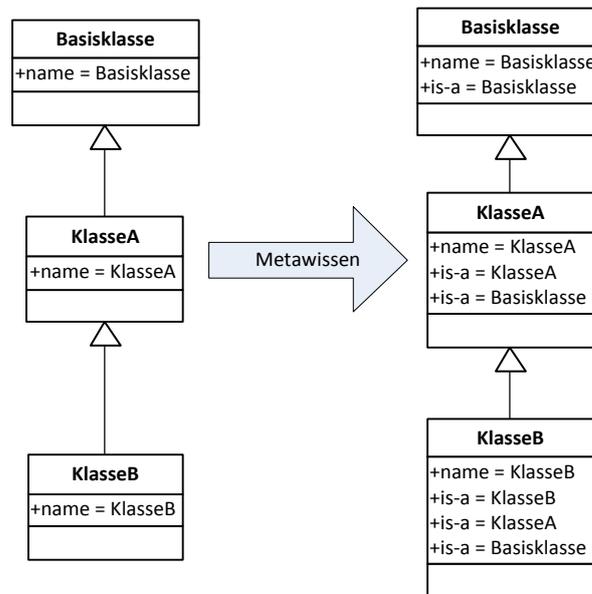


Abbildung 4-4: Transformation der Klassenstruktur durch Metawissen

Abbildung 4-4 zeigt die automatisch durch Metawissen zum Laufzeitbeginn durchgeführte Transformation der Klassenstruktur als Übergang zweier UML-Klassendiagramme [UML 2011]. Bei allen dargestellten Attributen handelt es sich um Klassenattribute, die der Reflection der Typinformation zur Laufzeit dienen, welche nach [Sullivan 2001] dazu dient, dass ein Programm auf seine eigene interne Struktur zugreifen und sie manipulieren kann, um damit sein eigenes Verhalten zu ändern.

Im Metawissen der UAV-ACU wird die Vererbungsbeziehung der Klassen analysiert, um das neue Attribut „is-a“ anzulegen, welches auf die Klasse und alle Basisklassen der Vererbungshierarchie verweist. Hierdurch kann Produktionen ermöglicht werden, anzugeben ob eine statische oder dynamische Typbindung zur Laufzeit verwendet werden soll:

```
(instance[belief::task::*] <t> ...)
```

Dieser Ausschnitt aus dem Bedingungsteil einer CPL-Produktion verwendet statische Typbindung, d.h. in dieser Zeile werden alle Instanzen von Umweltmodellen (belief) aus dem aktuellen Situationswissen betrachtet, welche exakt vom Typ `task` sind. Abgeleitete Klassen werden nicht betrachtet.

```
(instance[belief::*::*] <t> ^class.is-a task ...)
```

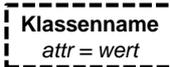
Dieser Abschnitt aus dem Bedingungsteil einer CPL-Produktion verwendet dynamische Typbindung unter Nutzung des durch das Metawissen erzeugten Typinformation `^class.is-a`. In diesem Codefragment werden alle Instanzen von Umweltmodellen (belief) aus dem aktuellen Situationswissen betrachtet, welche vom Typ `task` oder einer davon abgeleiteten Wissensklasse sind.

Durch die Verwendung der dynamischen Bindung wurde es möglich in COSA Verhalten zu definieren, das auf alle Unterklassen einer Klassenstruktur angewendet werden soll. Gemeinsames Verhalten – wie z.B. Gemeinsamkeiten aller Auftrags-elemente – kann so zentral und ohne Kenntnis der speziellen Ausprägungen formuliert werden.

Die Art des hier beschriebenen Metawissens ist nicht zu verwechseln mit Lernfähigkeit. Während Lernfähigkeit neue Wissens Elemente zur Laufzeit anhand situativen Wissens generiert, dient Metawissen der Analyse der statischen Wissensstruktur.

4.6.2.2 Darstellung von Situationswissen

Die im Rahmen dieser Arbeit verwendete Notation von situativem Wissen der ACU orientiert sich an [Kriegel 2011] und [Meitinger 2008].

- Rechtecke mit durchgezogenem Rand  repräsentieren Modelle des a-priori Wissens. Der Name des Wissensmodells ist fett gesetzt. Die Zugehörigkeit zur Modellart (vgl. Kapitel 4.6.1) wird durch den Namensraum in spitzen Klammern angegeben und ist farblich kodiert (gelb = Umweltmodell, blau = Wunsch, grün = Handlungsalternative, rot = Anweisungsmodell).
- Rechtecke mit gestricheltem Rand  repräsentieren Instanzen von Wissensmodellen. Optional ist fett gesetzt der Name des zugehörigen Wissensmodell enthalten. Attribute sind mit ihrem jeweiligen Wert kursiv dargestellt (*Attributname = Wert*).
- Durchgezogene Pfeile  stellen Verweise zwischen Instanzen dar. Der Name des zugehörigen Attributs in der verweisenden Instanz wird kursiv in einem grauen Kasten angegeben, der den Pfeil teilweise überdeckt. Die Pfeilrichtung ist von der verweisenden Instanz – sie enthält das verweisende Attribut – hin zu der Instanz, auf die verwiesen wird.
- Durchgezogene Pfeile mit leerer, dreieckiger Pfeilspitze  stellen Vererbungsbeziehungen zwischen Wissensmodellen dar. Der Pfeil zeigt vom abgeleiteten, speziellen Modell zum allgemeinen Basismodell.
- Gestrichelte Pfeile  verweisen von einer Instanz auf das zugehörige Wissensmodell.
- Pfeile mit einer Strichpunktlinie  verweisen von Anweisungsmodellen auf die durch sie unterstützten Handlungsalternativen.

Wird in einer Abbildung nur statisches Wissen dargestellt (z.B. in Ziel-Mittel-Graphen), so werden die Pfeildarstellungen zwischen Instanzen für *mögliche Beziehungen* von Instanzen der abgebildeten Modelle verwendet.

Sind in Abbildungen Pfeile grau statt schwarz dargestellt, so dient das lediglich der besseren Lesbarkeit der Diagramme. In den Erläuterungen sind Namen von **Wissensmodellen** fett in nichtproportionaler Schrift gesetzt, Bezeichnungen von Instanzen in nichtproportionaler Schrift und *Attribute* sowie deren Werte in kursiver, nichtproportionaler Schrift.

Die Namen der Wissensmodelle sind stets aus der Perspektive des UAVs gewählt. Delegiert also der Operateur eine seiner *Aufgaben* an ein UAV, so ist dies aus der Sicht des UAVs ein *Auftrag*, welcher bei der Interpretation um weitere *Aufgaben* angereicht wird. Diese entstehende Liste von Aufgaben wird durch das UAV aktiv verfolgt, bildet also dessen *Agenda* (vgl. Abschnitt 3.3). Die Erläuterungen verwenden die Nomenklatur aus Kapitel 2.3.

4.6.2.3 Umweltwissen

Das Wissenspaket Umweltwissen enthält alle Umweltmodelle, die nötig sind, um das aktuelle, maschinelle Situationsbild über die Umwelt inklusive des eigenen Zustands und der relevanten Informationen der anderen UAV abzubilden. Diese Informationen finden in menschlichem Situationsbewusstsein nach [Endsley 1988] ihre Entsprechung auf SA Level 2 (Verständnis der aktuellen Situation). In diesem Wissenspaket ist exklusiv der Stereotyp „Umweltmodell“ vertreten, weshalb im Folgenden nicht mehr bei jeder Wissensklasse der Stereotyp explizit genannt wird.

Die folgenden Wissensklassen bilden das Umweltwissen:

Teamdata existiert in jeder UAV-ACU als Singleton [Gamma 2010] und aktualisiert sich eigenständig mit den Daten eines vorgeschalteten „Blue-Force-Tracking“-Systems. Es enthält Namen und Positionen der eigenen Luftfahrzeuge.

UAV beschreibt das Wissen über ein einzelnes, im eigenen Team mitfliegendes unbemanntes Luftfahrzeug einschließlich des Luftfahrzeugs, an dem sich die ACU befindet. Instanzen dieser Klasse werden immer für das eigene Luftfahrzeug gebildet. Weitere Instanzen werden aus **Teamdata**-Instanzen abgeleitet.

Force beschreibt das Wissen um Kräfte am Boden. Dieses kann aus einer an das UAV gerichteten Nachricht eines anderen UAV bzw. des Operators entstehen oder aus dem automatischen Abgleich der taktischen Lagedaten zwischen den UAV-Systemen und der Kontrollstation. Im Attribut *type* wird hinterlegt, um welche Art von Kräften es sich handelt. Die definierten Werte hierbei sind „unknown“ für eine nicht näher kategorisierte Einheit, *Jeep* für ein leichtes militärische Fahrzeug, *SAM* für eine SAM-Site und *Car* für einen PKW. Des Weiteren gibt das Attribut *hostility* die Klassifizierung der Einheit an. Mögliche Werte sind hier „unknown“ für eine noch fehlende Einstufung, „neutral“ für zivile Einheiten, „friendly“ für eigene und „hostile“ für feindliche Einheiten.

Die Information über die Position der Kräfte erfolgt in der im Folgenden beschriebenen Wissensklasse **Position**, welche ggf. auf eine Instanz von **Force** verweist. Somit beschränkt sich die Verantwortlichkeit des Verhaltens von **Force** auf die Reaktion bzgl. neuer oder in ihrer Einstufung aktualisierter Kräfte.

Position modelliert das Wissen um eine laterale Position eines Elements im taktischen Lagebild. Es ist dabei unabhängig von der konkreten Ausprägung des taktischen Elements, sondern verweist stattdessen auf dessen Instanz im Working Memory. Im Attribut *type* wird angegeben, ob die Position statisch ist (location), Bodenkräfte bezeichnet (force) oder Luftfahrzeuge (aircraft).

Falls die Positionsangabe Teil einer Landezone ist, also beispielsweise einen Helikopterlandeplatz kennzeichnet, so wird im Attribut *landingsite* auf die Instanz der Landezone verwiesen. Bezeichnet Instanz von **Position** ein UAV, eine Einheit am Boden oder den Zielort bzw. -bereich eines Auftragslements, so wird auf die entsprechende Instanz durch das Attribut *entity* verwiesen.

Lateral-relation setzt jeweils zwei Instanzen von **Position** in Beziehung zueinander. Auf die Positionen wird in den Attributen *to* und *from* verwiesen. Aus der subsymbolischen Wissensrepräsentationsschicht (vgl. Kapitel 4.7) werden für Instanzen dieses Wissensmodells die notwendigen Symbole für die Attribute *distance* und *heading* zur Verfügung gestellt. *heading* gibt dabei das Heading symbolisch durch die Haupthimmelsrichtung an, mögliche Werte sind somit N, NE, E, SE, S, SW, W, NW. Eine feinere Granularität wurde für den weiteren Wissensverarbeitungsprozess nicht benötigt. *distance* kann *einen oder mehrere* der folgenden Werte annehmen:

WAYPOINT_REACHED wird in Situationen gesetzt, in denen die beiden Positionen so nahe beieinander liegen, dass von einem Erreichen einer Position (z.B. einer Landezone) durch eine der anderen Position zugeordneten Einheit (z.B. eines UAVs) ausgegangen wird.

NEAR kennzeichnet Positionen, die „in der Nähe voneinander“ liegen. Der Begriff ist bewusst nicht scharf auf eine bestimmte Entfernung bezogen, sondern modelliert die aus der Wissenserhebung (Abschnitt 3.5) bekannte Bezeichnung von „Einheiten in der Nähe“. Diese Art auch „unscharfe“ Begriffe zu verarbeiten ist der Fuzzy-Logic entlehnt. Im Gegensatz zur Fuzzy-Logic prozessiert die UAV-ACU auf der wissensbasierten Verarbeitungsebene Informationen rein symbolisch.

IN_CAMERA_RANGE zwischen der Position eines UAV und der Position am Boden gibt an, dass davon ausgegangen wird, dass mit den simulierten elektrooptischen Sensoren des UAV die Position gesehen werden kann.

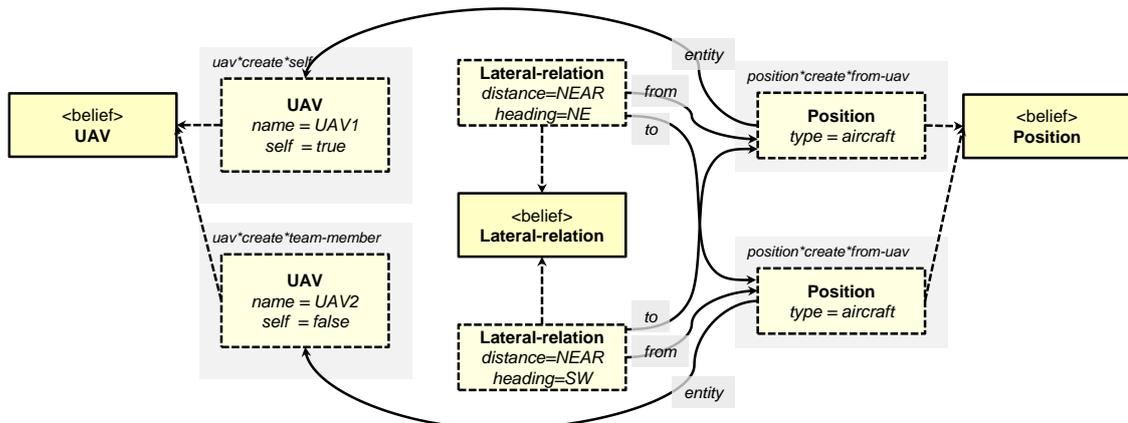


Abbildung 4-5: Situationswissen über die laterale Lage von UAV1 und UAV2 zueinander

Mit den bisher angeführten Wissensklassen werden die örtlichen Beziehungen aller bekannten Orte und Einheiten modelliert. Abbildung 4-5 zeigt exemplarisch das situative Wissen von UAV1 über seine relative, örtliche Lage zu UAV2. In diesem Beispiel befindet sich UAV2 nordöstlich in der Nähe von UAV1.

Das Wissensmodell **Route** enthält Verwaltungsinformationen über Flugrouten des UAV. Instanzen von **Route** werden gebildet, wenn

- eine neue Route durch das FMS (engl: Flight Management System) gemeldet wird.
- eine neue Route im Rahmen einer Transmission durch andere UAV oder die Kontrollstation an das UAV übertragen wird.
- der Routenplaner, welcher von der ACU benutzt werden kann, ein Ergebnis in Form einer Route zurückliefert.

Die Attribute von **Route** sind begrenzt auf den Namen der Route, eine numerische Kennung zur eindeutigen Kommunikation mit der subsymbolischen Verarbeitungsschicht (vgl. Kapitel 4.7) und dem symbolischen Namen des Ziels der Route. Die Verarbeitung des exakten Verlaufs der Route – also der einzelnen Wegpunkte – in der symbolverarbeitenden Schicht von COSA hat sich als nicht zweckdienlich herausgestellt, da auf dieser Granularität keine Schlussfolgerungen durch die Transformatoren des Kognitiven Prozesses generiert werden. Entsprechende Auswertungen der Route, z.B. über mögliche Bedrohungen entlang der Route, deren Länge oder der damit zu erreichenden Gebiete, werden auf subsymbolischer Ebene durchgeführt und der symbolischen Ebene zur Verfügung gestellt.

Route-threatened ist so eine Information über den Zustand der Route und modelliert den Umstand, dass eine Route potentiell durch den Wirkungsbereich einer dem System bekannten Bedrohung führt. Die Erkennung dieses Umstandes findet auf der subsymbolischen Wissensverarbeitungsebene statt und führt zur Instanziierung eines Objekts von **Route-threatened**. Das symbolische Wissensmodell **Route-threatened** verfügt nur über ein einzelnes Attribut *route*, welches auf die Instanz von **Route** verweist, die nicht bzw. nicht mehr sicher abgeflogen werden kann.

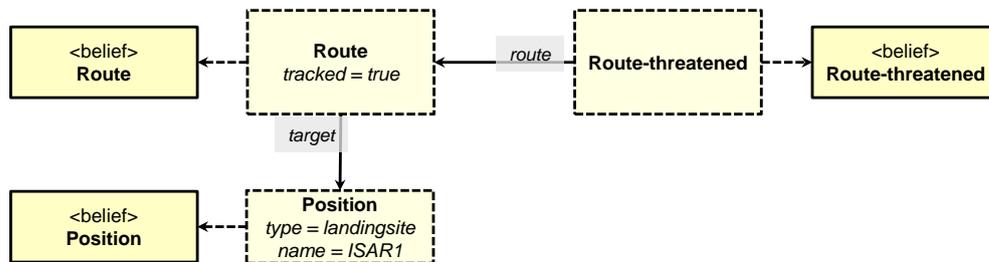


Abbildung 4-6: Wissen über eine Bedrohung auf der aktuellen Route zur Landezone

In Abbildung 4-6 ist ein Ausschnitt des Situationswissens der ACU dargestellt. In der Instanz der Klasse **Route** ist mit dem Attribut *tracked* gekennzeichnet, dass es sich hierbei um die aktuell durch das UAV geflogene Route handelt. Das Attribut *target* verweist auf das Zielgebiet **ISAR1**, das das UAV durch Abflug dieser Route zu erreichen versucht. Da eine Instanz von **Route-threatened** auf die Route verweist, kann diese nicht mehr sicher abgeflogen werden.

Die Wissensklasse **camera** hat in jeder ACU eine Instanz, welche Informationen über die aktuelle Konfiguration des bildgebenden Sensorsystems enthält. Diese umfasst den aktuellen Betriebszustand der Kamera (Attribut *controlmode*), die aktuelle Zoomstufe im Attribut *zoom* sowie die Koordinaten der Bildmitte, falls die Kamera auf einen erdfesten Punkt gerichtet ist.

hotspot modelliert das Vorhandensein einer auffälligen Sensorsignatur, die auf Bodeneinheiten hindeutet. Instanzen dieser Klasse werden gebildet, wenn eine derartige Auffälligkeit durch die ATR-Funktion (engl.: automatic target recognition) an die UAV-ACU gemeldet wird. Das Wissen um das Vorhandensein von wird an die anderen UAV übertragen, was dort ebenfalls zu Instanziierungen von **hotspot** führt. Außer den Koordinaten in den Attributen *lat* und *lon* enthält diese Klasse keine weiteren Informationen.

photo modelliert das Wissen über ein Sensorbild, das von einem UAV mittels eines bildgebenden Sensors erstellt wurde. In jedem UAV existiert eine Instanz für die Sensorbilder aller UAVs. Die Instanziierung dieser Wissensklasse erfolgt anhand der durch das Sensorsubsystem gelieferten Informationen über ein neues Sensorbild. Diese

Information wird an alle anderen bekannten UAV (vgl. Wissensklasse **uav**) übertragen, was beim Empfänger ebenfalls zur Instanziierung von **photo** führt. Im optionalen Attribut *hotspot* wird auf die zugehörige Instanz von **hotspot** verwiesen, wenn das Sensorbild erstellt wurde, um eine Nahaufnahme einer Sensorsignatur zu erhalten.

4.6.2.4 Supervisory Control

Im Wissenspaket Supervisory Control werden Umweltmodelle zusammengefasst, welche die Nachrichten zur Auftragsvergabe und -manipulation des Operators modellieren. Das ebenfalls enthaltene Umweltmodell **guidance-mode** repräsentiert ferner, ob das UAV überhaupt auftragsbasiert geführt wird oder aber aufgrund eines erkannten Eingriffs des Menschen auf niedrigerer Automationsstufe (Flugmanagementsystem oder Autopilot) keine Autorität über das Flugmanagementsystem und die nachgelagerte Flugregelung hat. Initial verfolgt die Instanz von **guidance-mode** die Annahme, dass diese Autorität nicht vorhanden ist, d.h. erst durch die Aktivierung des Operators geht die Kontrolle über das Fluggerät auf die ACU über (vgl. „EXEC TASK“-Instruktion in Abschnitt 4.8.2).

Die Wissensklasse **instruction** bildet die gemeinsame Basisklasse und definiert somit gemeinsame Attribute und Verhalten aller Anweisungen, welche *neue Aufträge* an das UAV übertragen. Die Hauptverantwortlichkeit dieser Klasse besteht in der Übernahme und Verwaltung gemeinsamer Attribute von Aufträgen sowie die Erkennung der nächsten abzuarbeitenden Anweisung. Um die Anweisungen in der Reihenfolge zu bearbeiten, in der sie vergeben werden, wird anhand des Attributs *message-number* die nächste abzuarbeitende Anweisung detektiert und das Ergebnis im Attribut *nextinstruction* hinterlegt. Weitere Attribute sind eine von der Kontrollstation gewählte numerische Kennung des Auftragslements (*task-id*) und optional Attribut ein über die gewünschte Position des neuen Auftrags in der Aufgabenliste (*designated-index*). Falls zu einer Anweisung ein entsprechendes Auftragslement generiert wurde (vgl. Wissensklasse **task** in Kapitel 4.6.2.6) verweist das Attribut *task* darauf.

Abgeleitet von **instruction** sind Wissensmodelle, die konkrete Arten von Aufträgen repräsentieren. Die Aufgabe dieser Wissensmodelle ist das Erkennen der entsprechenden Anweisung auf der Eingangsschnittstelle der ACU, das Setzen des Attributs *task* der Basisklasse **instruction** und die Übernahme aufgabenspezifischer Attribute. Diese Wissensklassen sind im einzelnen:

- **instruction*departure** – die Anweisung, den Auftrag für eine Startprozedur in die Aufgabenliste einzufügen
- **instruction*transit** – die Anweisung, einen Transitflug zu einer benannten Position in die Aufgabenliste einzufügen
- **instruction*crossflot** – die Anweisung, das Durchqueren eines in der Anweisung benannten Flugkorridors in die Aufgabenliste einzufügen
- **instruction*surveillance** – die Anweisung, eine Objektüberwachung an einer benannten Position oder einer designierten Einheit am Boden in die Aufgabenliste einzufügen.
- **instruction*recce*area** – die Anweisung, die Aufklärung eines benannten Gebiets in die Aufgabenliste einzufügen.

- **instruction*recce*route** – die Anweisung, die Aufklärung einer Route zu einer benannten Koordinate in die Aufgabenliste einzufügen.
- **instruction*landing** – die Anweisung, eine Landeprozedur an einem benannten Ladebereich bzw. über eine benannte Landeroute in die Aufgabenliste einzufügen.

Die folgenden Anweisungen an das UAV dienen der Manipulation der Aufgabenliste bzw. der Steuerung des nächsten abzuarbeitenden Auftragslements. Da diese Anweisungen nicht zwingend einem einzelnen Auftragslement zuzuordnen sind, sind sie nicht von der Klasse **instruction** abgeleitet.

Die Anweisung **instruction*execute-task** weist das UAV an, mit der Ausführung einer spezifischen Aufgabe der Aufgabenliste zu beginnen, welches durch das Attribut *taskid* designiert ist. Instanzen dieser Wissensklasse zerstören sich selbst, wenn erkannt wird, dass das gewünschte Auftragslement aktuell ausgeführt wird. Die Existenz einer Instanz dieses Wissensmodell führt in der oben beschriebenen Klasse **guidance-mode** zur Transition in den Modus der auftragsbasierten Führung.

instruction*delete-task weist das UAV an, das im Attribut *taskid* designierte Aufgabe aus der Aufgabenliste zu entfernen. Instanzen dieses Wissensmodells zerstören sich, wenn das zugehörige Auftragslement aufhört zu existieren.

4.6.2.5 Missionswissen

Das Missionswissen umfasst den Kernbereich des Wissens, der für die *Durchführung von Aufgaben* und deren *Zerlegung in Unteraufgaben* notwendig ist.

Der im Missionswissen enthaltene Wunsch **comply-with-agenda** *definiert wesentlich das Gesamtverhalten* des Systems. Er modelliert, dass bei auftragsbasierter Führung und der Kenntnis der aktuell abzuarbeitenden Aufgabe der Zielzustand der Aufgabe verfolgt werden soll. Der folgende, vollständige CPL-Code des Wunsches **comply-with-agenda** verdeutlicht exemplarisch, wie kompakt die Wissensrepräsentation auf symbolischer Ebene erfolgen kann:

```
class <goal> comply-with-agenda
: @means-end::end
{
  attributes:
    string name := |comply-with-agenda|;

    link agenda-item; // the agenda-item to follow

  behaviour:
    sp { elaborate*from-own-agenda
      (instance[belief::agenda::*] <agenda>
        ^self t
        ^current-agenda-item <item>)
      (<item> ^task <task> )
      - (<task> ^status |UAVTASKSTATE_DONE| )
      (instance[belief::guidance-mode::*] ^mode |task-based| )
      -->
      (elaborate <i>)
      (<i> ^agenda-item <item>)
    }
};
```

Listing 4-1: Wissensmodell *comply-with-agenda*

Die erste Zeile definiert das Wissensmodell **comply-with-agenda** als neue Wissensklasse mit dem Stereotyp „goal“, welcher angibt, dass es sich um das Modell eines Wunsches im kognitiven Prozess handelt. In der zweiten Zeile wird definiert, dass diese Wissensklasse von der Klasse **end** aus dem Paket **means-end** abgeleitet ist. Diese Ableitungsbeziehung ist für alle Wissensklassen gegeben, die in der UAV-ACU Wünsche modellieren. Für eine detailliertere Betrachtung der dadurch umgesetzten Mittel-Ziel-Analyse (engl.: means-ends analysis) sei an dieser Stelle auf [Meitinger 2008] verwiesen.

Das obligatorische Attribut *name* dient der leichteren Erkennung von Instanzen dieses Wunsches im Debugsystem „CosaSHELL“. Das Attribut *agenda-item* verweist auf den Eintrag in der Aufgabenliste, dessen Aufgabe aktuell verfolgt und erfüllt werden soll.

Die *Produktion* `elaborate*from-own-agenda` kann zeilenweise wie folgt gelesen werden:

- WENN es eine Instanz des Umweltmodells (belief) **agenda** gibt,
- dessen Attribut *self* den Wert „t“ hat (d.h., es handelt sich um die eigene Aufgabenliste und nicht um die eines anderen UAV)
- und dessen Attribut *current-agenda-item* mit einem Wert belegt ist
- und dieser Wert wiederum ein Attribut *task* hat
- an dem *nicht* das Attribut *status* mit dem Wert „UAVSTATE_DONE“ existiert
- und es eine Instanz des Umweltmodells **guidance-mode** gibt, dessen Attribut *mode* den Wert „task-based“ hat...
- DANN erzeuge für den Zeitraum in dem die Bedingungen zutreffen (*elaborate*) eine Instanz des Wunsches **comply-with-agenda** dessen Attribut *agenda-item* auf die Instanz verweist, auf die auch der Wert des Attributs *current-agenda-item* aus dem Bedingungsteil verwiesen hat.

Umgangssprachlich kann diese Produktion so formuliert werden: „Solange in der eigenen Auftragsagenda das aktuelle Auftragsselement nicht bereits erledigt ist, habe das Ziel dieses Auftragsselement abzuarbeiten.“ Mit dieser Aktivierungsproduktion wird **comply-with-agenda** zum Fundamentalziel, da die Zielaktivierung nicht auf die Erreichung eines höheren, fundamentaleren Ziels gerichtet ist, sondern sich primär auf die Existenz eines noch nicht abgearbeiteten Auftragsselements stützt.

Folgende Wissensmodelle sind Handlungsalternativen (Stereotyp „plan“), die unmittelbar für das Erreichen eines aktiven Ziels **comply-with-agenda** vorgeschlagen werden können. Sie sind an die Arten der Auftragsselemente angelehnt:

- **recce-route** modelliert die Handlungsalternative, eine Route aufzuklären.
- **landing** modelliert die Handlungsalternative, eine Landeprozedur durchzuführen.
- **recce-area** schlägt eine Gebietsaufklärung vor.
- **transit** ist die Handlungsalternative zur Durchführung eines Transitflugs.
- **depart** ist die Handlungsalternative, die vorschlägt, eine Startprozedur durchzuführen.
- **crossfлот** modelliert das Durchqueren eines designierten Flugkorridors zwischen zwei Gebieten.

- **surveillance** modelliert die Überwachung eines Objekts oder Orts durch das UAV.

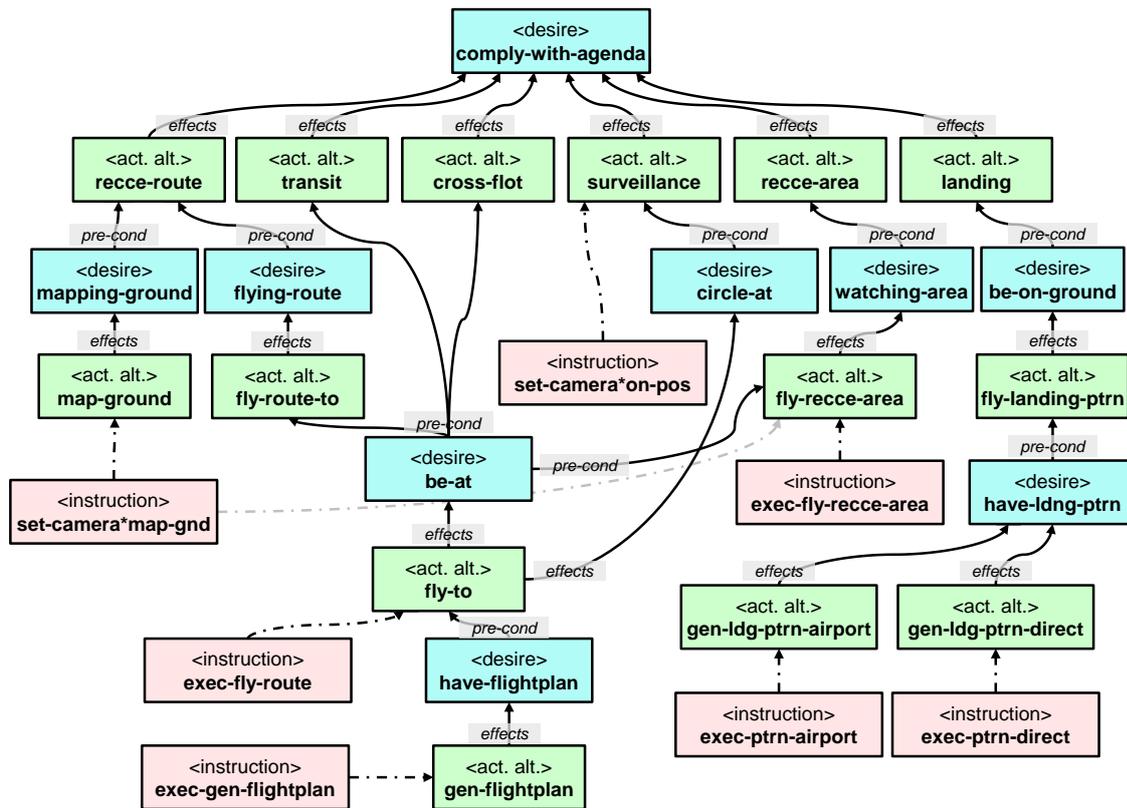


Abbildung 4-7: Ziel-Mittel-Graph des Missionswissenspakets

Abbildung 4-7 zeigt den Ziel-Mittel-Graphen des Missionswissens. Aus Platzgründen wurde die Handlungsalternative **depart** nicht dargestellt, welche jedoch analog zu **landing** umgesetzt ist. Zwischen den Wünschen (Stereotyp „desire“ in Abbildung 4-7) und den Handlungsalternativen (Stereotyp „act. alt.“) existieren die Beziehungen *effects* und *pre-cond*. Erkennt eine Handlungsalternative, dass sie geeignet sei, ein aktives Ziel – also die Instanz eines Wunsches – zu unterstützen, so generiert sie eine Instanz von sich selbst und verweist mit ihrem Attribut *effects* auf das unterstützte Ziel. Umgekehrt kann ein Wunsch erkennen, dass eine Handlungsalternative in der aktuellen Situation nicht durchführbar ist. In diesem Fall erzeugt der Wunsch eine Instanz von sich – also ein Instrumentalziel (vgl. Abschnitt 4.6.1) – als Vorschlag die Situation zu verändern, um die Handlungsalternative durchführbar zu machen. Dabei wird mit dem Attribut *pre-cond* vom Ziel auf die zu ermöglichende Handlungsalternative verwiesen.

Folgende Instrumentalziele sind im Missionswissenspaket definiert:

- **mapping-ground** modelliert die Zielvorstellung, kontinuierlich Bilder des überflogenen Geländes zu generieren und auf Sensorauffälligkeiten (sog. „hot spots“) zu untersuchen. Ist eine Instanz dieses Ziels aktiv und das Kamerasystem in der gewünschten Konfiguration, dann führt eine Veränderung der Kamera-konfiguration erst dann zu einer Verletzung des Ziels, wenn dadurch Lücken in den Bodenbildern entstehen. Dieses Detail verdeutlicht den semantischen Unterschied zwischen „generiere kontinuierlich Bilder des überflogenen Geländes“ und „konfiguriere Kamerasystem für Bodenbilder“. Ersteres bezeichnet den gewollten,

andauernden Effekt, letzteres eine Umsetzung, welche jedoch in der zugehörigen Handlungsalternative vorzuschlagen ist und zeitlich deutlich kürzer gefasst wird.

- **fly-ing-route** bildet den Wunsch, eine Route aktiv abzufliegen. Das Ziel ist erfüllt, wenn das UAV eine Route befliegt, die zu dem gewünschten Ort führt.
- **circle-at** repräsentiert den Wunsch des UAV, an einer bestimmten, benannten Position zu kreisen. Das aktive Ziel erkennt seine Erfüllung, solange das UAV kreist und sich in der Nähe (vgl. Beschreibung des Umweltmodells **lateral-relation**) des gewünschten Orts befindet.
- **watching-area** ist der Wunsch, ein Gebiet um einen benannten Ort aufzuklären. Eine Instanz dieses Wunsches ist erst erfüllt, wenn sich das UAV in Sensorreichweite des aufzuklärenden Gebiets befindet, die Kamera entsprechend konfiguriert ist und ein Aufklärungspattern geflogen wird. Analog zum Wunsch **mapping-ground** wird auch bei **watching-area** eine Verletzung des erfüllten Ziels erst erkannt, wenn dadurch Aufklärungslücken entstehen würden.
- **be-on-ground** ist der Wunsch, an einer bestimmten Position gelandet zu sein. Instanzen dieses Wunsches sind erfüllt, wenn das UAV an dieser Position Bodenkontakt detektiert.
- **be-at** nimmt als Wunsch im Ziel-Mittel-Graph eine zentrale Stellung ein (vgl. Abbildung 4-7). Es stellt den Wunsch des UAVs dar, sich an einer bestimmten Position zu befinden und Instanzen dieses Wunsches sind nur solange erfüllt, solange sich das UAV auch an dem gewünschten Ort befindet. Damit modelliert es die Voraussetzung für eine Reihe von Handlungsalternativen, denn
 - **fly-recce-area** setzt voraus, dass sich das UAV bereits in der Nähe des aufzuklärenden Gebiets befindet.
 - **transit** impliziert, dass sich das UAV nach dem Transitflug an dessen Zielposition befindet.
 - **departure** beinhaltet, nach der Startprozedur an einem definierten Ort zu sein.
 - für die Durchführung von **crossfлот** müssen Anfangs- und Endpunkt des Korridors angefliegen werden, d.h. das UAV muss sich an diesen Orten befinden.
 - der Abflug einer Route zu einem Ort (**fly-route-to**) impliziert, sich am Start bzw. anschließend am Ende der Route befinden zu wollen.
- **have-valid-flightplan** modelliert den Wunsch einen *bedrohungs-freien* Flugplan zu einem bestimmten Ort zu kennen. Diese Formulierung des Wissens führt dazu, dass die Erkennung einer für den geplanten Flugweg relevanten Bedrohung automatisch zu einer Verletzung dieses Ziel führt. In diesem Fall wird daher die ACU versuchen, das Ziel zu erreichen und einen bedrohungs-freien Weg planen.
- **have-landing-pattern** ist der Wunsch, den Landeanflugweg zu einer Lande-position zu kennen.

Neben den bereits genannten Handlungsalternativen, welche direkt den Auftragselementen entsprechen, existieren noch weitere, um die soeben erläuterten Instrumentalziele zu erfüllen. Ein gemeinsames Merkmal dieser Handlungsalternativen ist, dass sie nur zur Verfügung stehen, wenn das UAV auftragsbasiert geführt wird (vgl. Wissensmodell **guidance-mode** in Abschnitt Supervisory Control):

- **map-ground** schlägt vor, mit der Kamera des UAV Bodenbilder zu machen und diese automatisch auf auffällige Signaturen zu untersuchen.
- **fly-route-to** schlägt vor, eine vorgegebene Route zu einem Ort abzufliegen.
- **fly-recce-area** schlägt vor, das UAV für die Gebietsaufklärung um ein bestimmtes Gebiet zu konfigurieren. Dieses Wissensmodell wurde zusätzlich zu **recce-area** eingeführt, um die Überwachung der Ausführung durch das Instrumentalziel **watching-area** zu ermöglichen. Insbesondere wird dadurch ermöglicht, für eine selektierte Handlungsalternative **recce-area** mehrfach die Handlung **fly-recce-area** durchzuführen, um Aufklärungslücken durch eine suboptimale Sensorkonfiguration zu vermeiden.
- **fly-landing-pattern** schlägt vor, einen Landeanflug durchzuführen.
- **fly-to** schlägt vor, einen bestimmten Ort anzufliegen.
- **generate-landing-pattern-airport** schlägt vor, für einen Landeanflug auf einen Flugplatz die zugehörige, bekannte Anflugroute zu verwenden und als zu fliegende Route zu hinterlegen.
- **generate-landing-pattern-direct** schlägt vor, für einen Landeanflug auf eine beliebige Position diese auf möglichst kurzem, bedrohungsfreien Weg anzufliegen. Dieser Vorschlag steht in Konkurrenz zu einem evtl. ebenfalls vorgeschlagenem **generate-landing-pattern-airport**. Deshalb ist als Selektionswissen hinterlegt, dass konkurrierenden Handlungsalternativen gegenüber einem direkten Landeanflug grundsätzlich der Vorzug zu geben ist.
- **generate-flightplan** schlägt vor, den Routenplaner des UAV zu verwenden um eine bedrohungsfreie Route zu einem Zielpunkt zu generieren.

Unabhängig von dem übergeordneten Ziel, stets das aktuelle Auftragselement zu bearbeiten ist die Verfolgung günstiger Gelegenheiten, welche als Fundamentalziel modelliert ist. Für die Verfolgung günstiger Gelegenheiten in einer künstlich kognitiven Einheit wurde exemplarisch die Generierung von Nahaufnahmen von noch nicht klassifizierten Sensorauffälligkeiten implementiert.

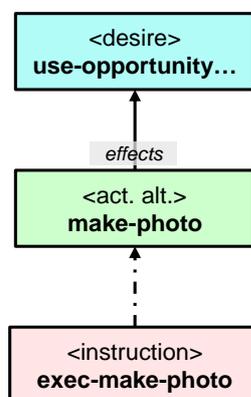


Abbildung 4-8: Ziel-Mittel-Graph der Nutzung einer günstigen Gelegenheit

Im Wunsch **use-opportunity*photograph-unknown-force** ist der Wunsch modelliert, eine günstige Gelegenheit für die Fotografie unbekannter Kräfte zu nutzen. Dieser Wunsch instanziiert sich zu einem Ziel, wenn folgende Bedingungen zutreffen:

1. Es existiert eine Instanz der Klasse **force**, deren Typ nicht bestimmt ist.
2. Die örtliche Beziehung zwischen dem eigenen Fluggerät **uav** und der Instanz von **force** besagt, dass sich die unbekannte Einheit in Sensorreichweite befindet.
3. Es existiert keine Instanz von **photo**, die ein Bild der unbekanntes Einheit aus der Himmelsrichtung zeigt, die das UAV aktuell zu ihr einnimmt.

Die Handlungsalternative **make-photo** schlägt anhand dieses Ziels vor, ein Foto der unbekanntes Einheit zu machen, falls das Kamerasystem verfügbar ist. Wird die Handlungsalternative ausgewählt, so schreibt das zugehörige Anweisungsmodell **exec-make-photo** eine Folge von Anweisungen auf die Ausgabeschnittstelle, welche (1) die aktuelle Kamerakonfiguration im Anweisungsmodell hinterlegen, (2) die Kamera für die Nahaufnahme konfigurieren und diese auslösen und (3) die im ersten Schritt gespeicherte Kamerakonfiguration wiederherstellen.

Eine Folge dieser Modellierung ist eine *emergente Kooperation* zwischen den UAV, da beim versetzten Vorbei- oder Überflug über ein nichtklassifiziertes Ziel alle UAVs dazu beitragen, Fotos aus verschiedenen Blickwinkeln zu erzeugen. Bewusst verzichtet wurde bei diesem Ansatz auf Eingriffe in die Flugsteuerung des UAV, um negative Auswirkungen auf die Durchführung der aktuellen Aufgaben zu vermeiden.

Anweisungsmodelle führen die selektieren Handlungsalternativen aus. Die Anweisungsmodelle des Missionswissens sind:

- **set-camera*map-ground** ist ein Anweisungsmodell, das auf der Ausgabeschnittstelle der ACU den Befehl an das Kamerasystem zur Konfiguration in den Bodenabtastmodus schreibt.
- **exec-fly-recce-area** schreibt je eine Anweisung an das Kamerasystem als auch an die Flugregelung (FMS – Flight Management System), um das Gebiet um eine gegebene Koordinate aufzuklären.
- **exec*cam-on-position** (in Abbildung 4-7: Ziel-Mittel-Graph des Missionswissenspakets verkürzt als „set-camera*on-pos“ bezeichnet) weist das Kamerasystem an, die Kamera auf einen erdfesten Punkt zu richten und durch eine entspr. Lageregelung nachzuführen.
- **exec-fly-route** weist die Flugregelung an, eine Route abzufliegen. Die Route selbst wird in der Anweisung referenziert (vgl. Abschnitt 4.7). Dieses Anweisungsmodell wird von den Handlungsalternativen **fly-to** und **fly-landing-pattern** verwendet, um die entsprechenden Routen abzufliegen. (Letzteres ist in Abbildung 4-7: Ziel-Mittel-Graph des Missionswissenspakets aus Gründen der Übersichtlichkeit nicht dargestellt.)
- **exec-generate-flight-plan** sendet das Kommando zur Planung einer bedrohungsarmen Route an den UAV-Routenplaner. Das Kommando enthält die Informationen über das Ziel der Route in symbolischer Form, also die textuelle Bezeichnung des Zielorts oder einer Einheit, deren Position angefliegen werden soll. Ferner wird die Sollflughöhe angegeben und ggf. welches Offset von der Mittellinie berücksichtigt werden soll (vgl. Abschnitt 4.6.2.9).

- **exec-generate-landing-pattern-direct** (in Abbildung 4-7: Ziel-Mittel-Graph des Missionswissenspakets verkürzt als „exec-ptn-direct“ angegeben) weist den Routenplaner an, eine Landeroute zu der gegebenen Position zu generieren.
- **exec-generate-landing-pattern-airport** (in Abbildung 4-7: Ziel-Mittel-Graph des Missionswissenspakets verkürzt als „exec-ptn-airport“ angegeben) weist den Routenplaner an, eine Route anhand einer für den genannten Ladeplatz bekannten Anflugprozedur zu generieren.

Mit den bisher dargestellten Wissensselementen ist die Durchführung eines einzelnen Auftragsselements möglich. Für intelligentes, kooperatives Verhalten und die auftragsbasierte Führung sind jedoch weitere Wissensbereiche notwendig, die in den folgenden Abschnitten erläutert werden.

4.6.2.6 Kooperationswissen

Im Wissenspaket Kooperation sind die Wissensklassen zusammengefasst, die

1. Wissen über die aktuellen und zukünftigen Auftragsselemente des eigenen UAV und der anderen UAVs im Team enthalten.
2. Wissen über das aktuell zu bearbeitende Auftragsselement und die Reihenfolge künftiger Auftragsselemente darstellen. Dazu zählen ebenfalls Strategien, das aktuelle Auftragsselement zu bestimmen.
3. den Informationsbedarf der Teammitglieder modellieren und Handlungsalternativen, um diesen Informationsbedarf zu befriedigen.

Ein Auftragsselement des eigenen UAV entspricht einer Instanz einer von der Wissensklasse **task** abgeleiteten Klasse. Für jede Art von Auftragsselement existiert eine solche Klasse: **task-recce-route**, **task-recce-area**, **task-surveillance**, **task-transit**, **task-departure**, **task-landing**, **task-crossflot**. Somit existiert zu jedem Auftragsselement das Wissen über die Beauftragung (Klasse **instruction** in Abschnitt 4.6.2.4), die Durchführung im Missionswissen (Abschnitt 4.6.2.5) und mit der Klasse **task** die Information über das Auftragsselement als solches.

Die gemeinsame Basisklasse **task** definiert hierbei das gemeinsame Wissen und Verhalten aller Auftragsselemente. Hierzu zählen insbesondere:

- der aktuelle Zustand des Auftragsselements, der (1) „wartend“ sein kann, wenn die Bearbeitung des Auftragsselements noch nicht begonnen wurde, (2) „in Vorbereitung“, falls das UAV eine Vorbereitungshandlung wie den Anflug des Startpunkts einer Routenaufklärung durchführt, (3) „in Durchführung“, wenn das Auftragsselement bearbeitet wird, (4) „abgebrochen“ wenn der Operateur eine Anweisung gegeben hat, die den Abbruch dieses Auftragsselements impliziert und (5) „erledigt“, wenn das Auftragsselement vollständig abgearbeitet wurde.
- die Erkennung von Zustandsübergängen mit Ausnahme der Erkennung, dass ein Auftragsselement oder seine Vorbereitung erledigt ist (Übergänge in die Zustände „in Durchführung“ und „erledigt“).
- die Systemzeit, zu der ein aktives Auftragsselement gestartet wurde.
- die Zerstörung des Auftragsselements, wenn es aufgrund einer entsprechenden Anweisung des Operateurs explizit gelöscht werden soll oder es aufgrund einer Umplanung von Vorgängern oder Nachfolgern hinfällig geworden ist (vgl. Kapitel 4.6.2.7).

In die Verantwortung der abgeleiteten Klassen fällt die Erweiterung von `task` um spezifische Verhaltensmerkmale und Attribute. Hierzu zählen die Erkennung, dass die Vorbereitungen für die Durchführung abgeschlossen sind (Übergang in den Zustand „in Durchführung“) sowie der Zustandsübergang in den Zustand „erledigt“. Gemeinsam mit dem Verhalten der Basisklasse entsteht so der in Abbildung 4-9 dargestellte Verhaltenszustandsautomat.

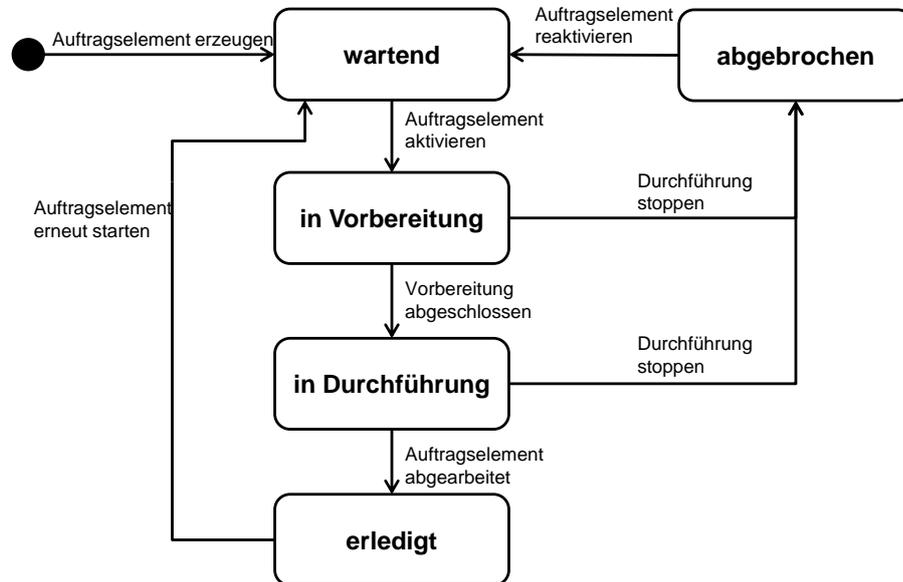


Abbildung 4-9: Aktivitätsdiagramm von Auftrags Elementen

Dieser Zustandsautomat (dargestellt als Aktivitätsdiagramm nach [UML 2011]) hat keinen definierten Endzustand, da durch die mit `instruction*execute-task` (Abschnitt 4.6.2.4) repräsentierte Anweisung ein Zustandsübergang von „erledigt“ bzw. „abgebrochen“ in den Zustand „wartend“ erzwungen werden kann. In jedem Zustand kann ein Auftrags Element gelöscht werden.

Eine weitere Verantwortlichkeit der von `task` abgeleiteten Wissensmodelle ist die Erzeugung einer Instanz eines Auftrags Elements. Diese Erkennung basiert jeweils auf der Existenz einer entsprechenden Instanz von `instruction`, die mit ihrem Attribut `nextinstruction` anzeigt, dass es die nächste abzuarbeitende Anweisung ist. Die Erzeugung eines Auftrags Elements erfolgt persistent, d.h. die Instanz bleibt auch nach dem Entfernen der Anweisung weiterhin aktiv.

Das Umweltmodell `Agenda` repräsentiert die Liste der Auftrags Elemente des eigenen UAVs. Die Zugehörigkeit von Auftrags Elementen zur Liste wird im Umweltmodell `agenda-item` abgebildet. Dieses Umweltmodell enthält ebenfalls die Information über die Vorgänger-Nachfolger-Beziehung der einzelnen Auftrags Elemente (Attribut `next-item`). Das Umweltmodell `agenda-item` ist ebenfalls verantwortlich für eine stets konsistente Liste von Aufgaben und aktualisiert dafür die Vorgänger-Nachfolger-Beziehung bei Ergänzungen und Löschungen von Aufgaben.

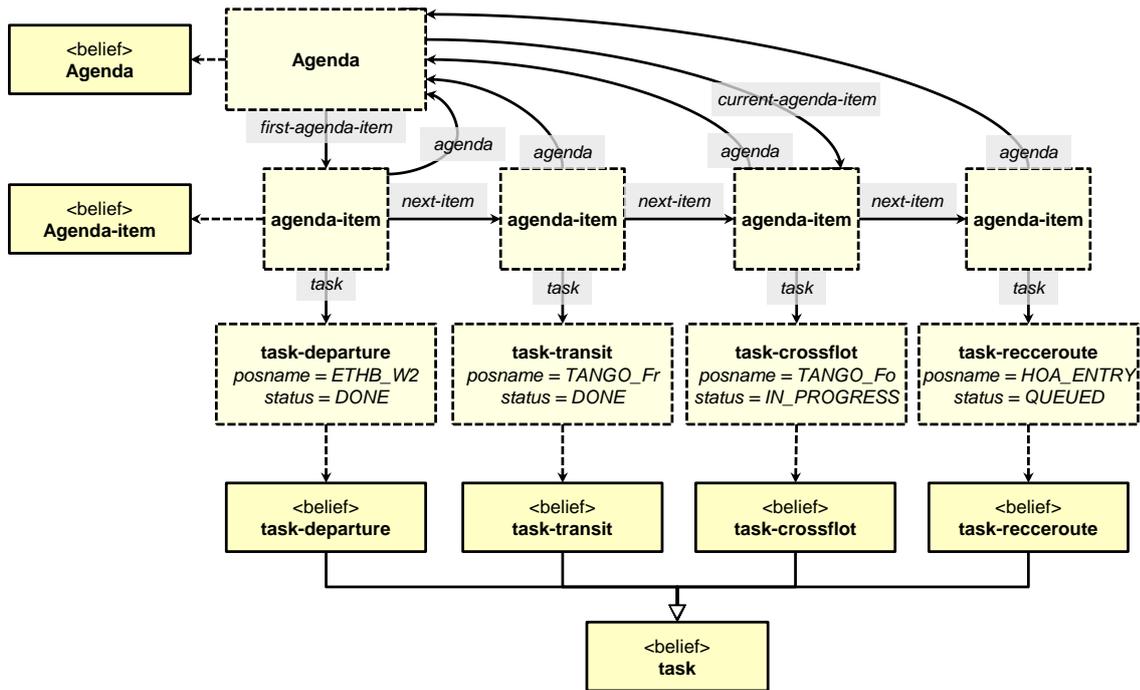


Abbildung 4-10: Repräsentation der Aufgabenliste in der ACU

In Abbildung 4-10 ist exemplarisch das Wissen um den aktuellen Auftrag des UAV in dessen ACU dargestellt. Im Beispiel hat das UAV den aus folgenden Elementen bestehenden Auftrag:

1. Durchführen einer Startprozedur, welche die zum Wegpunkt `ETHB_W2` gehörige Startroute des Flugplatzes nutzen soll
2. Transitflug zur Position `TANGO_Fr`
3. Durchqueren des Flugkorridors „Tango“ zum Wegpunkt `TANGO_Fo`
4. Aufklären der Route zu `HOA_ENTRY`

In der Instanz `Agenda` ist hinterlegt, dass der Auftrag mit der Startprozedur beginnt (Attribut `first-agenda-item`) und die Durchquerung des Flugkorridors das aktuell bearbeitete Auftragsselement ist (Attribut `current-agenda-item`).

Als Fundamentalziel ist modelliert, dass die ACU stets das aktuell zu behandelnde Auftragsselement kennen muss. Das entsprechende Wissen ist in dem Wunsch `know-current-agenda-item` hinterlegt. Der Wunsch instanziiert sich und wird zu einem aktiven Ziel, wenn mindestens ein Auftragsselement des eigenen UAV vorhanden ist, welches nicht bereits abgearbeitet wurde und wenn in der Instanz von `Agenda` das Attribut `current-agenda-item` nicht gesetzt ist.

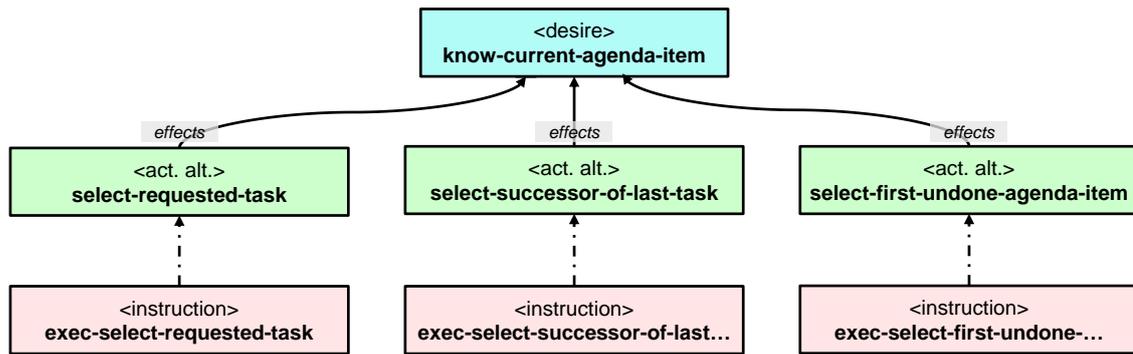


Abbildung 4-11: Ziel-Mittel-Graph zur Ermittlung des aktuellen Auftragslements

Abbildung 4-11 zeigt die Handlungsalternativen und ihre Anweisungsmodelle zur Verfolgung des Ziels **know-agenda-item**. Die Handlungsalternative **select-requested-task** schlägt vor, dasjenige Auftragslement als nächstes zu bearbeiten, das der Operateur durch die in Abschnitt 4.6.2.4 beschriebene Anweisung **instruction*execute-task** zur Ausführung selektiert hat. Diese Handlungsalternative schlägt sich nur vor, wenn eine entsprechende Anweisung existiert. Da der Operateur die übergeordnete Führungsinstanz im Arbeitssystem der UAV-Führung bildet, besagt das Wissen dieser Handlungsalternative ferner, dass sie allen anderen Handlungsalternativen vorzuziehen ist, die das Ziel **know-current-agenda-item** unterstützen. Die Handlungsalternative **select-successor-of-last-task** schlägt vor, mit dem Nachfolger des zuletzt abgearbeiteten Auftragslements fortzufahren. Die Handlungsalternative **select-first-undone-agenda-item** schlägt das erste Auftragslement zur Bearbeitung vor, das noch nicht abgearbeitet wurde. Diese Handlungsalternative wird nur dann gewählt, wenn keine andere Alternative zur Verfügung steht. Die Anweisungsmodelle **exec-select-requested-task**, **exec-select-successor-of-last-task**, und **exec-select-first-undone-agenda-item** setzen die zugehörigen Handlungsalternativen um, indem sie anhand des Wissens um den aktuellen Auftrag (Abbildung 4-10) und die selektierte Strategie das Auftragslement auswählen und das Attribut *current-agenda-item* in der Instanz von **Agenda** setzen.

Anders als die Klasse **task** repräsentiert das Wissensmodell **taskmsg** eine Nachricht eines anderen UAV über dessen Auftragslement. Instanzen dieser Klasse werden bei neuen Nachrichten gebildet bzw. aktualisiert und enthalten Informationen über die Art des Auftragslements, das Zielgebiet des Auftragslements und optional den Startpunkt. Ferner ist die Rolle des UAVs bzgl. der Ausführung des Auftragslements angeführt (siehe Abschnitt 4.6.2.9).

keep-operator-informed repräsentiert den Wunsch, den Operateur und das Team – also die anderen UAVs – über relevante Änderungen im eigenen Wissen zu informieren. Die Einstufung, welche Wissensänderungen als relevant zu betrachten sind, wird durch den Entwickler vorgenommen. Entsprechende Attribute von Wissensmodellen werden mit dem zusätzlichen *Aspekt operator-knowledge* gekennzeichnet. Das Umweltmodell **operator-knowledge-monitor** erkennt und repräsentiert zur Laufzeit die Erzeugung, Veränderung und Löschung von Wissensmodellen mit entsprechend gekennzeichneten Attributen. Diese Art der zusätzlichen Markierung von Wissensattributen findet sich in der *aspektorientierten Programmierung* [Clarke und Baniassad 2005] wieder. Sie erlaubt es, neben der objektorientierten Modellierung weitere Ebenen – Aspekte – sowohl in das Modell als

auch in der Umsetzung in den Code einfließen zu lassen. COSA unterstützt aspektorientierte Programmierung durch Attribute und Reflektion.

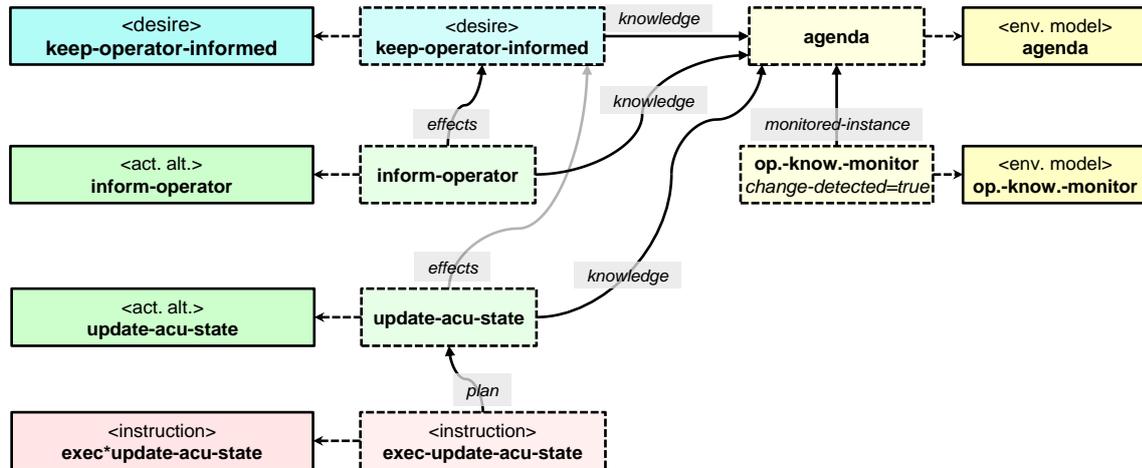


Abbildung 4-12: Erkennung des Informationsbedarfs bei Änderung der Agenda

In Abbildung 4-10 ist ein Ausschnitt des Situationswissens dargestellt, der die Erkennung einer Änderung im der Instanz des Umweltmodells **agenda** durch eine Instanz von **operator-knowledge-monitor** repräsentiert. Diese Erkennung wiederum aktiviert das Ziel **keep-operator-informed**. Die beiden Handlungsalternativen **inform-operator** und **update-acu-state** ermöglichen die Übertragung des geänderten Wissens an das Team. **inform-operator** ist eine allgemeine Handlungsalternative, welche das zu übertragende Wissen in generischer Form serialisiert und übermittelt. Sind mehrere Handlungsalternativen zur Information des Teams aktiv, so werden die speziellen dem allgemeinen **inform-operator** bevorzugt. **update-acu-state** ist so eine Handlungsalternative, die speziell Änderungen an der Agenda an in dem dafür vorgesehenen Nachrichtenformat überträgt.

4.6.2.7 Einhalten allgemeiner Einsatzgrundlagen

Ausgehend von der Designvorgabe, die Führung eines unbemannten Fluggeräts auf der Abstraktionsebene der Führung eines bemannten Fluggeräts abzubilden, muss auch das unbemannte Fluggerät in der Lage sein, basierend auf der taktischen Lage den übertragenen Auftrag zu interpretieren und sinnvoll zu ergänzen. Diese Fähigkeit des UAV soll folgenden Anforderungen gerecht werden:

- Durch die Führung mit einer Agenda werden nur diejenigen Auftrags-elemente an das UAV übertragen, die bei der Auftragsvergabe für den Operateur von Belang – also Teil der Agenda – sind. Dennoch sollen evtl. Lücken zwischen diesen Auftrags-elementen unter Berücksichtigung der Einsatzgrundsätze geschlossen werden (vgl. Abschnitte 3.6.5 und 5.4.2).
- In Situationen hoher menschlicher Beanspruchung ist damit zu rechnen, dass der Operateur aufgrund mangelnder Ressourcen den Auftrag nicht detailliert spezifizieren kann. Werden durch die in diesen Situationen typischen selbstadaptiven Strategien des Operateurs Auftrags-elemente weggelassen, so können diese im Hinblick auf die allgemeinen Einsatzgrundlagen systemseitig ergänzt werden.
- Assistenzsysteme, welche für ihre Unterstützungsleistung den Operateur und das Arbeitssystem beobachten (vgl. [Donath et al. 2010] und [Rauschert 2013]), müssen keine Fälle berücksichtigen, in denen UAVs die grundlegenden Einsatzgrundsätze

missachten. Dies führt zu einer systemischen Komplexitätsreduktion, da Assistenzsysteme und übergeordnete Planungssysteme die Einhaltung der Einsatzgrundsätze nicht überwachen oder erzwingen müssen. Planungssysteme können ferner davon ausgehen, dass die Einsatzgrundsätze eingehalten werden.

Folgende elementare Einsatzgrundsätze sind im Wissenspaket über Einsatzgrundlagen der ACU enthalten:

Jedes Auftragsselement außer der Startprozedur (Departure) setzt voraus, dass das UAV bereits in der Luft ist.

Dieser Grundsatz soll einen unkontrollierten Start des UAV verhindern, der die Einsatzgrundsätze oder Startprozeduren des Startflughafens verletzt.

Existieren für eine Landung an einem bestimmten Punkt zugehörige Landerouten, so sind diese zu verwenden.

Ebenso wie beim Start des UAV soll auch bei der Landung sichergestellt werden, dass die vereinbarten Landerouten eingehalten werden.

Die Auftragsselemente „Gebietsaufklärung“ und „Objektüberwachung“ setzen voraus, dass sich das UAV in der Nähe des zugehörigen Gebiets bzw. Objekts befinden.

Mit dieser Forderung soll erreicht werden, dass das UAV den vorbereitenden Anflug auf ein Zielgebiet oder -objekt nicht als Teil der Aufklärung oder Objektüberwachung betrachtet, sondern ggf. ein gemäß der taktischen Lage passendes Auftragsselement zum Anflug verwendet.

Das Auftragsselement „Korridor durchqueren“ soll an einem Korridor beginnen.

Auch hier soll sichergestellt werden, dass das Durchqueren eines Korridors auch nur bei einem Korridor beginnt und der Anflug des Korridors nicht mit den für die Durchquerung vorgesehenen Anweisungsmodellen durchgeführt wird.

Existieren für einen zu befliegenden oder zu verlassenden Luftraum designierte Ein- oder Ausflughpunkte, so sind diese zu verwenden.

Diese Forderung verlangt, dass die UAVs sich an die grundlegende Luftraumordnung des Einsatzgebietes halten. Insbesondere soll in das Einsatzgebiet (engl.: helicopter operation area – HOA) nur an den vereinbarten Punkten ein- und ausgeflogen werden.

Die Forward Line of Own Troops (FLOT) ist nur an einem Korridor und nur mittels „Korridor durchqueren“ zu kreuzen.

Zur Koordinierung mit eigenen Luftabwehrstellungen darf die Grenze zwischen eigenem, sicheren Gebiet und potentiell bedrohtem Gebiet nur an den dafür vorgesehenen Korridoren durchquert werden.

Drei Wissensmodelle sind verantwortlich für die Analyse eines Auftrags (vgl. Abbildung 4-10) hinsichtlich dieser Einsatzgrundsätze:

- Das Umweltmodell `uavstate` instanziiert sich für jedes nicht erledigte Auftragsselement (von `task` abgeleitete Klassen) und repräsentiert den projizierten Zustand des UAVs nach der Erledigung dieses Auftragsselements. Zudem existiert für den aktuellen Istzustand des UAVs eine Instanz.
- Das Umweltmodell `task-precondition` instanziiert sich ebenfalls für jede nicht erledigte Instanz einer von `task` abgeleiteten Klasse und repräsentiert die konkreten Vorbedingungen für das Auftragsselement. Es verweist mit dem Attribut `uavstate` auf diejenige Instanz von `uavstate`, die – wenn keine Einsatzgrundsätze verletzt sind – die Vorbedingungen erfüllen soll.

- Der Wunsch **have-consistent-agenda** modelliert das Einhalten der obigen Einsatzgrundlagen. Er instanziiert sich zu einem aktiven Ziel, falls die durch **task-precondition** geforderten Vorbedingungen nicht durch den zugehörigen **uavstate** eingehalten werden. Ferner werden die Positionen, an denen sich das UAV vor und nach dem Auftragsselement voraussichtlich befinden wird, analysiert um unerlaubtes Durchqueren der FLOT oder von anderen Luftraumgrenzen zu detektieren.

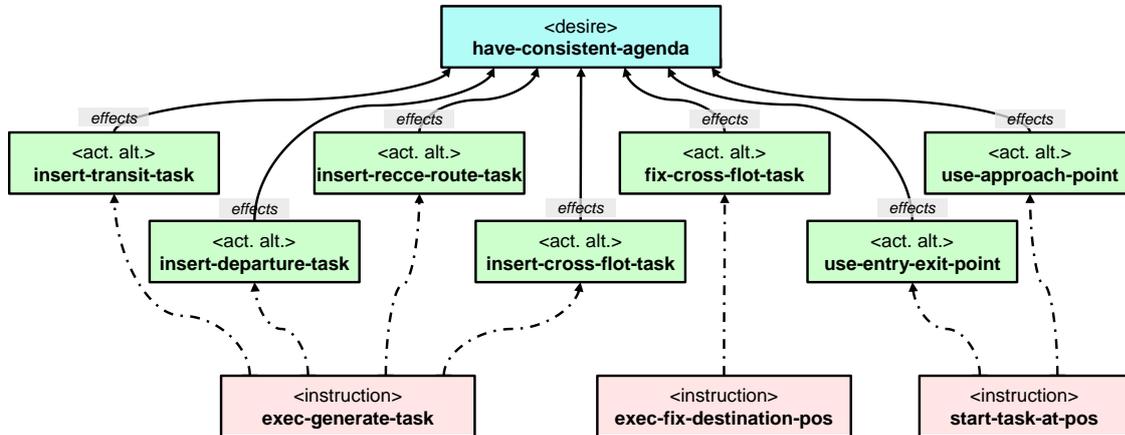


Abbildung 4-13: Means-Ends-Graph der Einhaltung der Einsatzgrundsätze

Das Zusammenwirken dieses Wissens soll im Folgenden anhand eines Beispiels verdeutlicht werden. In Abbildung 4-14 ist die Mensch-Maschine-Schnittstelle vor der Auftragsvergabe dargestellt.

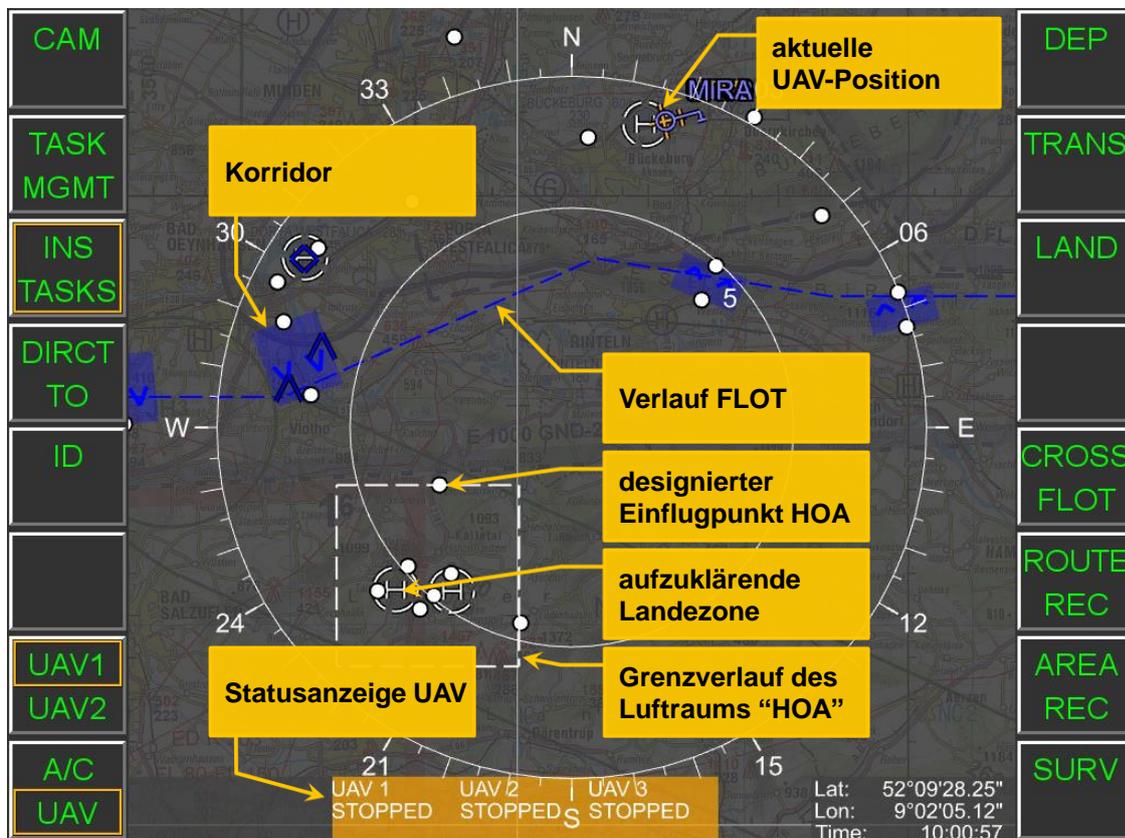


Abbildung 4-14: Ausgangslage vor Erteilung des Auftrags

In der dargestellten Situation erhält das UAV den Auftrag, die Landezone aufzuklären (in Abbildung 4-14 als „aufzuklärende Landezone“ und im Situationswissen mit „ISAR1“ bezeichnet).

Nach der Erteilung des Auftrags durch den Bediener fügt das UAV das entsprechende Auftragsselement in seine Agenda ein und meldet die neue Agenda an den Operateur zurück. Zugleich wird die Verletzung mehrerer Einsatzgrundsätze nach obigem Schema detektiert und gemeldet. In der Schnittstelle wird dies mit einem blau unterlegtem „UAV1 PLANNING“ visualisiert. Es ergibt sich die in Abbildung 4-15 abgebildete Statusanzeige.

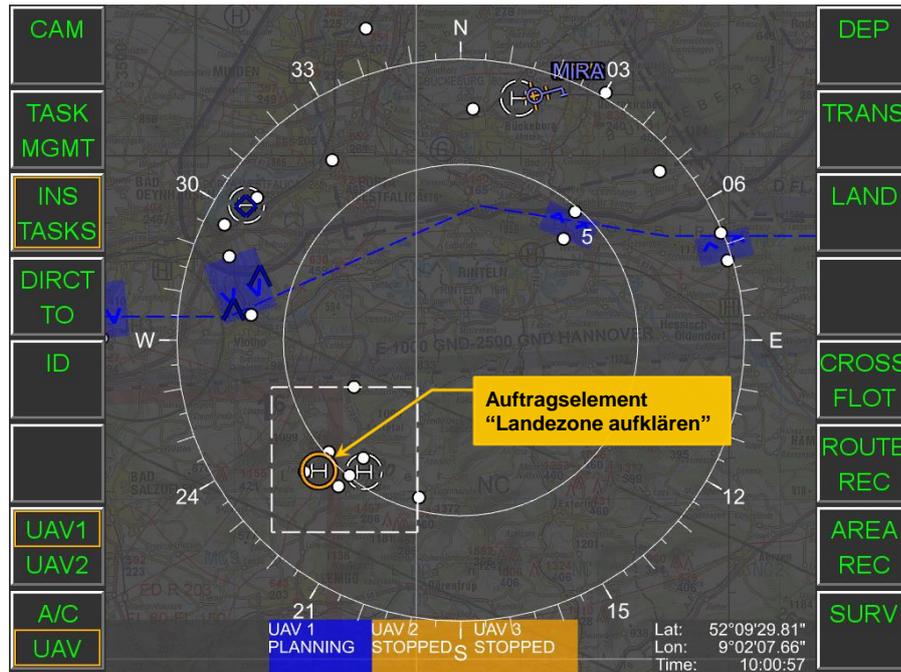


Abbildung 4-15: Situation nach Auftragserteilung

Ein Ausschnitt des zu diesem Zeitpunkt für die Darstellung der Agenda und der Erkennung der Verletzung von Einsatzgrundsätzen vorhandenen Situationswissens ist in Abbildung 4-16 dargestellt. Die beiden Instanzen von `uavstate` geben den aktuellen Zustand des UAVs sowie den projizierten Zustand nach Abarbeitung der Landezonenaufklärung wieder.

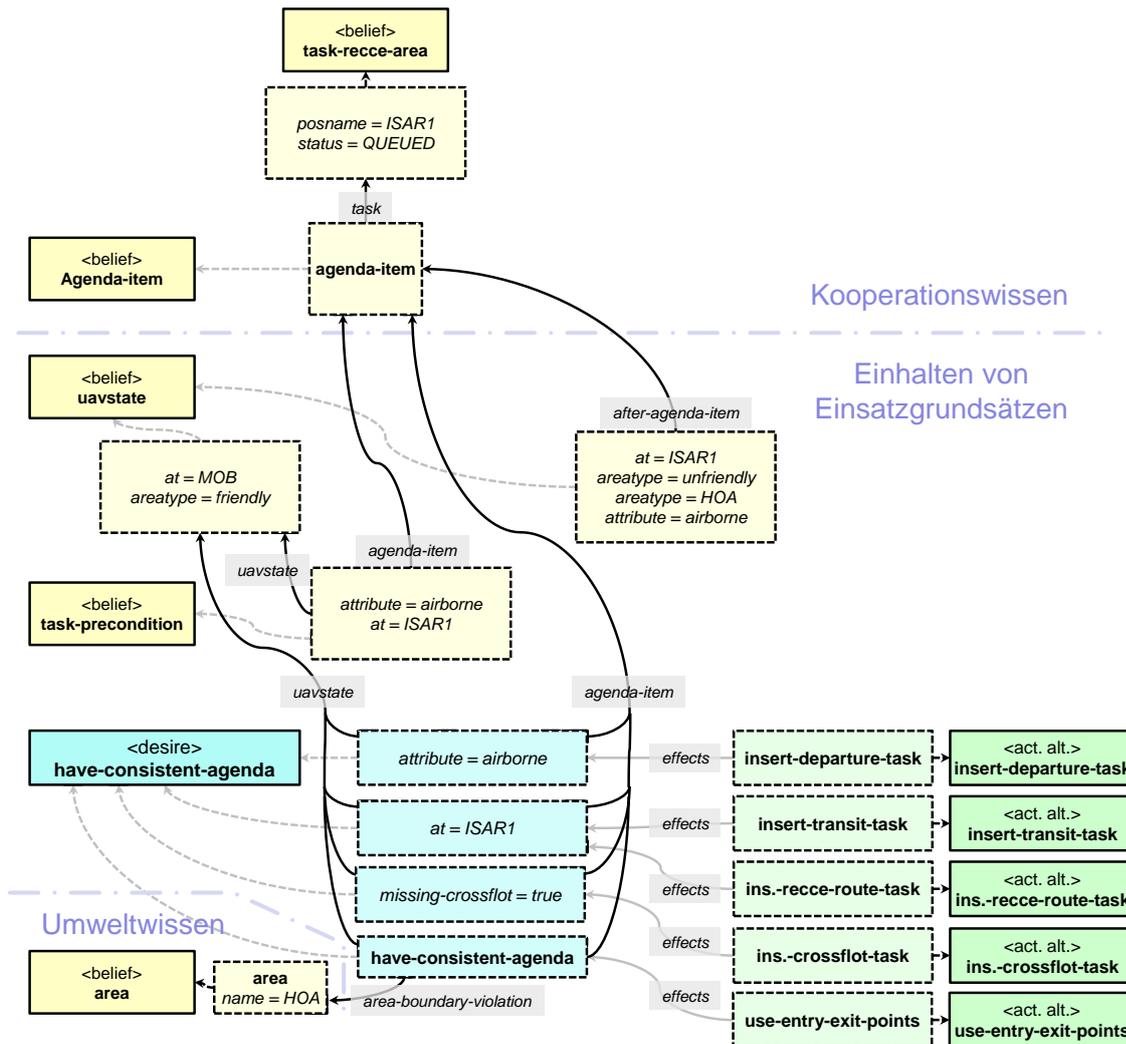


Abbildung 4-16: Wissen über mehrfache Verletzung der Einsatzgrundsätze

Wie in der Abbildung anhand der Instanzen von **have-consistent-agenda** zu erkennen, ist die Verletzung von vier Einsatzgrundsätzen erkannt worden:

- Das UAV sollte bei Beginn der Landezonenaufklärung bereits gestartet sein, *airborne* fehlt jedoch im aktuellen Zustand des UAVs und wird deshalb in der Instanz von **have-consistent-agenda** als fehlendes Attribut angemahnt. In der Folge dieser Zielaktivierung schlägt die Handlungsalternative **insert-departure-task** vor, die Inkonsistenz durch Einfügen einer Startprozedur in die Agenda zu beheben.
- Zu Beginn der Landezonenaufklärung sollte sich das UAV bereits in der Nähe der Landezone ISAR1 befinden. Im aktuellen Zustand befindet es sich jedoch an der Main Operation Base (Attribut *at=MOB* im *uavstate*). Zwei Handlungsalternativen schlagen sich zur Behebung dieses Zustands vor: **insert-transit-task** schlägt einen Transitflug zu ISAR1 vor, **insert-recce-route-task** schlägt vor, die Route zu ISAR1 aufzuklären.
- Da sich der Einstufung der Position vor und nach der Landezonenaufklärung von „friendly“ auf „unfriendly“ ändert, erkennt die ACU, dass die FLOT überquert wird. Da dies nicht in durch den dafür vorgesehenen Auftragsselementtyp **crossfлот** geschieht, aktiviert sich das Ziel **have-consistent-agenda** mit dem Attribut

missing-crossflot = *true*, um diese Verletzung der Einsatzgrundsätze zu beheben. Die dafür vorgeschlagene Handlungsalternative *insert-crossflot-task* schlägt vor, ein passendes *crossflot*-Element in die Agenda einzufügen.

- An den beiden Instanzen von *uavstate* kann erkannt werden, dass sich das UAV nach der Landezonenaufklärung in dem Gebiet HOA befindet, davor jedoch noch nicht. Da der Einflug in dieses Gebiet nicht an einem der bekannten Einflugpunkte beginnt bzw. überhaupt nicht explizit in der Agenda vorhanden ist, aktiviert sich eine Instanz von *have-consistent-agenda*, welche mit dem Attribut *area-boundary-violation* auf die Repräsentation des Luftraums verweist, dessen Grenzen verletzt werden. Die Handlungsalternative *use-entry-exit-points* schlägt vor, die Vorbedingungen für die Aufklärung der Landezone um den Start beim designierten Einflugpunkt der HOA zu ergänzen.

Für diese vier Verletzungen der Einsatzgrundsätze stehen somit insgesamt fünf verschiedene Handlungsalternativen zur Verfügung aus denen gewählt werden muss. Durch die möglichen Kombinationen dieser Handlungsalternativen ergibt sich der in Abbildung 4-17 skizzierte Suchraum.

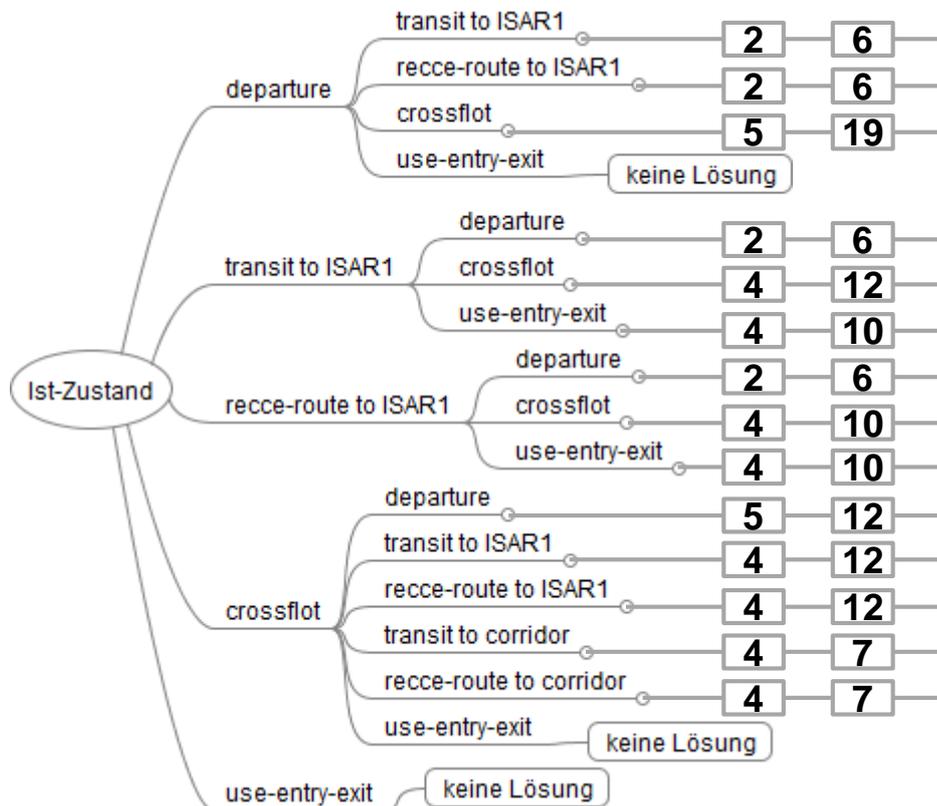


Abbildung 4-17: Suchraum für das Einhalten der Einsatzgrundlagen bei uninformatierter Suche

Die Abbildung zeigt ausgehend der in Abbildung 4-16 repräsentierten Situation die Anwendung der Handlungsmöglichkeiten. Für die jeweils dritte und vierte Handlungsalternative der möglichen Sequenzen ist aus Platzgründen nur noch die Anzahl der unterschiedlichen Möglichkeiten angegeben. Auch wenn im Ausgangszustand nur vier Verletzungen der Einsatzgrundsätze erkannt wurden, so reichen im Beispiel vier Handlungsalternativen nicht aus, um eine konsistente Agenda zu erreichen (keiner der Zustände in Abbildung 4-17 zeigt bereits eine konsistente Agenda). Der Grund dafür liegt darin, dass eine Handlungsalternative eine Verletzung der Einsatzgrundsätze nach sich ziehen kann, die ihrerseits behoben werden muss. Im Beispiel verlegt die

Handlungsalternative `use-entry-exit-points` den Anflug von ISAR1 auf den Einflugpunkt in die HOA vor, was bewirkt, dass eine evtl. schon erfüllte Vorbedingung „sei bei ISAR1“ anschließend nicht mehr erfüllt ist und erneut zu einer Aktivierung von `have-consistent-agenda` führt.

Aus folgenden Gründen ist das vollständige oder uninformierte Explorieren des Suchraums nicht zweckmäßig:

1. Wie im Beispiel angeführt, können Handlungsalternativen ihrerseits Inkonsistenzen in den Auftrags-elementen hervorrufen. Somit können Situationen mit einem *unendlich großen Suchraum* nicht ausgeschlossen werden.
2. Stehen für eine Verletzung der Einsatzgrundsätze mehrere Handlungsalternativen zur Verfügung, so soll die taktisch sinnvollste Alternative gewählt werden. Im Beispiel kann das Gebiet „ISAR1“ erreicht werden, indem es mit einem Transitflug oder unter der Aufklärung der Route angefliegen wird. (vgl. Handlungsalternativen in Abbildungen 4-16 und 4-17).
3. Handlungsalternativen können in eine Sackgasse führen. Wird im Beispiel `use-entry-exit-point` als erste Alternative gewählt, so würden die Vorbedingungen der Landezonenaufklärung um das Attribut `at=HOA_ENTRY` erweitert und das UAV müsste zu Beginn der Landezonenaufklärung bei `HOA_ENTRY` und bei ISAR1 gleichzeitig sein.

Um diesen Problemen zu begegnen, die Suche zu beschleunigen und den Suchraum zu begrenzen, wird eine *informierte Suche* durchgeführt. Folgendes *Selektionswissen* wird daher zur Auswahl der geeignetsten Handlungsalternative herangezogen:

1. Beginnt ein `crossfлот`-Auftrags-element nicht an einem Korridoreinflugpunkt, so ist die Wahl eines geeigneten Korridors für das Auftrags-element die beste Handlungsalternative.
2. Steht die Handlungsalternative `insert-crossfлот-task` zur Verfügung, so wird sie – falls Punkt 1 nicht greift – als beste Handlungsalternative ausgewählt. Diese Heuristik verfolgt das *Teile-und-Herrsche-Prinzip* (engl.: *divide and conquer*), da durch das Einfügen eines `crossfлот`-Auftrags-elementes die Liste der Auftrags-elemente in „Elemente über freundlichen Gebiet“ und „Elemente über bedrohtem Gebiet“ eindeutig getrennt werden kann.
3. Für eine einzelne Verletzung eines Einsatzgrundsatzes (Instanz von `have-consistent-agenda`) ist `insert-transit-task` die beste Alternative, wenn diese Alternative überhaupt möglich ist und sich der Zielpunkt des Transits auf freundlichem Gebiet befindet.
4. Für eine einzelne Verletzung eines Einsatzgrundsatzes ist `insert-recceroute-task` die beste Alternative, wenn diese überhaupt möglich ist und der Zielpunkt auf potentiell bedrohtem Gebiet liegt.
5. Um unmögliche Vorbedingungen zu vermeiden, wird `use-entry-exit-points` nur dann ausgewählt, wenn keine anderen Handlungsalternativen möglich sind.

Mit diesem in den Handlungsalternativen hinterlegten Wissen reduziert sich der Suchraum. Abbildung 4-18 zeigt den *vollständigen Suchraum* nach der Anwendung dieses Selektionswissens.

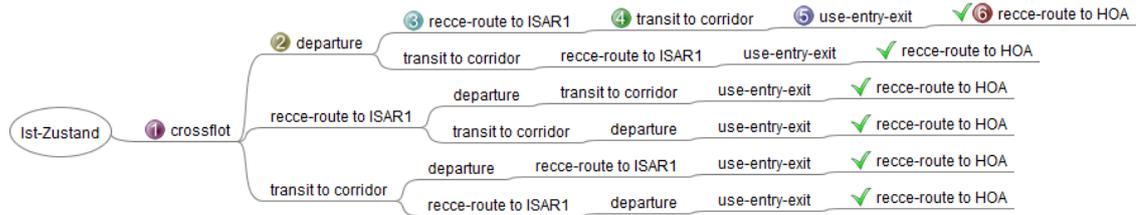


Abbildung 4-18: Suchraum nach Anwendung des Selektionswissens

Die einzelnen Wege zu einer den Einsatzgrundsätzen entsprechenden Agenda (in der Abbildung mit einem grünen Häkchen gekennzeichnet) unterscheiden sich lediglich in der Reihenfolge des Einfügens von Startprozedur (departure), Anflug des Korridors (transit to corridor) und der Aufklärung einer Route zur Landezone ISAR1 (recce-route to ISAR1). Da diese Handlungsalternativen räumlich unabhängig voneinander sind, führen alle Wege zu einer identischen Lösung.

Im betrachteten Beispiel wurde zuerst die Handlungsalternative **insert-crossfлот** gewählt. Abbildung 4-19 zeigt das nach dem Einfügen des **crossfлот**-Auftragsselements resultierende Situationswissen:

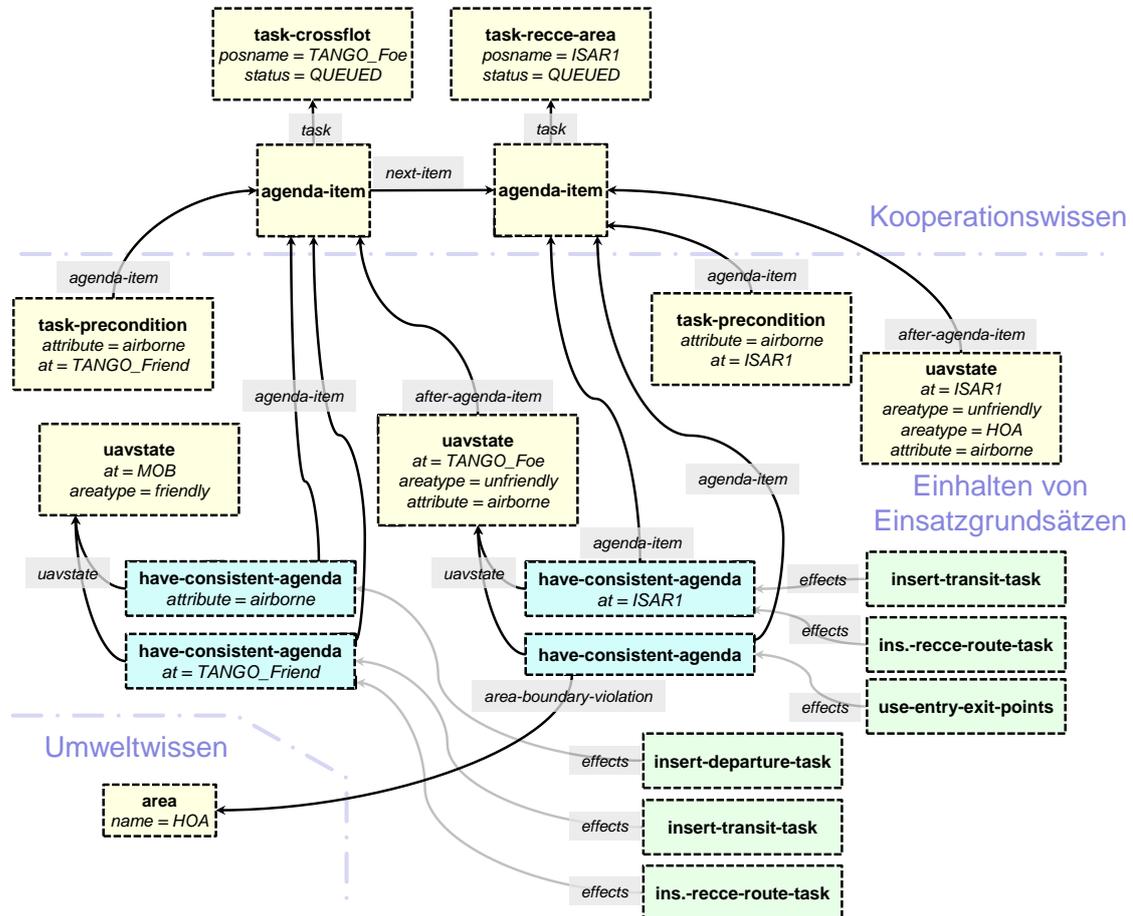


Abbildung 4-19: Wissen um Verletzung der Einsatzgrundsätze nach Einfügen des crossfлот-Elements

Durch das Einfügen des Auftragsselements **task-crossfлот** wurde die Verletzung des Einsatzgrundsatzes die FLOT immer an einem Korridor zu durchqueren behoben. Zugleich müssen jedoch die Vorbedingungen für die Nutzung des Korridors eingehalten werden, was sich in einer neuen Instanz von **task-precondition** widerspiegelt, welche verlangt, dass sich das UAV vor der Durchquerung des Korridors an dessen Startpunkt (im Beispiel durch das Attribut *at=TANGO_Friend*) befindet.

Aus Gründen der Übersichtlichkeit sind die weiteren Schritte (Nummer 3 bis 6 in Abbildung 4-18) zur Wahrung der Einsatzgrundsätze in ihrem in der Mensch-Maschine-Schnittstelle sichtbarem Ergebnis dargestellt.

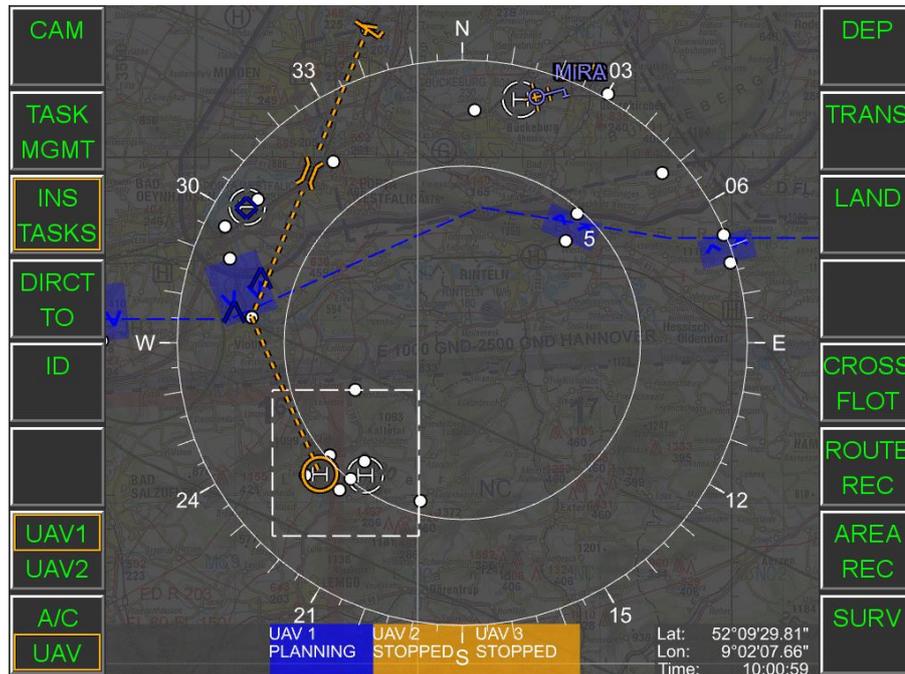


Abbildung 4-20: Situation nach Einfügen des Departure-Elements

Wie in Abbildung 4-20 ersichtlich, verbleiben nach dem Einfügen einer Instanz von **task-departure** in die Agenda noch Verletzungen der Einsatzgrundsätze, nämlich (1) eine Durchquerung des Korridors (Brückensymbol), die nicht am Korridor beginnt, (2) die Verletzung der Luftraumgrenzen der HOA (weiß gestrichelte Linie) und (3) das Fehlen eines geeigneten Auftragses, um die aufzuklärende Landezone anzufliegen. Letztere wird im nächsten Schritt durch die Handlungsalternative **insert-recce-route-task** behoben und führt zu der in Abbildung 4-21 gezeigten Situation.

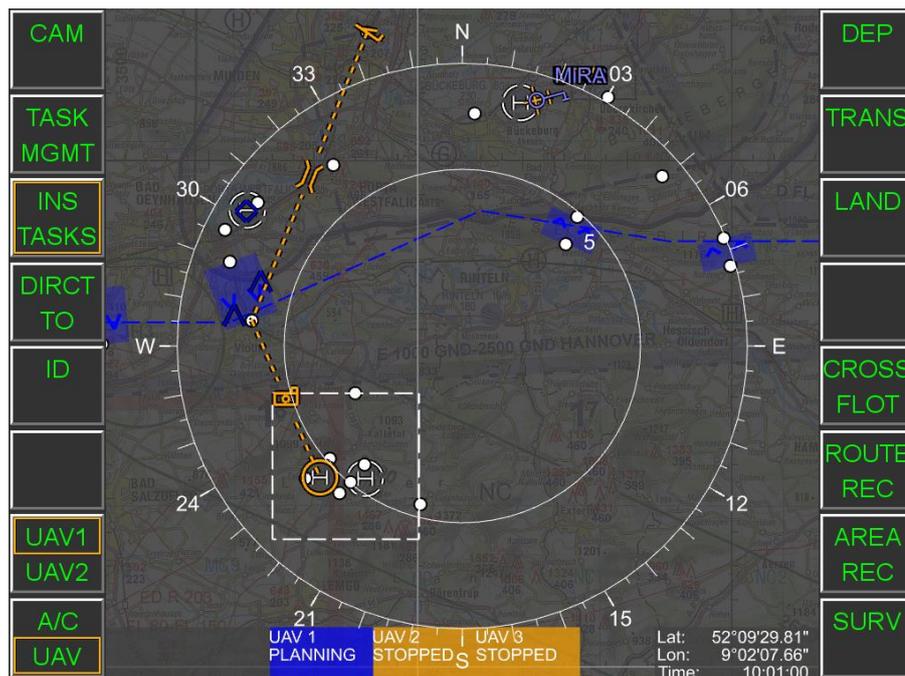


Abbildung 4-21: Situation nach Ergänzen der Routenaufklärung zum Zielgebiet

Im Gegensatz zum Anflug des Zielgebiets wird für den Anflug des Korridors die Option eines Transitfluges (Handlungsalternative **insert-transit-task**) gewählt, da der Anflug über ausschließlich bedrohungsfreiem Gebiet erfolgen kann:

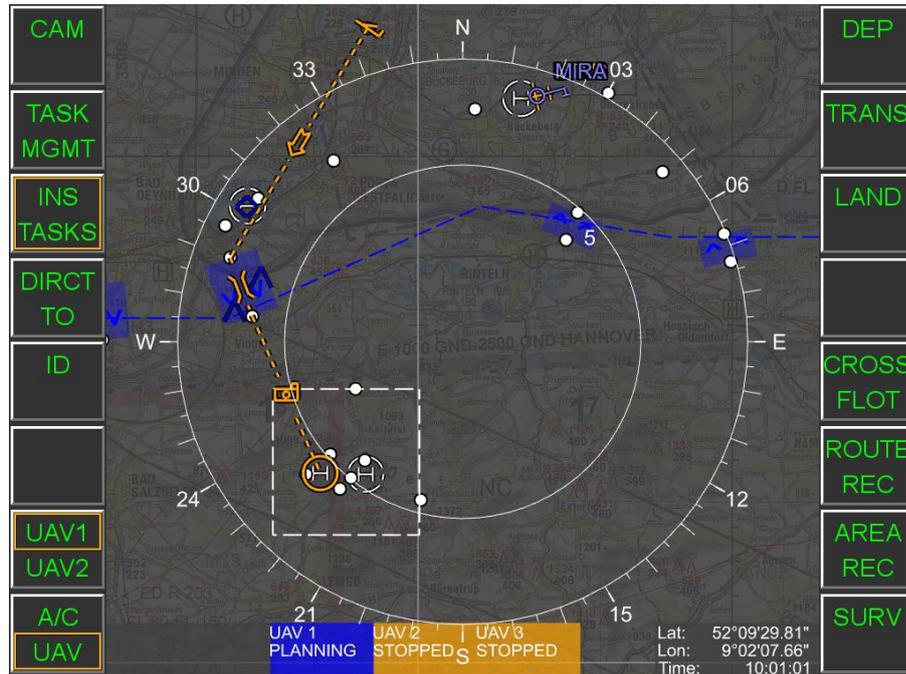


Abbildung 4-22: Situation nach Ergänzung des Transitflugs zum Korridor

Die Nutzung des Einflugpunkts in die Helicopter-Operation-Area (HOA) und die Ergänzung der Routenaufklärung von dort zur Landezone führt schlussendlich zu einer Situation, die im Einklang mit den Einsatzgrundsätzen steht:

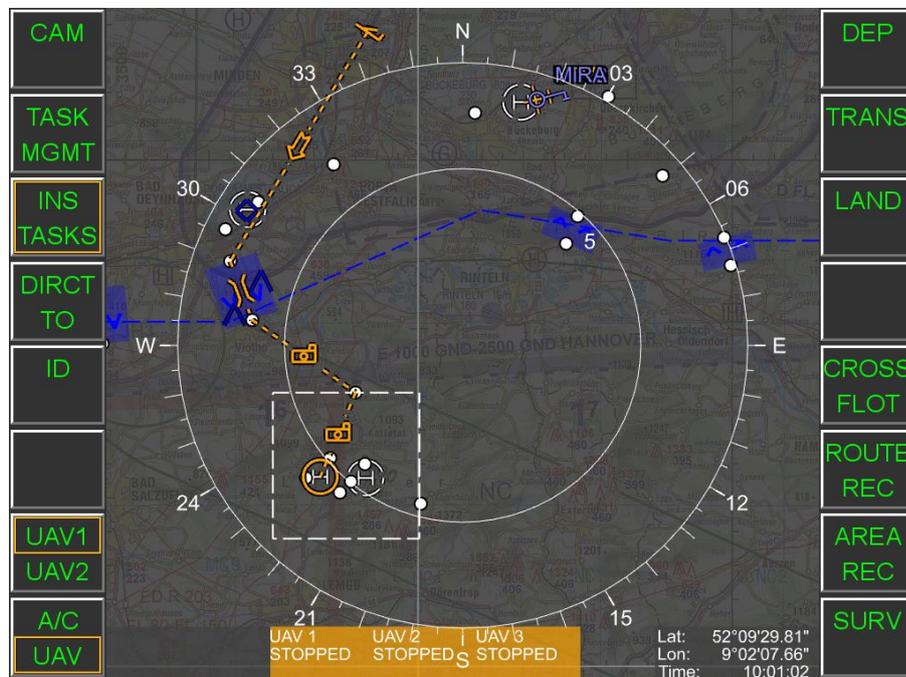


Abbildung 4-23: Ergebnis der automatischen Wahrung der Einsatzgrundsätze durch die UAV-ACU

Es zeigt sich anhand dieses Wissenspakets, wie operationelles Wissen direkt im System hinterlegt werden kann. In der Folge verhält sich das wissensbasierte System gemäß den

angeführten operationellen Einsatzgrundsätzen und arbeitet zielgetrieben auf deren Einhaltung hin.

4.6.2.8 Einreihen neuer Auftrags Elemente

Der Operateur kann bei der Vergabe neuer Auftrags Elemente optional ein bereits vorhandenes Auftrags Element als Vorgänger wählen. Alternativ überlässt der Operateur der ACU die Wahl, an welcher Stelle das neue Auftrags Element in die Agenda einzufügen ist.

In der Folge muss die ACU über das Wissen verfügen, an welcher Stelle ein neues Auftrags Element einzufügen ist. Die beiden wesentlichen zu beachtenden Aspekte hierbei sind die *Erwartungskonformität* [DIN EN ISO 9241] sowie die *taktisch sinnvolle Einreihung* von neuen Auftrags Elementen.

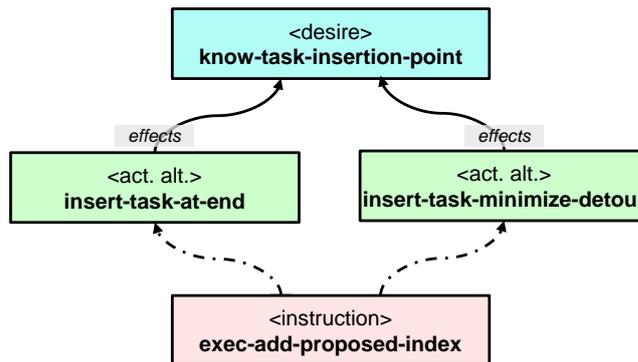


Abbildung 4-24: Ziel-Mittel-Graph zur Einreihung neuer Auftrags Elemente

Wie in Abbildung 4-24 dargestellt, stehen zwei Handlungsalternativen zur Auswahl, um den Einfügepunkt zu bestimmen. **insert-task-at-end** schlägt vor, das neue Auftrags Element an das Ende der Agenda zu stellen. **insert-task-minimize-detour** wird nur aktiv, wenn es sich nicht um ein Auftrags Element zum Start oder zur Landung handelt und schlägt vor, das Auftrags Element so in die bisherige Agenda einzufügen, dass der Gesamtflugweg minimiert wird. Stehen beide Handlungsalternativen zur Verfügung, so wird die Instanz von **insert-task-minimize-detour** gewählt.

Das Anweisungsmodell **exec-add-proposed-index** fügt der Anweisung zum Einfügen eines neuen Auftrags Elements den Einfügeort gemäß der ausgewählten Handlungsalternative ein Attribut hinzu, das den Ort des neuen Auftrags Elements in der Agenda kennzeichnet.

4.6.2.9 Wissen für rollenbasiertes Verhalten

Bei der Übertragung eines auf Rollen basierenden Verhaltens auf die UAVs im Sinne von Abschnitt 3.7 sollen folgende Designziele erreicht werden:

- Haben mehrere UAVs identische Auftrags Elemente in ihrer Agenda, so sollen diese *kooperativ* ausgeführt werden.
- Dazu *koordinieren* sich alle an der gemeinsamen Aufgabe beteiligten UAVs.
- Das Ziel der Koordination ist eine der Art der Aufgabe und Anzahl beteiligter UAVs angemessene *Rollenzuweisung*.
- Da der Umgang mit Rollen unbewusst ist, soll er auch in ihrer maschinellen Umsetzung *ohne Bedieninteraktion erfolgen* und für den Operateur transparent sein.

Das im allgemeinen Kooperationswissen (Abschnitt 4.6.2.6) enthaltene Ziel zur Mitteilung teamrelevanter Informationen bewirkt bereits, dass sich alle UAVs gegenseitig über Änderungen der Auftrags Elemente und der darin wahrgenommenen Rollen unterrichten. Somit besitzt jedes Fluggerät das Wissen über alle im Team vorhandenen Auftrags Elemente und deren Zuordnung zu den Akteuren. Anhand des Typs, des Ortes und – bei Transitflügen und der Routenaufklärung – des Startpunktes eines Auftrags Elements können die beteiligten Akteure unabhängig voneinander feststellen, dass sie das Auftrags Element gemeinsam bearbeiten.

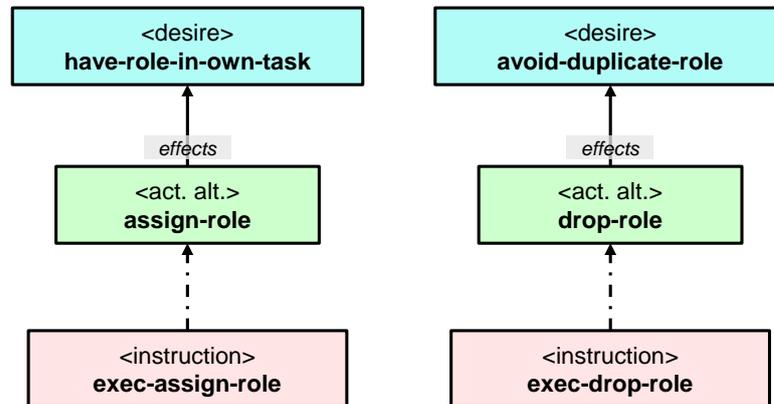


Abbildung 4-25: Ziel-Mittel-Graph der eindeutigen Rollenzuweisung

Das Fundamentalziel **have-role-in-own-task** wird für jedes eigene Auftrags Element aktiviert, dem noch keine Rolle zugeordnet ist. Eine oder mehrere Instanzen der Handlungsalternative **assign-role** schlagen daraufhin je eine für die bekannte *Anzahl der Akteure und Art der Aufgabe* passende Zuweisung einer noch nicht besetzten Rolle vor. Bei mehreren möglichen Instanzen dieser Handlungsalternative wird Auswahlwissen verwendet, um eine Zuordnung zu erhalten. So wird zur Vermeidung kreuzender Flugwege bei Transitflügen und Routenaufklärung die Rolle präferiert, die bereits beim unmittelbar vorhergehenden Auftrags Element desselben Typs wahrgenommen wurde. Kann bei mehreren möglichen Rollen kein Auswahlwissen angewendet werden, so wird eine Zufallsauswahl getroffen.

Da die Rollenzuweisung auf mehreren UAVs parallel erfolgen kann, kann es durch Verzögerungen in der Mitteilung zu identischen Rollenzuweisungen in einem gemeinsam zu bearbeitenden Auftrags Element kommen. Eine solche, fehlerhafte Rollenzuweisung wird auf den beteiligten UAVs detektiert, nachdem sich diese gegenseitig die Rollenzuweisungen mitgeteilt haben. Diese Erkennung erfolgt im Fundamentalziel **avoid-duplicate-role** und führt zu dessen Aktivierung. Die Handlungsalternative **drop-role** schlägt daraufhin vor, die *eigene* Rolle aufzugeben. In der Folge wird **have-role-in-own-task** erneut aktiv und eine alternative Rolle ausgewählt.

Durch diesen, ggf. in mehreren Iterationen ablaufenden, Mechanismus wird eine konfliktfreie Zuordnung der Rollen zu den Akteuren erkannt. Dieser Zustand kann bei allen Beteiligten dadurch detektiert werden, dass keiner der in Abbildung 4-25 dargestellten Wünsche aktiv ist. Bei der weiteren Ausplanung der Auftrags Elemente und deren Ausführung kann das Wissen um die Rollenzuordnung verwendet werden, um das Auftrags Element gemäß der aktiven Rolle abzuarbeiten.

Abbildung 4-26 zeigt die Umweltmodelle, die an der Rollenzuweisung beteiligt sind und exemplarisch deren Instanzen für die Zuordnung der Rollen für eine gemeinsame Routenaufklärung durch UAV1 und UAV2 aus der Sicht von UAV1.

4.7 Subsymbolische Wissensverarbeitung

“... any system (human or machine) exhibiting intelligence must operate by manipulating data structures composed of symbols. We will later see that this hypothesis has been challenged from many directions.” [Russell und Norvig 2010]

Für die Klassifizierung eines Agenten anhand seines Aufgabenkontexts (engl.: „task environment“ nach [Russell und Norvig 2010]) werden die Aspekte der Leistungsmaße, der Umweltcharakteristika, der zu nutzenden Aktuatoren und der zur Verfügung stehenden Sensoren betrachtet [Russell und Norvig 2010]. Während auf die Leistungsmaße bei der Evaluierung in Kapitel 5 näher eingegangen wird, behandelt dieser Abschnitt die Auswirkungen der verbleibenden drei Charakteristiken.

4.7.1 Motivation

Bei der Betrachtung der Umweltcharakteristiken eines Agenten schlagen [Russell und Norvig 2010] folgende Kriterien zur Beurteilung vor:

- Je nachdem, ob ein Softwareagent die Möglichkeit hat, alle für ihn relevanten Merkmale seiner Umwelt vollständig zu erfassen, wird diese Umwelt als *vollständig beobachtbar* oder *teilweise beobachtbar* bezeichnet.
- Kann aus dem aktuellen Zustand der Umwelt und der eigenen Handlung des Agenten die weitere Entwicklung der Umwelt vollständig vorhergesagt werden, so handelt es sich um eine *deterministische* Umwelt, ansonsten um eine *stochastische* Umwelt.
- Haben die vorherigen Aktionen des Agenten keine Auswirkung auf die Entwicklung der Umwelt, so wird diese als *episodisch* bezeichnet. Hängt die Entwicklung der Umwelt jedoch von der Sequenz der bisherigen Aktionen ab, so ist diese *sequentiell*.
- Eine Umwelt, die sich ohne Aktionen des Agenten nicht ändert, wird als *statisch* bezeichnet. Können Umweltänderungen auftreten während der Agent nichts tut bzw. lediglich interne Berechnungen durchführt, so ist die Umwelt *dynamisch*.
- Finden in der Umwelt Veränderungen nur im Übergang zwischen diskreten Zuständen statt, so ist diese *diskret*. Können Veränderungen jederzeit und kontinuierlich stattfinden, so wird auch die gesamte Umwelt als *kontinuierlich* bezeichnet.
- Mittels des letzten Kriteriums wird unterschieden, ob sich bei dem Agenten um den einzigen in seiner Umwelt handelt (engl.: *single-agent*) oder ob sich weitere (engl.: *multi-agent*), kooperative oder konkurrierende Agenten in der Umwelt befinden.

“As one might expect, the hardest case is partially observable, stochastic, sequential, dynamic, continuous, and multiagent.” [Russell und Norvig 2010]

In dieser von Russel und Norvig als schwierigste aller möglichen Umwelten bezeichneten Umgebung befindet sich das unbemannte Fluggerät. Durch seine Sensoren kann es immer nur einen Teil der für ihn relevanten Umwelt erfassen, die Umwelt kann sich spontan ändern durch die Aktionen anderer Einheiten und Wettereinflüsse, vergangene Handlungen bestimmen wesentlich den aktuellen Zustand und den weiteren Verlauf der Ereignisse, alle Einheiten inkl. des UAVs selbst bewegen sich

kontinuierlich und in der Umwelt gibt es sowohl kooperative bemannte und unbemannte als auch möglicherweise feindliche Einheiten.

Für eine auf der Verarbeitung von diskretem, symbolischen Wissen, wie sie in Kapitel 3 gefordert und beginnend in Abschnitt 4.1 beschrieben wird, muss jedoch die Umweltrepräsentation in einer Form erfolgen, die

1. sich mit *diskreten* Symbolen repräsentieren lässt.
2. innerhalb der Zeitspanne zwischen Sensorinformationsaufnahme und Handlung als *statisch* angenommen werden darf. In dieser Zeitspanne soll die Umwelt ohne negative Konsequenzen als *diskret* betrachtet werden können.
3. zumindest für die Planung eigener Aktionen Schlüsse über die vermutete Entwicklung der betroffenen Teile der Umwelt erlaubt. Die Umwelt soll die eigenen Handlungen betreffend als *deterministisch* angenommen werden dürfen.

Um den menschlichen Bediener – die Operating Force im Arbeitssystem – zu entlasten, soll aus dessen Sicht die Auftragszuweisung an das UAV ebenfalls deterministisch, statisch und diskret sein. Auf eine Auftragsvergabe reagiert das Fluggerät daher vorhersehbar in Bezug auf die aktuelle Situation. Es wird den Auftrag am Stück durchführen, so dass für den Menschen der entsprechende Zeitraum als diskret und nichtkontinuierlich in Bezug auf die Auftragsausführung angenommen werden kann. Ferner kann das UAV in diesem Zeitabschnitt als statisch betrachtet werden, da sich die relevante Eigenschaft „mit Auftragsdurchführung beschäftigt“ nicht ändert.

Umwelt	Sicht der symbolischen Wissensverarbeitung	Sicht der Operating Force
teilweise beobachtbar	teilweise beobachtbar	teilweise beobachtbar
stochastisch	deterministische Planungsannahmen	Determinismus auf Auftragsebene
sequentiell	sequentiell	sequentiell
dynamisch	statisch für kleine Δt	statisch bzgl. der Auftragszuweisung
kontinuierlich	diskrete Handlungsschritte	diskrete Aufträge
multi-Agent	multi-Agent	multi-Agent

Tabelle 4-1: Sicht auf die Umwelt durch symbolischen Wissensverarbeitung und Operating Force

In Tabelle 4-1 sind die Unterschiede zwischen den tatsächlichen Umwelteigenschaften und den Sichtweisen der symbolischen Wissensverarbeitung und der Sicht der Operating Force auf eine auftragsbasiert geführte Einheit nochmals zusammengefasst.

Während das Konzept der auftragsbasierten Führung die Umweltabstraktion der Operating Force stützt, soll im Folgenden beschrieben werden, wie die Interaktion zwischen der Umwelt und der symbolischen Wissensverarbeitung nach obigen Kriterien realisiert werden kann.

4.7.2 Umsetzung

Die Umsetzung der Schnittstelle zwischen Umwelt und symbolischer Wissensverarbeitung orientiert sich – wie die symbolische Wissensverarbeitung selbst – an den in Abschnitt 4.1.1 vorgestellten Modellen menschlicher Kognition, insbesondere dem in Abbildung 4-1 dargestellten Rasmussen-Schema.

Während Putzer in [Putzer 2004] die Umsetzung von Sensorwerten in symbolische Eingangsdaten der Eingangsschnittstelle und analog die Umsetzung symbolischer Anweisung in Effektorenkommandos der Ausgangsschnittstelle zuweist (vgl. Abbildung 4-2), erweitern Onken und Schulte in [Onken und Schulte 2010] den Kognitiven Prozess derart, dass subsymbolisches Wissen (engl.: *“sensations”* nach [Onken und Schulte 2010]) durch die Eingangsschnittstelle eingelesen und vorgehalten wird und erst danach in einem ersten Verarbeitungsschritt – der Merkmalsbildung – in Symbole umgesetzt werden. Ebenso werden symbolische Anweisungen anhand sensomotorischer Muster in Signale für die Effektoren umgesetzt.

Diese Erweiterung des Kognitiven Prozesses entspricht dem fertigkeitbasierten Verhalten im Modell menschlicher Kognition (vgl. [Onken und Schulte 2010] und Abschnitt 4.1.1). Sie ist nicht zu verwechseln mit der Bildung des Kontexts zu bereits symbolisch vorliegendem Wissen. Dies ist bereits bei Putzer vorgesehen und entspricht der Identifikation nach Rasmussen (vgl. „Merkmalsbildung“ und „Identifikation“ in Abbildung 4-1). Zusätzlich können spezielle Algorithmen wie Routenplaner ebenfalls als Fertigkeiten modelliert und so angebunden werden.

Da wie in [Onken und Schulte 2010] gefordert, das Situationswissen unabhängig von seiner konkreten Codierung für alle Verarbeitungsschritte des Kognitiven Prozesses verfügbar sein muss, ist eine *gegenseitige Referenzierung* von symbolischen und subsymbolischen Wissen notwendig. Bei der Merkmalsbildung werden deshalb aus den numerisch vorliegenden Eingangsdaten Symbole wie „in der Nähe von“, „in Sensorreichweite“, „Position „Homebase““ oder „angeforderte Flugtrajektorie zu Position HOA_E“ generiert, welche in sensomotorischen Mustern als Schlüsselattribut für das zugehörige, subsymbolisch codierte Wissen dient.

Folgendes Beispiel soll diesen Zusammenhang verdeutlichen:

Die ACU kennt als symbolisch codiertes Situationswissen die Positionen „Landezone ISAR1“ und „Landezone ISAR2“. Für die Abarbeitung eines Auftrags benötigt es eine bedrohungsminimale Route zwischen diesen beiden Positionen (aktives Ziel **have-flightplan**, vgl. Abschnitt 4.6.2.5).

Das Anweisungsmodell, das diesen Flugplan erstellt, generiert die symbolische Information, eine Route zwischen „ISAR1“ und „ISAR2“ zu erstellen, ggf. wird der Routenplaner darüber informiert, in welcher Rolle das UAV in diesem Flug eingesetzt wird (vgl. Abschnitt 4.6.2.9). Der Routenplaner nutzt die symbolische Information, um mit diesen Positionen als Zugriffsschlüssel die lateralen, numerischen Koordinaten von ISAR1 und ISAR2 zu bestimmen. Ferner kann er die Symbole aller Bedrohungen auslesen und nutzen, um deren Geositionen und Reichweiten zu ermitteln. Aus der Rolle kann ggf. der geforderte, seitliche Abstand zur Mittellinie gefolgert werden. Mit diesen Informationen wird eine Flugroute erstellt und als Wegpunktliste im Situationswissen abgelegt. Zugleich wird für die Merkmalsbildung ein neues Symbol generiert, das die Verfügbarkeit der bedrohungsfreien Route anzeigt.

Die wissensverarbeitende Ebene kann diese neue symbolische Information interpretieren und zur Überzeugung (im Sinne von Abbildung 4-2) gelangen, dass alle Voraussetzungen für den Abflug der Strecke erfüllt sind. Das daraufhin aktivierte Anweisungsmodell `exec-flyroute` (Abschnitt 4.6.2.5) generiert die symbolische Anweisung zum Abflug der generierten Route. Das zugehörige sensomotorische Muster nutzt den Namen der Route als Schlüsselattribut, um die Wegpunktliste zu erhalten, lädt diese in das Flugmanagementsystem des UAVs und aktiviert sie.

Durch die gegenseitige Referenzierung unterschiedlicher Repräsentationen und Abstraktionen desselben Wissens wie der im Beispiel angeführten Flugroute, können somit die allgemeine Systemarchitektur COSA als auch spezielle Algorithmen wie der erwähnte Routenplaner interagieren.

Die in Tabelle 4-1 angestrebte Sicht der wissensbasierten Verarbeitung auf die Umwelt wird dadurch erreicht, dass diskrete Handlungen, wie das Kommandieren einer Flugroute zu einer kontinuierlichen Umsetzung – dem Abflug einer Trajektorie – führen. Dadurch erscheint ein dynamischer Vorgang mit den sich kontinuierlich ändernden Koordinaten, Höhen und Geschwindigkeiten für die wissensbasierte Verarbeitung als statisch. Da hochfrequente Regelungen ebenfalls in den sensomotorischen Mustern bzw. der nachgelagerten Automation erfolgen, kann die symbolisch arbeitende Schicht unter der Annahme planen, dass Anweisungsmodelle zum beabsichtigten Ergebnis führen. Nur durch diese Annahme ist Planen überhaupt möglich. Entwickelt sich die Umwelt im Widerspruch zu dieser Annahme, weil etwa eine neue Bedrohung entlang der Route entdeckt wird, so ist es die Verantwortung der Merkmalsbildung, ein Symbol zu generieren, aus dem sich interpretieren lässt, dass die ursprüngliche Annahme nicht mehr zutrifft.

Da ein Symbol per Definition eine diskrete Beschreibung darstellt, werden in der Merkmalsbildung benannte Bereiche für numerische Parameter definiert. So beschreibt das Symbol „in Sensorreichweite“ die Menge aller räumlichen Beziehungen, in denen die Bordsensorik eine bestimmte Position erfassen kann. Das Symbol wird bei Eintritt in die Sensorreichweite durch die Merkmalsbildung erstellt und erst beim Verlassen gelöscht. Aus der Sicht der Symbolverarbeitung ändert sich dieser Aspekt der Umwelt währenddessen nicht und *erscheint als diskreter Zustand*.

Trifft ein Merkmal der Umwelt nicht mehr zu, so werden durch das Truth-Maintenance-System der kognitiven Systemarchitektur (vgl. Abschnitt 4.6.1) auch alle auf diesem Merkmal basierenden Überzeugungen, Ziele und Pläne entfernt. Da es sich dabei um einen rekursiven Vorgang handelt, läuft eine sog. „Retract-Welle“ durch den symbolischen Anteil des Wissens, bis das gesamte auf diesem Merkmal basierende Wissen gelöscht ist. Umgekehrt muss dieses entfernte Wissen wieder neu aufgebaut werden, wenn das Umweltmerkmal erneut zutrifft. Da beide Operationen in ihrem Rechenzeitbedarf aufwendig sind, wurde durch geeignete *Hysteresen* in der Merkmalsbildung erreicht, dass sich Umweltmerkmale nur mit einer Frequenz ändern, deren Periodendauer deutlich über der für die Retract-Welle und den Wiederaufbau nötigen Zeit liegt. Ferner signalisiert der symbolverarbeitende Teil der ACU, ob aktuell Transformatoren des Kognitiven Prozesses aktiv sind. Der Merkmalsbildung steht diese Information zur Verfügung, so dass die Neugenerierung von Symbolen zugunsten der Stabilisierung symbolischen Wissens verzögert werden kann. Dieses Verhalten simuliert – wenn auch primär aus technischen Gründen – die beim Menschen zu beobachtende, verringerte Aufmerksamkeit bei hoher kognitiver Beanspruchung.

Dadurch kann die Merkmalsbildung aktiv die nachteilige, retroaktive Inferenz (vgl. Abschnitt 3.6.1 sowie [Wohldmann et al. 2008]) unterbinden.

4.8 Mensch-Maschine-Schnittstelle

Alle Interaktionen zwischen dem als UAV-Operator agierenden Kommandanten und den UAVs erfolgen über die beiden linken Touchscreens (vgl. Abbildung 5-2) vor dem Kommandantensitz.

Jede Interaktion bezieht sich auf ein *aktuell selektiertes UAV*, welches durch die zweitunterste Schaltfläche in der linken Leiste gewählt werden kann (vgl. Abbildung 5-3 mit UAV1 als selektiertem UAV).

4.8.1 Sensorsicht

In der UAV-Sensorsicht (CAM-Modus) wird kontinuierlich das Videobild der simulierten Infrarotkamera des UAVs auf dem Display dargestellt. Die Kamera kann in verschiedenen Betriebszuständen agieren, in denen sie (1) in Flugzeuglängsachse ausgerichtet ist (FORW), (2) frei durch Antippen des Sensorbildes schwenkbar ist (FREE ANGLE), (3) senkrecht nach unten ausgerichtet ist (MAP GND) oder (4) auf einen erdfesten Punkt ausgerichtet ist (TRACK TARGT).

In der Betriebsart (3) werden durch die Kameras Standbilder generiert, die als Bodenkacheln an den Helikopter übertragen werden und dort in die Kartendarstellungen für Pilot und Kommandant eingezeichnet werden. Befinden sich im Bereich dieser Bilder vom Experimentator platzierte Fahrzeuge, welche nicht a priori im elektronischen Lagebild der Cockpitanzeigen dargestellt werden, so generiert eine simulierte ATR-Funktion (engl.: automated target recognition) ein neues, nicht klassifiziertes Objekt in der taktischen Lagedarstellung.

4.8.2 Auftragsverwaltung

In den beiden Displaybetriebsarten zur Manipulation bestehender Aufträge (TASK MGMT), Vergabe neuer Auftrags Elemente (INS TASK) werden die noch nicht abgearbeiteten Auftrags Elemente des aktuell selektierten UAVs in der Kartendarstellung visualisiert.



Abbildung 4-27: Vergabe von neuen Auftrags Elementen an UAV1

Abbildung 4-27 zeigt die Vergabe eines neuen Auftragslements nach Start der Simulation im Modus INS TASK an das aktuell selektierte UAV1. Die Vergabe eines neuen Auftragslements besteht in folgenden Schritten:

1. Selektion des UAVs, mit welchem interagiert werden soll
2. Auswahl der Art des Auftragslements
3. Selektion eines existierenden Auftragslements, hinter dem das neue Auftragslement in die Agenda eingereiht werden soll, in der Karte
4. Selektion des Zielpunkts bzw. des Zielbereichs des Auftragslements in der Karte

Schritt 1 ist nur nötig, falls das neue Auftragslement nicht an das bereits aktuell angewählte UAV vergeben werden soll. Schritt 3 ist optional. Entfällt er, so verwendet die ACU entsprechendes Wissen, um den geeigneten Einfügepunkt für das neue Auftragslement zu bestimmen (vgl. hierzu das in Abschnitt 4.6.2.8 dargestellte Wissenspaket).

Somit sind *meist nur zwei Bedienschritte notwendig*, um ein neues Auftragslement an ein UAV zu übertragen.

Der Anzeigemodus DIRCT TO (direct to) unterscheidet sich nur dadurch von INS TASK, dass unmittelbar vor dem Einfügen des neuen Auftragslements das UAV angewiesen wird, sämtliche bestehenden Auftragslemente aus der Auftragsagenda zu löschen. Diese Funktion wurde auf Anregung durch Heeresfliegerpiloten implementiert, um bei grundlegenden Änderungen der taktischen Lage die Anzahl der Bedienschritte zu minimieren.

In der in Abbildung 4-28 dargestellten Ansicht TASK MGMT können bestehende Auftragslemente gelöscht, modifiziert, unmittelbar ausgeführt und abgebrochen werden.

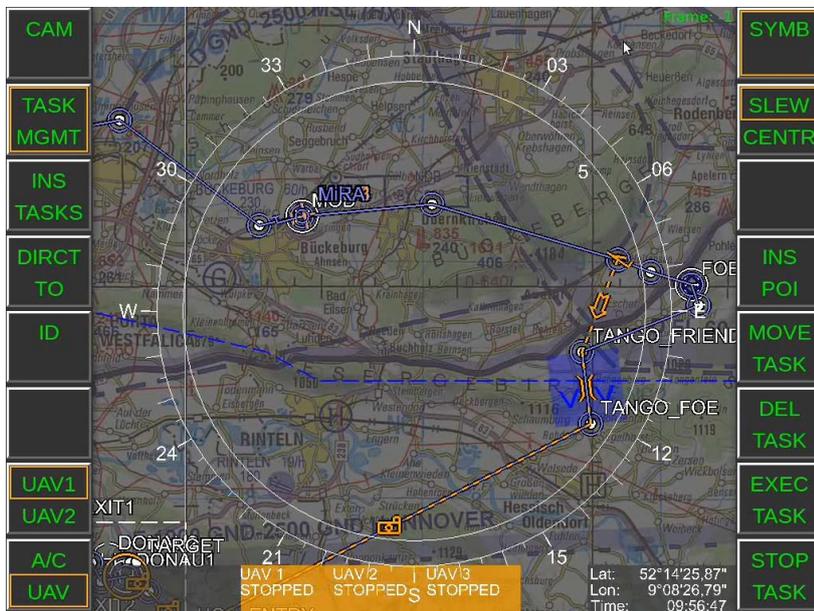


Abbildung 4-28: Task-Management für Manipulation von Auftragslementen

Über die Schaltfläche SYMB können Kartensymbole wie Ortsnamen, der FLOT-Verlauf, Wegpunkte und die Route des Helikopters ausgeblendet werden, um eine übersichtlichere Darstellung der Positionen der Fluggeräte zu erreichen. In den Versuchen wurde davon kein Gebrauch gemacht. Mit der darunterliegenden Schaltfläche SLEW/CENTER kann zwischen einer per Touchscreen frei verschiebbaren

(SLEW) Kartendarstellung oder eine Zentrierung des aktuellen UAVs auf die Mitte der Karte umgeschaltet werden.

Durch das Anwählen von INS POI (engl.: insert point of interest) und dem anschließenden Antippen der Karte kann eine beliebige Position in die Karte eingetragen werden. Diese neue Position wird an die UAVs übertragen und kann in der Auftragsvergabe als Ortsangabe verwendet werden.

Mit MOVE TASK kann ein Auftragsselement modifiziert werden, indem der Zielpunkt bzw. das Zielgebiet des Auftragslements geändert wird. Dazu wird MOVE TASK angewählt, anschließend das zu modifizierende Auftragsselement und dann der neue Zielpunkt bzw. das neue Zielgebiet. Wie in Abschnitt 3.6.5 erläutert, wird dieses Auftragsselement durch die Intervention zu einem Teil des Auftrags. Alle durch die ACU generierten Auftragsselemente, die unmittelbar vor und hinter dem modifizierten Auftrag liegen, werden durch die UAV-ACU entfernt und unter Berücksichtigung der allgemeinen Einsatzgrundsätze (vgl. Abschnitt 4.6.2.7) neu generiert. In der technischen Umsetzung ist MOVE TASK eine Zusammenfassung des Löschsens eines Auftragslements mit dem folgenden Einfügen eines Auftragslements an der Position des gelöschten.

Durch Betätigen von DEL TASK (engl.: delete task) und der anschließenden Auswahl eines Auftragslements wird dieses gelöscht. Um zu verhindern, dass weitere Aktionen des Operators durch ein sofortiges Wiedereinfügen der Auftragslements durch die UAV-ACU (vgl. Abschnitt 4.6.2.7) gestört werden, erfolgt dieses erst 10 Sekunden nach Eingang des aktuellsten Löschkommandos. Danach werden durch die ACU Auftragsselemente gemäß den Einsatzgrundlagen ergänzt.

Mittels EXEC TASK (engl.: execute task) wird die ACU des UAVs angewiesen, mit der Ausführung des dann ausgewählten Auftragslements zu beginnen. Diese Funktion überträgt die Autorität über das UAV an die ACU (vgl. Umweltmodell **guidance-mode** in Abschnitt 4.6.2.4). Die drei Anwendungsfälle dieses Kommandos sind der Start der UAVs, die Weiterschaltung nach einer Gebietsaufklärung oder -überwachung durch die Ausführung des nachfolgenden Auftragslements sowie das Überspringen von Auftragslements. In letzterem Fall kann der Operator durch EXEC TASK auch explizit eine Verletzung der Einsatzgrundsätze kommandieren. Das UAV wird in diesem Fall den Startpunkt des angewählten Auftragslements unter Vermeidung bekannter Bedrohungen, jedoch ohne Berücksichtigung der Einsatzgrundlagen anfliegen.

Mit STOP TASK wird die Durchführung von Aufträgen abgebrochen und der Autopilot des UAVs angewiesen, in einen Schwebeflug überzugehen. Die Autorität über das UAV wird der ACU entzogen und kann erst wieder durch EXEC TASK erteilt werden.

5 Evaluierung

Im Folgenden sind die experimentell nachgewiesenen Auswirkungen der auftragsbasierten UAV-Führung in einer militärischen Helikoptermission dargestellt.

5.1 Hypothesen

Um die zentrale Fragestellung dieser Arbeit (siehe Abschnitt 1.3) mit auftragsbasiert geführten UAVs zu verifizieren, sollen folgende Hypothesen experimentell untersucht werden:

1. *Inversion der Führungsspanne*: Mit der Einführung der auftragsbasierten Führung können mehrere unbemannte Fluggeräte durch einen einzelnen Bediener im Sinne der Mission geführt werden. Das Missionsoptimum der Führungsspanne ist damit größer als 1 (siehe „Missionsoptimum der Führungsspanne“ in Abschnitt 2.1).
2. *Personalunion von Kommandant und UAV-Führer*: Durch die auftragsbasierte Führung ist es auch für den Kommandanten eines bemannten Helikopters möglich, sowohl mehrere UAVs zu führen als auch zugleich die Rolle und Aufgaben des Kommandanten weiterhin wahrzunehmen.

Beide Behauptungen wurden hinsichtlich folgender Punkte untersucht:

- Leistung in der Gesamtmission und individuelle Leistungskriterien des Kommandanten.
- Verhalten des Kommandanten und UAV-Führers.
- Subjektive Maße wie Beanspruchung, Situationsbewusstsein und Akzeptanz.

5.2 Versuchsanordnung

Im Folgenden werden das zur Evaluierung verwendete Experiment mit Hubschrauber-Simulations-Cockpit die Missionssimulation und die von den Versuchspersonen zu absolvierenden Missionen beschrieben.

5.2.1 Versuchspersonen

Bei den Versuchspersonen handelte es sich um acht Angehörige der Heeresfliegertruppe der Bundeswehr mit Erfahrung als Pilot und mehrheitlich auch als Kommandant auf mindestens zwei Flugmustern.

	VP 1	VP 2	VP 3	VP 4	VP 5	VP 6	VP 7	VP 8
Alouette							0 / 120	
Alouette II	0 / 40		0 / 30	1000 / 200	0 / 100			
BO-105	100 / 410	200 / 300	200 / 800		0 / 800	0 / 750	500 / 1500	3800 (¹)
CH53 G/GS				750 / 100				
EC-135	0 / 100	0 / 150						
Gezelle SA 341			2 / 145					
Mi-8								200 / 700
Mi-24								1300 (²)
NH 90				100 / 30				
OH-58						0 / 140		
UH-1D							150 / 650	

Tabelle 5-1: Flugerfahrung der Versuchspersonen als Kommandant / Pilot in Flugstunden

Tabelle 5-1 zeigt die Flugerfahrung der Versuchspersonen im Einzelnen pro Flugmuster. Die erste Zahl gibt die Anzahl der Flugstunden als Kommandant, die zweite die Anzahl der Flugstunden als Pilot an. Wurde ein Flugmuster vor allem einsitzig geflogen, so ist dies mit ⁽¹⁾ gekennzeichnet. Sind Angaben über die Tätigkeit als Pilot und Kommandant nur kumuliert verfügbar, so wurde das mit ⁽²⁾ markiert.

werden eingesetzt, um Haupt- und Alternativflugrouten aufzuklären sowie festzustellen, ob die Landezonen feindfrei sind.

2. Die zweite Mission stellt eine Abwandlung der ersten dar, wobei die Rahmenlage so geändert wurde, dass es statt eines Lagerhauses ein Wahlbüro für die ersten demokratischen Wahlen in einer politisch instabilen Region zu sichern gilt
3. In dieser Mission hat die Crew die Aufgabe, im Rahmen eines Gefangenen-austauschs eine Gruppe von Personen aufzunehmen und an einen Zielpunkt in potentiell feindlichem Gebiet zu transportieren. Eine weitere Abwandlung gegenüber den ersten beiden Missionen ist, dass nach der Erfüllung der Hauptaufgabe nicht zum Startpunkt zurückgekehrt wird, sondern eine Verlegung zu einer anderen Basis stattfindet.
4. In der letzten Versuchsmission muss eine Fernspäheinheit hinter die feindlichen Linien transportiert werden. Diese ist von einer FOB aufzunehmen und nach dem Absetzen im feindlichen Gebiet kehren die UAVs und der bemannte Helikopter wieder zur Basis zurück.

Die Flugrouten, Koordinaten der FOB sowie der Objekte und Landezonen im Einsatzgebiet und die Bedrohungslage wurden zwischen den Missionen variiert, um Gewöhnungseffekte zu minimieren. Um dennoch eine Vergleichbarkeit auch der verschiedenen Missionen zu erhalten, waren folgende Elemente Teil jeder Mission:

1. Es handelte sich stets um eine Truppentransportmission mit identischem Kräfteansatz von einem bemannten Transporthelikopter und drei UAVs.
2. Die Basis, von der aus gestartet wurde und zu der zurückgekehrt wurde, war sowohl laut Briefing als auch in der Simulation bekanntermaßen feindfrei und sicher.
3. Im Einsatzgebiet ist in jeder Mission mit Feinden zu rechnen, die über Handfeuerwaffen, auf Jeeps lafettierte Maschinengewehre, Panzerabwehrwaffen und Flugabwehrstellungen mit geringer Reichweite (bis zu 5km) verfügen.
4. In jeder Mission trennt die FLOT (engl: forward line of own troops, in Abbildung 5-1 als blaue Linie dargestellt) das sichere vom potentiell unsicheren Gebiet. Diese FLOT kann nur an vordefinierten Korridoren nach Anmeldung und in vereinbarten Zeitfenstern überquert werden. In Abbildung 5-1 sind diese Korridore als graublauere Rechtecke dargestellt.

Um das Verhalten in unbekanntem Situationen und nicht vorgeplanten Aufgaben zu evaluieren, wurde in jeder Mission nach Abschluss der Hauptaufgabe, d.h. nach Absetzen der zu transportierenden Truppen am Zielort, ein Folgeauftrag per Funk an die Crew übermittelt. Die Folgemissionen enthielten entweder das Bergen eines abgestürzten Piloten oder einen weiteren regulären Truppentransport. Parallel zur verbalen Übermittlung des Folgeauftrags an die Crew wurden die für den Folgeauftrag notwendigen Koordinaten an den Bordrechner des Helikopters übertragen.

Durch die unterschiedlichen Folgeaufträge und die verschiedenen Bedrohungen, welche beide den Testpersonen vor Missionsbeginn nicht bekannt waren, ergaben sich die in Tabelle 5–2 dargestellten Missionsvarianten:

Mission	Bedrohung durch MG	Prim. Landezone bedroht	Folgemission	Bedrohung in Folgemission	Bedrohung Egress-Korridor
1	Egress-Route	ja	Pilotenbergung	nein	SAM
2	Ingress-Route	nein	Truppentransp.	ja	MG
3	Ingress-Route	nein	Truppentransp.	ja	SAM
4	Egress-Route	ja	Pilotenbergung	nein	MG

Tabelle 5-2: Übersicht der Missionsvarianten

Die Crew des Zwei-Mann-Cockpits besteht exklusiv aus Versuchspersonen. Im Gegensatz zu den in [Uhrmann et al. 2009] beschriebenen Experimenten mimen Experimentatoren keine Crewmitglieder und stehen nur über simulierten Sprechfunk mit den Versuchspersonen in Verbindung.

Jede Versuchsperson wird dabei je zweimal in der Rolle des Kommandanten und Piloten des bemannten Helikopters eingesetzt. Die Crewzusammensetzung wurde den beteiligten Versuchspersonen überlassen und innerhalb der Experimentalkampagne nicht verändert.

5.2.3 Cockpit

Abbildung 5-2 zeigt den Forschungssimulator des Instituts für Flugsysteme der Universität der Bundeswehr München. Simuliert wird ein generisches Zweimanncockpit. Die Umgebung des Helikopters wird in einer virtuellen Außensicht mit drei Projektoren dargestellt, welche horizontal eine 180°-Sicht ermöglichen. In der Mittelkonsole befinden sich zwei CDUs (Control and Display Units) mit denen u.a. die Funkgeräte, Transponder, Fahrwerk gesteuert sowie Bodentruppen das Signal zum Ein- oder Aussteigen gegeben werden kann. Das Cockpit verfügt ferner über sechs Multifunktionsanzeigen (MHDD) von denen sich eines in der Mittelkonsole und fünf vor den Sitzen befinden.



Abbildung 5-2: Helikoptersimulator des Instituts für Flugsysteme

Die MHDDs können über berührungsempfindliche Displays unterschiedliche Formate darstellen. Die Formate sind nicht an spezielle Displays gebunden, so dass Versuchspersonen auf jedem MHDD das dargestellte Format frei wählen können. Rechts unterhalb der MHDDs befinden sich Drehregler, die bei Kartendarstellungen zum Einstellen der Vergrößerung und des Kartenkontrasts genutzt werden können.

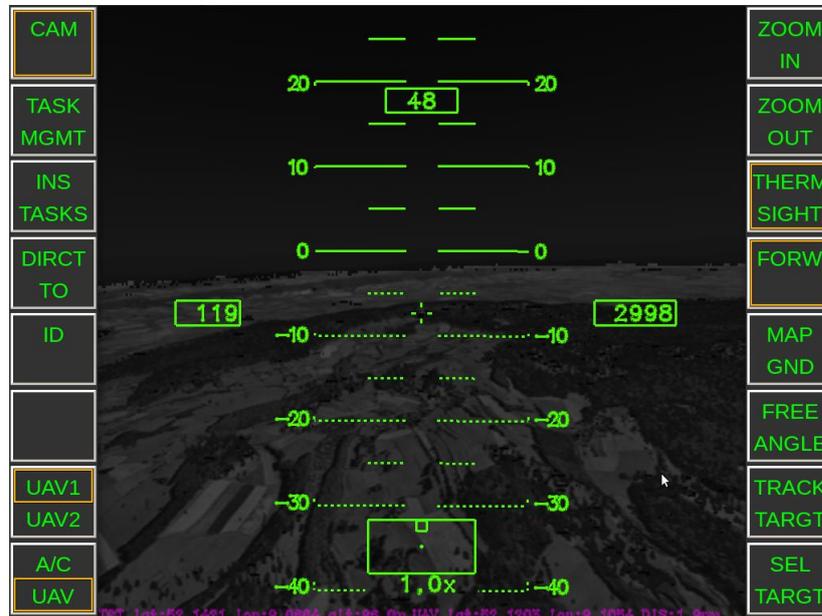


Abbildung 5-3: MHDD im Modus "UAV-Kamera"

Abbildung 5-3 stellt zur Verdeutlichung exemplarisch ein MHDD in der Konfiguration der Kamerasicht von UAV1 dar. In jeder Konfiguration sind seitlich Listen von Schaltflächen angeordnet. Schaltflächen oder Teile davon sind orange umrandet, um die aktuelle Einstellung zu markieren. Mit der Schaltfläche in der linken, unteren Ecke des Displays (A/C – UAV) kann zwischen den Betriebsarten der UAV-Führung und der Interaktion mit den Systemen des eigenen, bemannten Helikopters umgeschaltet werden. Diese Schaltfläche ist in allen Konfigurationen vorhanden. Die restlichen Schaltflächen der linken Leiste sind unterschiedlich belegt in Abhängigkeit davon, ob mit UAVs oder dem eigenen Helikopter interagiert werden soll. Abbildung 5 3 stellt die sich daraus ergebende Menüstruktur dar. Die rechte Liste der Schaltflächen unterscheidet sich je nach gewähltem Anzeigemodus. Im mittleren Bereich des Displays wird das zum gewählten Modus gehörende Anzeige-Bedien-System dargestellt.

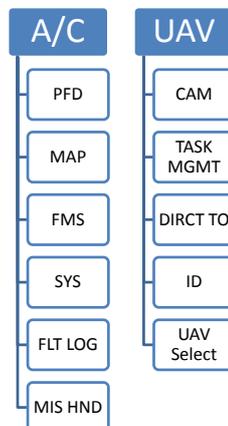


Abbildung 5-4: Gemeinsame Menüstruktur der MHDDs in der Versuchskonfiguration

Die Modi zur Interaktion mit den Systemen des bemannten Helikopters (in Abbildung 5-4 links) sind im Einzelnen:

*PF*D – *Primary Flight Display* dient der Darstellung der grundlegenden Informationen des Fluggeräts. Dargestellt werden der künstliche Horizont, Indicated Air Speed und barometrische Höhe in der „basic T“-Anordnung sowie die mit einem simulierten Radarhöhenmesser erfasste Höhe über Grund.

MAP stellt die digitale Karte des aktuellen Einsatzgebiets dar. Sie kann auf das eigene Fluggerät zentriert werden oder sich frei verschieben lassen (slew mode). Dargestellt werden neben der Position des eigenen Luftfahrzeugs auch diejenigen der UAVs sowie alle weiteren Elemente der aktuell bekannten taktischen Lage inklusive der durch die UAV-Aufklärung gewonnenen Informationen.

FMS – *Flight Management System* erlaubt die Manipulation der geplanten Route des Helikopters anhand einzelner Wegpunkte.

SYS – *System Display* zeigt neben dem Missile Approach Warner den aktuell vorhandenen Treibstoff, Öldruck und -temperatur des Antriebs sowie ein Torque-Display.

FLT LOG – *Flight Log* zeigt das elektronische Flight-Log an. Dieses wird durch den Missionsplaner [Strenzke und Schulte 2011] generiert und zeigt anstehende Flugaufgaben wie Starts, Landungen, das Erreichen von missionsrelevanten Wegpunkten sowie notwendigen Funkverkehr mit den geplanten Zeiten an.

MIS HND – *Mission Handout* dient dem Anzeigen des zum Missionsbriefing gehörenden Piloten-Handouts

Die Modi zur Interaktion mit dem UAV wurden bereits im Design der Mensch-Maschine-Schnittstelle (Kapitel 4.8) erläutert.

Das Cockpit ist so aufgebaut, dass ein Sichtkontakt mit den Experimentatoren nicht möglich ist. Während der Versuche konnten die Versuchspersonen nur über simulierten Sprechfunk mit taktischen Gegenstellen kommunizieren (z.B. Tower, Bodeneinheiten, Flugabwehrstellungen und Landezoneneinweisern). Versuche, die Experimentatoren während der Messmissionen direkt anzusprechen, wurden in der laufenden Simulation nicht beantwortet.

und Assistenzsystem [Strenzke et al. 2011] sind im Einzelnen in Abschnitt 5.2.3 beschrieben.

Elemente zur Simulation der *unbemannten Fluggeräte*. Diese umfassen die künstlich kognitiven Einheiten (vgl. Kapitel 4, insbesondere Abschnitt 4.2), welche einmal pro simuliertem UAV vorhanden sind und die Funktionen zur auftragsbasierten Führung beinhalten. Ferner wird pro UAV ein bildgebender Infrarotsensor mit integrierter Hotspoterkennung simuliert. Diese Sensorsimulation ermöglicht sowohl der ACU als auch dem Operateur den direkten Zugriff auf die in Abschnitt 4.8.1 beschriebenen Sensorbetriebsarten. Die Hotspoterkennung generiert Positionsangaben für auffällige Sensorsignaturen, welche sich im aktuellen Bild der Infrarotkamera befinden. Die Positionen dieser Signaturen werden durch das Sensorsystem sowohl an die ACU als auch an den bemannten Helikopter übertragen. Wie alle Übertragungen sowohl zwischen den UAVs als auch zwischen UAV und bemannten Helikopter wird hierzu die Datenfunksimulationskomponente der Szenariensimulation genutzt.

Die Flugdynamikkomponenten der UAVs simulieren das Verhalten eines Drehflügelflugzeugs mit einer maximalen Geschwindigkeit von ca. 110 Knoten (IAS – indicated air speed). Die Flugregelungskomponente stellt eine Schnittstelle bereit, mit der die UAVs durch die Angabe von Wegpunkten geführt werden können. Dazu wird der Komponente eine Liste anzufliegender Wegpunkte übertragen. Ein einzelner Wegpunkt enthält Informationen über seine Koordinate (3D-Koordinate im WGS84-System), die zum Anflug zu nutzende Geschwindigkeit (Ground Speed) und eine Information, ob dieser Wegpunkt angeflogen, überflogen oder in einem – ebenfalls anzugebenden Radius – umkreist werden soll. Die Wegpunktweitschaltung erfolgt – mit Ausnahme von zu umkreisenden Wegpunkten – automatisch. Änderungen von Wegpunkten bzw. das Erreichen von Wegpunkten werden der ACU des zugehörigen UAVs mitgeteilt. Im Gegensatz zu den in [Uhrmann et al. 2009] beschriebenen Experimenten hat allein die ACU die Möglichkeit, die Wegpunktliste zu lesen und zu bearbeiten. Als einzige Möglichkeit für den Operateur, direkt auf die Flugregelung zuzugreifen, verbleibt die Möglichkeit das sofortige Schweben auf der Stelle zu kommandieren („STOP TASK“).

5.3 Leistungsmaße

Um eine Aussage zur erfolgreichen Inversion der Führungsspanne und erfolgreiche Vereinigung der Rollen des UAV-Operateurs und Kommandanten in Personalunion treffen zu können, ist die Betrachtung der Leistung des gesamten Systems aus bemannter und unbemannter Komponente notwendig. Dieses System entspricht dem in Abschnitt 2.5 vorgestellten Arbeitssystem.

Für die Bewertung der Leistung wurden folgende Kategorien gebildet:

1. Definition und Bewertung des Gesamtmissionserfolgs
2. Definition von Leistungsmaßen für die Bewertung der Aufklärungsleistung durch die UAV
3. Bewertung der Leistung des Kommandanten bzgl. des Missionsmanagement
4. Definition der Leistung des Kommandanten in Aufgaben, die primär durch den Kommandanten als auch – sekundär – durch den Piloten durchgeführt werden können.
5. Bewertung der Informationsweitergabe des Kommandanten an den Piloten

Diese Punkte werden im Folgenden näher betrachtet.

5.3.1 Missionserfolg

Im Hinblick auf die zu lösende Aufgabe und die im laufenden Versuch an die Versuchspersonen zusätzlich durchzuführende Folgemission wurde bewertet, ob diese jeweils erfolgreich abgeschlossen werden konnten.

Die Kriterien für einen nicht erfolgreichen Abschluss der Mission sind:

- Abbruch der Mission durch eine Versuchsperson
- Bekämpfung des bemannten Helikopters durch feindliche Luftabwehr
- Verpassen des Zeitfensters des Egress-Korridors

In den 16 Versuchsmissionen wurde der bemannte Helikopter aufgrund fehlender Aufklärungsergebnisse einmal durch feindliche Luftabwehr bekämpft. In einem weiteren Versuchsdurchlauf verzögerte sich die Missionsdurchführung so, dass die Versuchsperson eine Verlängerung des Zeitfensters für den Egress-Korridor per Funk anfragte.

Somit ergibt sich nach den obigen Kriterien in den durchgeführten Versuchen eine *Erfolgsquote von 88%*.

Bei der Beurteilung dieses Leistungsmaßes ist zu berücksichtigen, dass die Versuchspersonen das Verpassen des Zeitfensters bemerkten und in geeigneter Weise reagierten.

Im Falle der Bekämpfung des bemannten Helikopters war der Besatzung die Position der feindlichen Flugabwehr durch Aufklärungsergebnisse der UAV bekannt. Da aber die Bewertung der Sensorbilder durch den Kommandanten nicht zeitnah erfolgte, flog der Pilot bewusst die gemeldete Position an, um diese visuell aufzuklären.

5.3.2 Aufklärungsleistung

Für die Quantifizierung der Aufklärungsleistung werden zwei Bewertungen verwendet. Zum einen wird bewertet, welcher Anteil der Flugroute des bemannten Helikopters im Einsatzgebiet durch die UAVs voraufgeklärt wurde:

$$\sigma_{\text{Aufklärung}} = \frac{t_{\text{aufgeklärt}}}{t_{\text{Einsatzgebiet}}}$$

Formel 5-1: Zeitlicher Anteil aufgeklärter Flugstrecke

Dabei bezeichnet

- $\sigma_{\text{Aufklärung}}$ ein Maß für die mit den UAVs erbrachte Aufklärungsleistung in Bezug auf die Flugstrecke und -zeit des bemannten Helikopters
- $t_{\text{aufgeklärt}}$ die Summe aller Zeitintervalle, in denen sich der bemannte Helikopter im feindlichen Gebiet an einer Position befindet, welche durch die Sensorbilder der UAVs abgedeckt ist. Als feindliches Gebiet werden alle Flugstrecken vom Verlassen des Einflugkorridors bis zum Eintritt in den Ausflugkorridor gewertet. Zeitintervalle, in denen der Helikopter sich an einer Position befindet, welche erst danach von den UAV-Sensoren abgedeckt werden, werden nicht berücksichtigt.
- $t_{\text{Einsatzgebiet}}$ die Zeit vom Verlassen des Einflugkorridors durch den bemannten Helikopter bis zu dessen Einflug in den Ausflugkorridor.

In 16 Messversuchen ergab sich eine durchschnittliche Aufklärungsleistung von $\bar{\sigma}_{\text{Aufklärung}}=94,5\%$ [Uhrmann und Schulte 2011, 2012]. Im Mittel waren die zur Helikopterposition gehörenden Sensorinformationen der UAVs 292s alt (Aufklärungsaktualität), wobei die ersten Sensorinformationen durchschnittlich 463s

vor der Ankunft des bemannten Helikopters gewonnen werden konnten (Aufklärungsvorlauf).

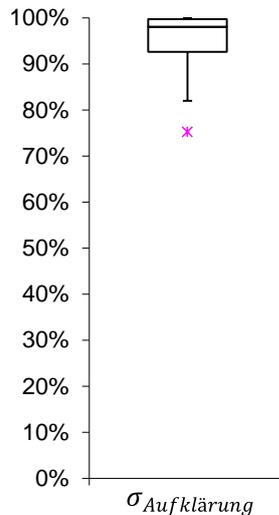


Abbildung 5-6: Zeitliche Aufklärungsabdeckung der Helikopterroute

Als weiteres Bewertungsmaß werden Kriterien für den taktischen Nutzen durch den UAV-Einsatz definiert. Diese ergeben sich im Rahmen der im Experiment durchzuführenden Missionen aus der Vorabklärung von Flugrouten und Landezonen.

Kriterium	Erfüllung	
	<i>ja</i>	<i>nein</i>
Aufklärungsinformationen über die Helikopterroute rechtzeitig verfügbar?	2	0
Aufklärungsinformationen der Hauptlandezone rechtzeitig verfügbar?	2	0
Rechtzeitige Bewertung und Einstufung der UAV-Sensorbilder durch den Kommandanten? Es wird ein Punkt abgezogen, falls der Pilot den Kommandanten auf fehlende Bewertungen hinwies.	2	0

Tabelle 5-3: Nutzung der UAV-Aufklärung im Missionskontext

Anhand der in Tabelle 5-3 aufgelisteten Kriterien wurde bewertet, welcher taktische Nutzen durch den UAV-Einsatz gewonnen wurde. Rechtzeitig verfügbar im Sinne dieser Bewertung ist die Aufklärungsinformation, falls der bemannte Helikopter weder verzögern musste um auf Aufklärungsergebnisse zu warten noch in die Nähe einer nicht lokalisierten oder nicht klassifizierten Bedrohung kam. Wird ein Kriterium innerhalb einer Versuchsmission einmal nicht erfüllt, so wird es mit einem Erfüllungsgrad von 0 bewertet.

Die Auswertung nach den obigen Kriterien ergab einen Erfüllungsgrad von 88,3%, d.h. es wurden durchschnittlich 5,3 von den 6 möglichen Punkten erreicht.

In den Versuchsmissionen war außerdem zu beobachten, dass die Versuchspersonen neben den Haupttrouten und der designierten Hauptlandezone auch alternative Landezonen und alternative Routen für den bemannten Helikopter durch die UAVs aufklären ließen. Es zeigte sich jedoch, dass durch den Abzug von UAVs von den

Haupttrouten und Landezonen diese bei kurzfristigen Lageänderungen nicht immer zeitnah zur Verfügung standen. Insbesondere die Aufklärung von Alternativrouten, welche länger sind als die Haupttroute führte dazu, dass das entsprechende UAV hinter den anderen und auch dem bemannten Helikopter zurückfiel. In der Konsequenz wurde durch die Versuchspersonen der Missionsablauf bis zum Eintreffen aller UAVs verzögert. Die Bewertung dieser Sachverhalte erfolgte anhand der Kriterien in Tabelle 5-4.

Kriterium	Erfüllung		
	<i>ja</i>	<i>teils</i>	<i>nein</i>
Sind Aufklärungsinformationen über alternative Helikopter-routen verfügbar?	2	1	0
Sind Aufklärungsinformationen über alternative Landezonen verfügbar?	2	1	0
Kam es zu Verzögerungen im Missionsablauf aufgrund fehlender Aufklärungsdaten?	0	-	2

Tabelle 5-4: Kriterien für zusätzlichen taktischen Vorteil durch UAV-Nutzung

Die Auswertung nach diesen Kriterien ergab eine durchschnittliche Bewertung von 60,5%, d.h. es wurden durchschnittlich 3,6 von 6 möglichen Punkten erreicht.

5.4 Verhalten der Versuchspersonen

Im Folgenden werden ausgewählte Verhaltensmaße der Versuchspersonen erläutert und die Ergebnisse hinsichtlich der Versuchshypothesen interpretiert. Zur besseren Einordnung der Ergebnisse werden hierzu die Missionen in vier Abschnitte unterteilt:

Abschnitt A beginnt mit dem *Start des Versuchsdurchgangs*, bei dem sich alle unbemannten Fluggeräte und der bemannte Transporthelikopter an der Heimatbasis auf der Startbahn befinden. Das Missionsbriefing ist bereits erfolgt, der technische Systemcheck wird als durchgeführt angenommen. Den UAVs sind noch keine Aufträge bzw. Auftrags-elemente zugeordnet. In dieser Phase besprechen Kommandant und Pilot die bevorstehende Mission, es wird die Startfreigabe für die bemannten und unbemannten Einheiten eingeholt und die initialen Aufträge an die UAVs vergeben. Der Abschnitt *endet mit dem Take-Off des bemannten Helikopters*.

Abschnitt B beginnt mit dem *Take-Off des bemannten Helikopters* und *endet mit erfolgreicher Erfüllung des gebrieften Missionsziels*. Innerhalb dieser Phase werden die Versuchspersonen zwar mit unerwarteten Ereignissen konfrontiert, z.B. der Notwendigkeit, von der Haupt- auf eine Alternativlandezone auszuweichen. Dennoch verändert sich die übergeordnete Zielsetzung – der Missionsauftrag – innerhalb dieses Abschnitts nicht.

Abschnitt C *beginnt mit Erfüllung des gebrieften Missionsziels*. Im unmittelbaren Anschluss daran wird eine bis dahin den Versuchspersonen unbekannt Folgemission ausgegeben. Der Abschnitt C *endet mit dem erfolgreichen Abschluss der Folgemission*. Innerhalb dieser Phase sind die Versuchspersonen mit einem Missionsablauf konfrontiert, den sie vor dem Experiment nicht vorausplanen konnten und für die in keiner früheren Phase entsprechende Aufträge vorab an die UAVs gegeben werden konnten. Auch die Orte und Gebiete, die exklusiv den Folgeauftrag betreffen, werden erst mit Beginn dieses Abschnitts in die Bedienschnittstelle (Abschnitt 4.8) eingetragen.

Abschnitt D *beginnt mit der Erfüllung der Folgemission und endet mit dem Verlassen des Einsatzgebiets*. Innerhalb dieser Phase besteht die Hauptaufgabe der Crew in einem koordinierten Transit der UAVs und des bemannten Helikopters entlang einer möglichst voraufgeklärten, sicheren Route zur Heimatbasis.

5.4.1 Gegenüberstellung Operateur- zu Kommandantentätigkeiten

Als wesentliches Element um die in Abschnitt 5.1 erwartete, mögliche Personalunion von Kommandant und UAV-Führer zu erreichen, dient der Vergleich des Zeitaufwands zur Erfüllung dieser beiden Rollen.

Die Versuche haben ergeben, dass die Rolle des Kommandanten zeitlich nicht immer von der Rolle des UAV-Führers getrennt werden kann. Vielmehr ergeben sich folgende Möglichkeiten der Zuordnung:

1. Interagiert die Versuchsperson nur mit den UAV-Führungsmitteln bzw. wertet sie die Sensorinformationen der UAVs aus, so kann die dafür notwendige Zeit als für die UAV-Führung aufgewendet betrachtet werden.
2. Interagiert die Versuchsperson mit dem Piloten oder bedient Systeme der bemannten Plattform, die nicht der UAV-Interaktion dienen, so können diese Zeiten der Kommandantenrolle zugeschlagen werden.
3. In Zeiten ohne jede Interaktion kann nicht nachvollzogen werden, mit welcher Aufgabe und in welcher Rolle sich die Versuchsperson befindet oder ob sie sich überhaupt in einer der beiden Rollen beschäftigt. Olsen und Goodrich beschreiben diesen Effekt treffend mit *“Without ‘mind probe’ technology we cannot tell if the user is day-dreaming or focused on robot control”*. [Olsen und Goodrich 2003]
4. Da die UAV-Führungsmittel vor allem mit Touchscreens realisiert wurden (vgl. Kapitel 4.9), war es der Versuchsperson möglich, gleichzeitig mit den UAVs zu interagieren und mit dem Piloten zu sprechen. In diesen Situationen wurde sowohl die Rolle des Kommandanten als auch die Rolle des UAV-Führers eingenommen.

Von diesen Zeiten schließen Goodrich und Olsen [Goodrich und Olsen 2003] auf durch das technische System benötigte Aufmerksamkeit durch den menschlichen Bediener (engl.: Robot Attention Demand – RAD):

$$RAD = \frac{IT}{IT + NT}$$

Formel 5-2: Robot Attention Demand nach [Goodrich und Olsen 2003]

Dabei bezeichnet IT (Interaction Time) die Summe aller Zeiten, in denen der Bediener tatsächlich mit dem Robotersystem interagiert. Für die Bestimmung dieser Zeit, werden die Zeiten nach den obigen Kriterien 1 (exklusive Interaktion mit dem UAV-System) und 4 (parallele Interaktion mit dem UAV-System) zusammengefasst. Die anderen Zeitspannen werden nach [Goodrich und Olsen 2003] als NT (Neglect Time) bezeichnet. In diesen Zeiten interagiert der Bediener nicht mit dem Robotersystem.

Betrachtet man den Übergang von der Führung eines robotischen Systems zu einem multi-Roboter-System wie der Führung mehrerer UAVs, so kann angenommen werden, dass die verbleibende Neglect Time dazu verwendet wird, die zusätzlichen UAVs zu führen. Deshalb kann nach [Goodrich und Olsen 2003] der Kehrwert des RAD als Maß für die maximale Anzahl der durch einen Bediener zu führenden Roboter betrachtet

werden. [Olsen Jr. und Wood 2004] bezeichnet diese Größe als *Fan-Out*. Dieser wird experimentell basierend auf der Führung eines einzelnen Roboters ermittelt.

Cummings [Cummings und Mitchell 2008] kritisiert diesen Ansatz insofern, als dass er unterstellt, dass nie mehrere Roboter gleichzeitig Aufmerksamkeit benötigen, das menschliche Situationsbild mit der Anzahl der zu führenden Systeme skaliert und es durch das auftretende Multitasking bei der Führung mehrerer Roboter zu keinen Nachteilen kommt. Cummings ergänzt deshalb zur Berücksichtigung dieser Aspekte den Ansatz um den Begriff der „Wait time“ und definiert Fan-Out (FO) neu als theoretisch mögliche Obergrenze der zu führenden Roboter. Errechnet wird dieser Fan-Out nach [Cummings und Mitchell 2008] aus der „Interaction Time“, der „Neglect Time“ und „Wait Time“ nach folgender Formel:

$$FO = \frac{NT}{IT + WT} + 1$$

Formel 5-3: Fan-Out nach [Cummings und Mitchell 2008]

Die verwendeten Maße sind nun folgendermaßen definiert:

Interaction Time (IT) ist die Zeit, die ein Mensch benötigt um mit einem Roboter zu interagieren und in der er auch tatsächlich mit dem System interagiert. [Olsen Jr. und Wood 2004]

Neglect Time (NT) ist die Zeit, in der ein Roboter agieren kann, während er vom Menschen ignoriert werden kann und auch tatsächlich ignoriert wird. [Olsen Jr. und Wood 2004]

Wait Time (WT) ist nach [Cummings und Mitchell 2008] die Zeit, in der ein Roboter eine vordefinierte Performanceschwelle unterschreitet und auf Bedieneingaben wartet, welche bewirken sollen, dass diese geforderte minimale Performance wieder erreicht wird. Laut [Cummings und Mitchell 2008] entsteht Wait Time

1. aus einem Mangel an Situationsbewusstsein, d.h. der Bediener verfügt nicht über das notwendige Wissen um zu erkennen, dass er handeln müsste.
2. durch das simultane Unterschreiten der Performanceschwelle mehrerer Roboter. Kann der Bediener nur mit einem davon interagieren, wird in dieser Zeit auf die unzureichende Performance der verbleibenden nicht reagiert.
3. durch Verzögerungszeiten im menschlichen Entscheidungsfindungsprozess bzw. Task Switching.

Damit nähert sich die Bestimmung des Fan-Outs an die Queuing-Modelle der Wirtschaftswissenschaften zur Ermittlung der organisationsoptimalen Leitungsspanne (siehe Abschnitt 2.1) an. Diese geht davon aus, dass „Anfragen unterstellter Mitarbeiter zufällig auftreten und Kosten verursachen, die abhängig von der Wartezeit sind, die durch die begrenzte Kapazität des Vorgesetzten entstehen, seiner Leitungsspanne sowie den Anfragen der anderen Mitarbeiter“ ([Hill 1963], übersetzt und interpretiert in [Kreitz et al. 2008]).

Für die experimentelle Verwendung im Bereich der auftragsbasierten UAV-Führung unter Berücksichtigung von Wait Time mussten die einzelnen Zeitmaße aus [Cummings und Mitchell 2008] präzisiert werden [Uhrmann und Schulte 2012]:

Zur *Wait Time (WT)* werden die Zeiten gezählt, in denen

- ein UAV untätig ist, d.h. sein letztes Auftragssegment abgearbeitet hat und somit kein weiteres bearbeitet.
- mindestens ein von den UAV-Sensoren erfasstes Objekt noch nicht klassifiziert wurde.

- ein UAV den Bedrohungsbereich einer Flugabwehrstellung durchfliegt.

Als *Interaction Time (IT)* wird die Zeit betrachtet, in der keine Wait-Time auftritt und der UAV-Operateur mit dem System interagiert. Dies beinhaltet im einzelnen

- Zeiten, die benötigt werden, um das Display für eine Auftragsvergabe vorzubereiten. Diese entstehen beispielsweise durch Umschaltung auf einen bestimmten Displaymodus oder Anwählen des zu bedienenden UAV.
- Zeiten, in denen durch den menschlichen Bediener Aufträge für das UAV definiert, modifiziert oder gelöscht werden.
- Zeiten, in denen Sensordaten der UAV vom Bediener für eine Klassifizierung betrachtet werden. Hierzu zählen auch die Zeiten zum Umschalten des Displays auf die Sensordaten sowie das Eingeben des Klassifizierungsergebnisses.
- Zeiten, in denen zwar nicht mit dem UAV selbst interagiert wurde, in denen jedoch das Display bedient wurde, um die aktuellen Positionen und Aufgaben der UAV zu ermitteln. Olsen bezeichnet diesen Part der Interaction Time als „Robot Monitoring and Selection“ [Olsen Jr. und Wood 2004]. Falls ein Bediener simultan die Auftrags Elemente der UAV und die designierte Route des eignen Helikopters prüfte, wird dies ebenfalls als Interaction Time gewertet.

Als *Neglect Time (NT)* wird die Zeit betrachtet, in der der Bediener nicht mit den UAV-Führungsmitteln interagiert und die nicht zur Wait Time zählen. Hierzu zählen auch Bedienschritte, die sich ausschließlich dem bemannten Helikopter widmen oder eindeutig dazu dienen dessen Position zu bestimmen.

Aufgrund dieser Klassifikation schließen sich die einzelnen Zeiten gegenseitig aus und lassen sich anhand der Videoaufzeichnungen des Arbeitsplatzes des UAV-Bedieners ermitteln. Unterbrechungen der Versuche wurden keiner der obigen Zeiten zugeschlagen. Bei nicht eindeutigen Aktionen wurde zu Ungunsten der Neglect Time entschieden.

Im Kontext dieser Experimente und der obigen Definitionen soll der Fan-Out nicht zur Bestimmung einer maximalen Anzahl von führbaren UAV dienen. Vielmehr stellt er ein Maß dafür dar, welchen Anteil die UAV-Führung in Bezug auf die gesamte zur Verfügung stehende Zeit in Anspruch genommen hat. Durch die Berücksichtigung der Wait Time wird von der zur Verfügung stehenden Zeit auch diejenige abgezogen, in der die Versuchsperson zwar nicht handelte, aber handeln hätte müssen.

In Bezug auf die UAV-Führung konnte experimentell (n=16) die folgende Verteilung für den Fan-Out ermittelt werden:

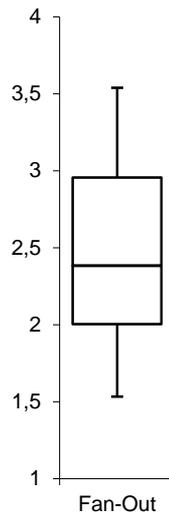


Abbildung 5-7: Experimentell ermittelte Verteilung des Fan-Outs

Die dargestellte Verteilung des Fan-Outs basiert auf der Erfassung der Interaction Time, Wait Time und Neglect Time anhand der Videoaufzeichnungen von 16 Messmissionen. Da sich die Zeiten auf die parallele Führung von drei unbemannten Fluggeräten beziehen, ist der Fan-Out als Multiplikator zur tatsächlich eingesetzten Zahl von UAVs zu werten und nicht – wie ursprünglich von [Olsen Jr. und Wood 2004] und [Cumplings und Mitchell 2008] beschrieben – als absolute Anzahl gleichzeitig führbarer Systeme.

Das in Abbildung 5-7 gezeigte Ergebnis verdeutlicht, dass die Kommandanten trotz der parallelen Führung von drei unbemannten Fluggeräten über genügend zeitliche Ressourcen verfügt haben, die theoretisch im Mittel ausgereicht hätte, um die 2,4-fache (Mittelwert des Fan-Out) Anzahl – also 7 UAVs – zu führen. Dann jedoch hätte die UAV-Führung sämtliche zeitliche Ressourcen beansprucht und die Missionsführung, Unterstützung des Piloten und die Bedienung der Systeme des bemannten Helikopters wäre nicht mehr möglich.

Obwohl die Betrachtung des Fan-Outs der Rolle der Versuchsperson als UAV-Führer ein Indikator für die Machbarkeit dieser Aufgabe ist, kann ohne die Einbeziehung der Rolle als Kommandant und Missionsverantwortlicher keine Aussage über das Gesamtsystem getroffen werden. Um darüber eine Aussage zu erhalten, wurde untersucht, welcher Anteil der Neglect Time von den Versuchspersonen für Tätigkeiten als Kommandant genutzt wurde. Hierzu werden die Zeiten aufsummiert, in denen der Kommandant den Piloten unterstützt, Sprechfunk durchführt oder andere Systeme bedient, die exklusiv dem bemannten Helikopter zuzuordnen sind. Dieses neue Zeitmaß der Kommandantentätigkeit kann dann von der Neglect Time abgezogen werden, um die Neglect Time der Versuchsperson in Bezug auf das gesamte Arbeitssystem (vgl. Abbildung 2-11 in Abschnitt 2.5.2) zu erhalten.

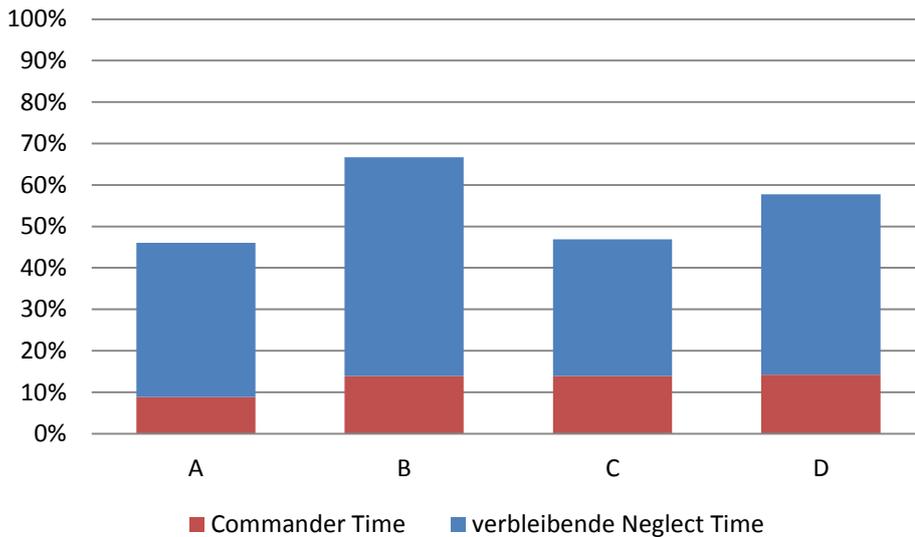


Abbildung 5-8: Anteil der beobachtbaren Kommandantentätigkeit an der Neglect Time pro Missionsphase

Die entsprechenden Ergebnisse sind in Abbildung 5-8 für die Missionsphasen „vor Take-Off“ (A), „bis zur Erfüllung der Hauptaufgabe“ (B), „bis zur Erfüllung der Zusatzaufgabe“ (C), „Egress nach Missionserfüllung“ (D) dargestellt (vgl. Missionsphasen in Abschnitt 5.4). Die Gesamthöhe jeder Säule stellt die Neglect Time pro Missionsphase im Verhältnis zur Gesamtdauer der jeweiligen Missionsphase dar. Die roten Anteile zeigen die Zeiten, in denen die Versuchsperson als Kommandant agiert. Der verbleibende blaue Anteil ist die Zeit, in denen die Versuchsperson weder beobachtbar als Kommandant noch als UAV-Führer agiert.

Da die Missionsphase A, also der Zeitraum vor dem Take-Off des bemannten Helikopters, von den Versuchspersonen vorzeitig beendet oder bei Bedarf verlängert werden konnte, ist der Anteil der Neglect Time entsprechend gering. Die Versuchspersonen beendeten die Phase, wenn die Startvorbereitung und die initiale Auftragsvergabe an die UAVs abgeschlossen waren.

Obwohl in der Missionsphase B die aus dem Briefing bekannte Mission durchgeführt, die Anflugroute zum Einsatzgebiet durch die UAVs aufgeklärt, Sensorergebnisse bewertet und die Nutzbarkeit der Landezonen bewertet werden musste, ist der Anteil der Neglect Time mit durchschnittlich 67% in dieser Phase am höchsten. Der Zeitanteil der Kommandantentätigkeiten nimmt zwar im Vergleich zu Phase A zu, beansprucht jedoch mit durchschnittlich 14% dieser Missionsphase nur einen kleinen Teil der Zeit, die neben der UAV-Führung zur Verfügung steht.

Werden die Probanden in Phase C mit einer unbekanntem Situation in der Form eines Folgeauftrags konfrontiert, so wirkt sich dies durch eine Reduktion der Neglect Time auf nur noch 47% dieser Missionsphase aus. Diese nicht durch die UAV-Führung allokierte Zeit ist jedoch immer noch ausreichend, um die Kommandantentätigkeiten durchzuführen, die auch in Phase C im Mittel 14% der Missionsphase betragen.

Erwartungsgemäß kam es in der Missionsphase D, also nach erfolgreicher Durchführung der Folgemission, zu einer Erhöhung der anteiligen Neglect Time.

Zusammenfassend kann aus den Ergebnissen abgeleitet werden, dass bei der auftragsbasierten Führung von drei UAVs durch den Kommandanten eines bemannten

Helikopters in jeder Missionsphase neben der Führung der UAVs ausreichend Zeit zur Durchführung der Kommandantentätigkeiten zur Verfügung steht.

Die Verwendung der Fan-Out-Maße und ihrer zugrundeliegenden Messmethode, nämlich der Beobachtung der Aktionen und Interaktionen der Versuchspersonen, ist im Rahmen dieses Experiments jedoch auch kritisch zu betrachten. So existiert der bereits erwähnte Einwand von [Olsen und Goodrich 2003], nachdem eine Zeit ohne Interaktion nicht zwingend bedeutet, dass die Versuchsperson genügend Ressourcen für eine etwaige Interaktion zur Verfügung hat. Insbesondere kann nicht davon ausgegangen werden, dass die Neglect Time immer in vollem Umfang für Zusatzaufgaben genutzt werden kann. Durch die Einführung der Wait Time wird diesem Umstand zwar Rechnung getragen, jedoch wandelt sich der Fan-Out von einer Prognose der Führungsspanne zu einem Maß, das eine Aufwandsschätzung nur für die gewählte Konfiguration zulässt.

Die von [Olsen und Goodrich 2003] und [Cummings und Mitchell 2008] definierten Zeitmaße unterstellen auch, dass ein Bediener nicht mit dem System interagiert, solange dieses die geforderte Minimalperformanz erbringt. Anders formuliert unterstellt die Fan-Out-Messung, dass ein Proband beobachtbar untätig ist, wenn er keinen akuten Handlungsbedarf erkennt. Wird die Versuchsperson jedoch mit der Durchführung einer komplexen, militärischen Mission in den Rollen eines Helikopterkommandanten und UAV-Führers betraut, so hat sie die Möglichkeit sich durch Interaktionen mit dem Piloten, den Systemen des bemannten Helikopters und der UAV-Führung über die aktuelle Situation zu informieren bzw. sich zu vergewissern, dass alle beteiligten Einheiten erwartungsgemäß agieren. Sie reagiert nicht nur reaktiv auf Situationsänderungen sondern handelt auch proaktiv. Die kontinuierliche Optimierung von UAV-Aufträgen und der Flugroute des eigenen Helikopters durch Hinweise des Kommandanten generieren ebenfalls Interaction Time zulasten der Neglect Time.

Trotz dieser beiden Effekte, die die Fan-Out-Bestimmung in beide Richtungen beeinflussen können, ist die Fan-Out-Bestimmung ein Indikator für den Aufwand zur Führung eines Multi-Roboter-Systems.

5.4.2 Verwendung der UAV-Automationsgrade

Für die durchgeführten Experimente war das Abstraktionsniveau der UAV-Führung (Abschnitt 3.6.1) auf individuelle, auftragsbasierte Führung festgelegt. Ein Zugriff des Operateurs auf die untergelagerten Flugführungssysteme war nur über die ACU des unbemannten Fluggeräts möglich. Die einzige Ausnahme hiervon bildete das Bedienelement zum Flugabbruch und Schweben auf der Stelle (vgl. Abschnitt 4.8). Direkter Zugriff auf die Payload der UAVs war zwar möglich, wurde jedoch von keiner Versuchsperson genutzt.

Die Verteilung der Autorität zwischen Bediener und Automation ist damit fest vorgegeben und unterscheidet sich je nach betrachteter Teilfunktionalität. So ist die Zuordnung der Aufträge zum jeweiligen Fluggerät in der exklusiven Verantwortung des Operateurs (Automatisierungsebene 1, vgl. Abschnitt 3.6.2). Die Zusammenarbeit der Fluggeräte innerhalb identischer Auftrags Elemente erfolgt jedoch ohne Zutun des Operateurs und ohne explizite Rückmeldung an ihn (Automatisierungsebene 10, vgl. Abschnitt 3.6.2).

Die Nutzung günstiger Gelegenheiten (Abschnitt 4.5) kann in dieses Schema nicht eindeutig eingeordnet werden. Ihre Auslösung erfolgt zwar ohne Zutun und Interventionsmöglichkeit durch den Operateur, um die gewonnenen Daten jedoch zu

interpretieren ist eine manuelle Bewertung der Sensordaten durch den Operateur notwendig.

Die Interoperabilität (Abschnitt 3.6.3) ist durch die Beschränkung auf rein auftragsbasierte Führung ebenfalls fest vorgegeben. Da die Führung der Nutzlast als auch die Flugführung inklusive Start und Landung durch den Operateur erfolgen kann, ist die Interoperabilität in den Versuchen fest auf Level 5 nach [STANAG 4586 2007] vorgegeben.

Die aus dem Umgang der Versuchspersonen mit dem System zu ermittelnden genutzten Automationsgrade beschränken sich somit auf die Neglect Tolerance (Abschnitt 3.6.4), das im nächsten Abschnitt betrachtet wird, und dem Stringenzniveau (Abschnitt 3.6.5), welches der Operateur bei der Führung nutzt.

Für eine quantitative Betrachtung der gewählten Stringenz der UAV-Führung wird die Anzahl der vom Operateur an die UAVs vergebenen Aufträge mit der Anzahl der Auftragsselemente in der resultierenden Auftragsagenda der UAVs verglichen.

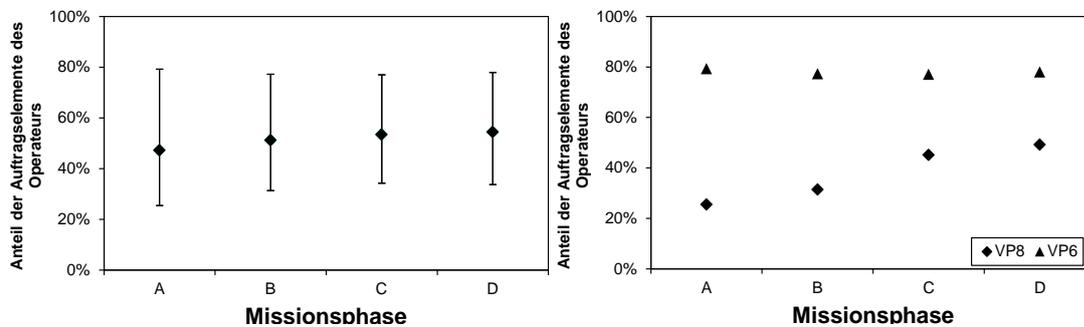


Abbildung 5-9: Bereiche der Stringenz im Versuch und exemplarische Darstellung einzelner Versuche

In der linken Hälfte von Abbildung 5-9 ist die in der Versuchsreihe aufgetretene Stringenz aufgetragen. Die Linien zeigen die Bereiche der Stringenz an, die arithmetischen Mittelwerte der einzelnen Missionsphasen sind eingetragen. Auffallend ist, dass in keinem Versuch die höchste Stringenz von 100% erreicht wurde, was bedeuten würde, dass die ACU des UAVs keinerlei Auftragsselemente generieren muss. Das tatsächliche Maximum liegt bei 79,2% und ist in Phase A aufgetreten. In den Übergängen der verschiedenen Phasen konnte kein eindeutiger Trend im Verlauf der Stringenz festgestellt werden. Wie jedoch das rechte Diagramm von Abbildung 5-9 zeigt, ist die Stringenz von der individuellen Testperson abhängig. Dort sind die Versuchsdurchgänge mit der höchsten bzw. niedrigsten mittleren Stringenz dargestellt. Diese sind in der jeweils letzten Mission der Versuchspersonen VP6 beziehungsweise VP8 aufgetreten.

Die Versuchsperson VP8 wählte zu Beginn ein niedriges Stringenzniveau und übertrug damit viel Autorität an die unbemannten Fluggeräte. Erst bei der Konfrontation mit einer aus dem Briefing unbekanntem Situation erhöhte die Versuchsperson das Stringenzniveau und ließ damit den UAVs weniger Planungsfreiheit.

Versuchsperson VP6 hingegen definierte in allen Versuchsphasen im Mittel 78% aller Auftragsselemente über die explizite Vergabe von Aufträgen. Diese hohe Stringenz änderte sie nicht im Verlauf des Versuchs.

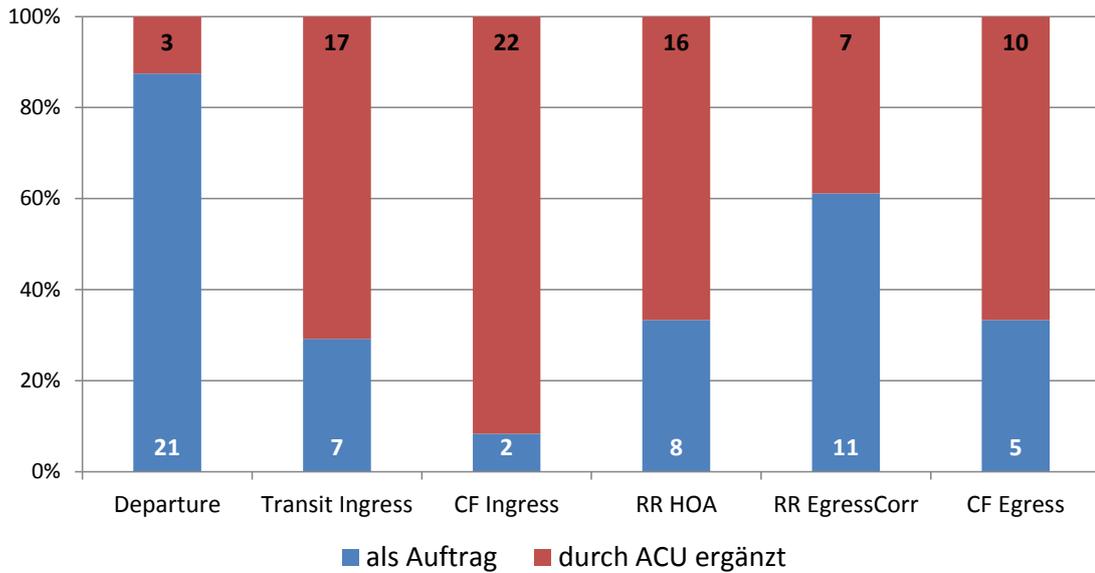


Abbildung 5-10: Stringenz in Abhängigkeit der Auftragsart

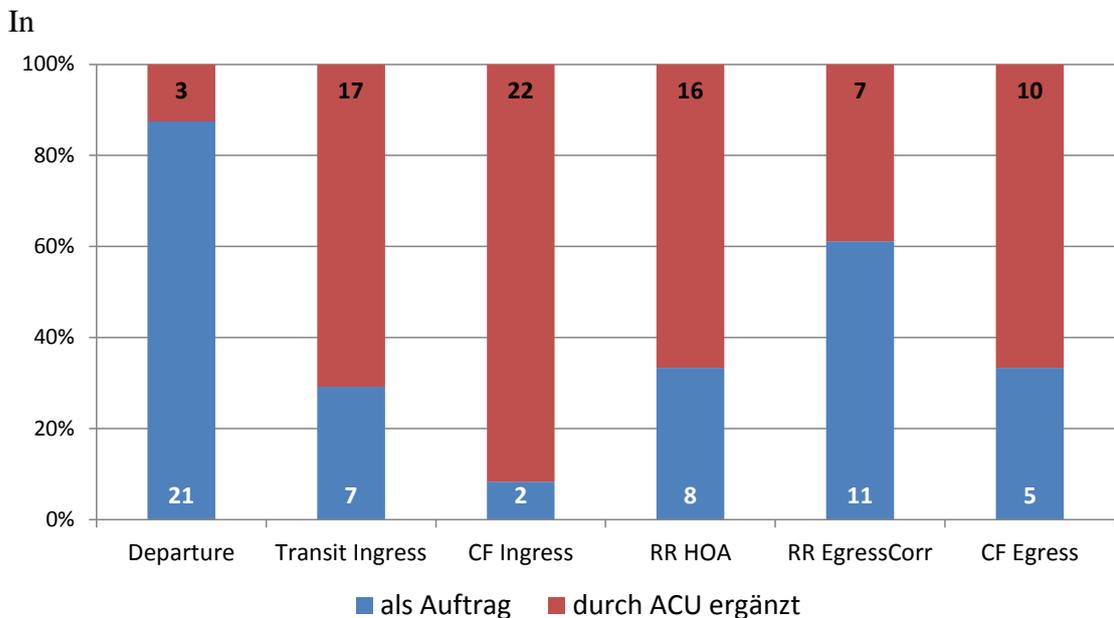


Abbildung 5-10 ist für verschiedene, in allen Missionen typische Aufgaben der UAVs in den Missionen dargestellt, ob diese explizit durch den Operator als Auftrag an das UAV vergeben wurde (blau) oder ob die Auftrags Elemente durch die ACU generiert wurden (rot). Nicht dargestellt sind Auftrags Elemente, die generell nicht durch die ACU generiert werden. Dies sind die Gebietsaufklärung (recce area), Objektüberwachung (object surveillance) und das Durchführen der Landeprozedur (landing).

Das in der Abbildung mit „Departure“ bezeichnete Durchführen der Startprozedur wurde nur durch VP7 in einem Versuchsdurchgang nicht explizit als Auftrag vergeben (vgl. auch Abbildung D-4, links).

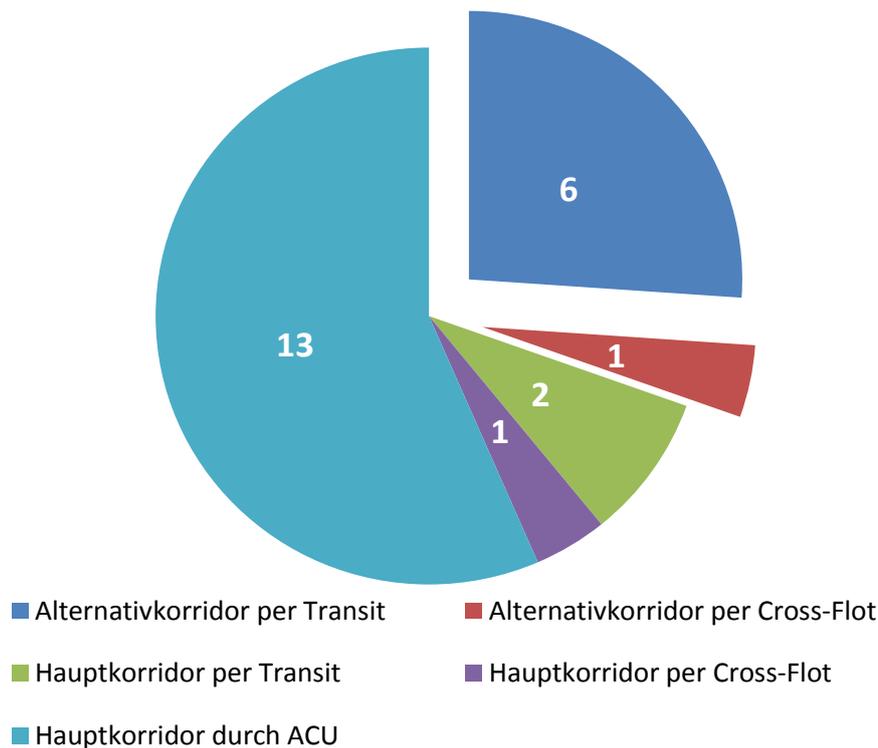


Abbildung 5-11: Entscheidungsgrundlage für die Wahl des Ingress-Korridors

Die Nutzung des laut Missionsbriefings primären Einflugkorridors wurde durch die ACU entschieden, falls der Operateur keine Nutzung eines anderen Korridors als Auftrag spezifiziert und auch keinen anderen Korridor mittels Transitflug anfliegen ließ. Die Verteilung der Ursachen für die Wahl des Einflugkorridors ist in Abbildung 5-11 dargestellt und ergibt sich aus der Auswertung der Kommunikation zwischen den individuellen UAVs und der Kontrollstation. Wie sich zeigte, wurden 7 UAVs durch den Operateur auf alternative Ingress-Routen geschickt (abgesetzte Kreissegmente in Abbildung 5-11). Dies entspricht jeweils genau einem UAV pro Mission. Nur in einer Versuchsmision flogen alle UAVs durch den primären Anflugkorridor (vgl. hierzu Abbildung D-4, links). In einem Fall wurde explizit die Nutzung des alternativen Korridors als Auftrag vergeben und in den anderen sechs Fällen wurde der Transitflug zum Korridor als Auftrag durch den Operateur spezifiziert.

Die Aufklärung der Anflugroute vom Ingress-Korridor zum Einsatzgebiet (HOA) wurde nur in einem Drittel aller in den Versuchsdurchgängen aufgetretenen Fälle durch den Operateur als Auftrag spezifiziert. In den restlichen Fällen ergänzte die ACU dieses Element als Vorbereitung der Aufklärung der Landezone.

Anders als das Durchqueren des Luftraumkorridors zum Anflug des Einsatzgebiets wurde die Nutzung des Ausflugkorridors meist durch den Operateur über den Auftrag zum Anflug des Korridors festgelegt. Der Hauptgrund liegt darin, dass die Wahl des Korridors durch eine Bedrohung auf dem Weg dorthin (vgl. Tabelle 5-2) zu einer missionsrelevanten Entscheidung avanciert. Weitere Gründe liegen laut den Aussagen der Versuchspersonen durch den a priori unbekanntem Folgeauftrag verringerten Planungshorizont. Ferner müssen nach dem Folgeauftrag die „Kräfte wieder geordnet“ werden, was durch die direkte Wahl des Egress-Korridors möglich ist. Zudem ist durch die Konzentration auf das Einsatzgebiet die Mensch-Maschine-Schnittstelle so

konfiguriert, dass die Bereiche, die nach dem Ausflugkorridor liegen, nicht unmittelbar dargestellt werden.

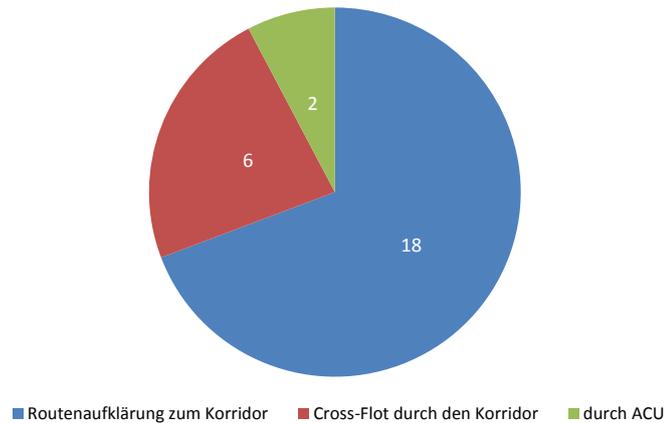


Abbildung 5-12: Entscheidungsgrundlage für die Wahl des Egress-Korridors

Abbildung 5-12 zeigt anhand der Auswertung der an die UAVs vergebenen Aufträge, dass in lediglich 7,7% – also in zwei Fällen – die Wahl des Egress-Korridors durch die UAV-ACU getroffen wurde. Die Wahl des Ingress-Korridors hingegen bestimmte die ACU in 56% der Fälle.

Insgesamt bleibt festzustellen, dass die Möglichkeit, UAVs auf unterschiedlichen Stringenzniveaus zu führen, durch die Operateure intensiv genutzt wurde. Es zeigte sich, dass die Stringenz individuell von den einzelnen Operateuren abhängt. Des Weiteren entscheidet vor allem die Kritikalität der Aufgabe in Bezug auf die Gesamtmission, ob diese als dem UAV überlassen wird (Wahl des Ingress-Korridors) oder als Auftrag spezifiziert wird (Wahl des Egress-Korridors).

5.5 Befragung der Versuchspersonen

Durch Befragung von Versuchspersonen bei Unterbrechungen der Versuchsmissionen sowie jeweils im Anschluss an die Versuche wurden Maße erhoben, die sich weder aus direkten Messungen von Leistungs- oder Simulatorparametern noch durch Verhaltensbeobachtungen der Versuchspersonen ermitteln lassen.

Diese Maße umfassen eine Bewertung des Situationsbewusstseins der Versuchspersonen, die Ermittlung ihrer Beanspruchung und einer retrospektiven Bewertung der Versuche. Letztere umfasst sowohl die Eignung der Versuchsanlage als auch eine Bewertung der in den Versuchen erprobten auftragsbasierten UAV-Führung.

5.5.1 Situationsbewusstsein

[Endsley 1988] definiert Situationsbewusstsein (engl. Situation Awareness) als

“Situation Awareness is the perception of the elements in the environment within a volume of time and space, the comprehension of their meaning, and the projection of their status in the near future.” [Endsley 1988]

Aus dieser Definition ergeben sich drei Ebenen des Situationsbewusstseins, nämlich die *Wahrnehmung* der Umwelt über die Sinnesorgane (Ebene 1), das *Verständnis* dieser Sinneseindrücke (Ebene 2) und die *Projektion* der weiteren Entwicklung der aktuellen Situation (Ebene 3).

Endsley merkt in [Endsley 2004] an, dass diese drei Ebenen zwar aufeinander aufbauen, jedoch nicht immer kausal voneinander abhängig sind. So kann basierend auf dem Verständnis der aktuellen Situation (Ebene 2) die Aufmerksamkeit gerichtet werden, was die Wahrnehmung (Ebene 1) beeinflusst. Persönliche Erfahrungen und Expertise können überdies wesentlich dazu beitragen, die weitere Entwicklung (Ebene 3) einzuschätzen, so dass diese nicht exklusiv aus den Ebenen 1 und 2 hergeleitet wird.

Nach [Endsley 1995; Endsley 2004] ist Situationsbewusstsein ein Schlüsselement im menschlichen Entscheidungsfindungsprozess. Demzufolge ist auch für die Führung mehrerer unbemannter Fluggeräte zu betrachten, wie ausgeprägt das Situationsbewusstsein des Operateurs ist.

Um das Situationsbewusstsein zu quantifizieren, wurde der in [Endsley 1988] beschriebene SAGAT (Situation Awareness Global Assessment Technique) zweimal pro Versuchsmission durchgeführt. Die Unterbrechung für die erste Messung fand dabei in einer Situation geringer Belastung auf der Hinflugroute statt, die zweite Messung während erhöhter Belastung und in einer komplexeren Situation im Operationsgebiet (engl.: HOA – Helicopter Operation Area).

Nach der Unterbrechung der Simulation und dem unmittelbar folgendem Abschalten der Außensicht, aller Cockpitinstrumente und der Sprachverbindung zum Crewpartner hatten die Probanden Fragen zur aktuellen taktischen Lage zu beantworten. Diese umfassten die Position der eigenen Kräfte, von feindlichen und noch nicht bewerteten Einheiten welche jeweils auf einer elektronischen Karte einzuzeichnen waren. Ferner wurden die Einstellungen des Funkgeräts sowie die aktuellen Auftrags Elemente der UAVs abgefragt. Zudem wurde abgefragt, an welche Gegenstelle der nächste Funk-spruch zu richten ist und was die nachfolgenden Auftrags Elemente der UAVs sind.

Die Antworten wurden mit der zum Zeitpunkt der Messung simulierten Situation verglichen und hinsichtlich Korrektheit und Relevanz bewertet:

- Eine richtige Antwort wurde mit zwei Punkten bewertet.
- Unvollständige Antworten oder Antworten mit geringen Abweichungen wurden mit einem Punkt bewertet.
- Falsche oder fehlende Antworten wurden mit null Punkten bewertet.
- War eine Frage für den weiteren Entscheidungsfindungsprozess in der Mission nicht mehr relevant, so wurde sie nicht gewertet. Dies traf insbesondere auf lokalisierte Bodenkräfte zu, deren Position im weiteren, beabsichtigten Verlauf der Mission weder auf dem Weg von bemannten noch von unbemannten Kräften lag.

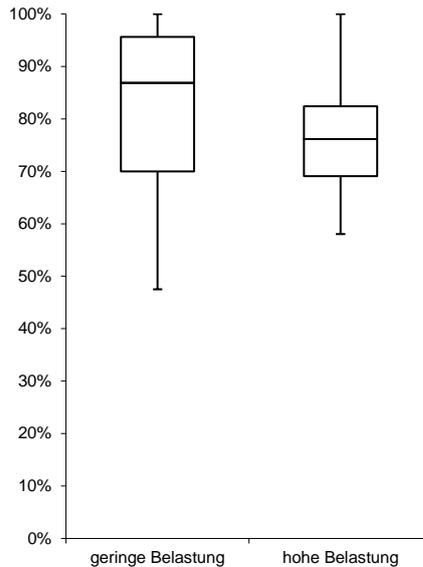


Abbildung 5-13: Situationsbewusstsein des Kommandanten nach Belastung

Abbildung 5-13 zeigt die Verteilung des bewerteten Situationsbewusstseins im Verhältnis zur jeweils möglichen Maximalpunktzahl. In der ersten Messung bei geringer Belastung (Anfang der Missionsphase B) ergab sich ein Durchschnittswert von 82,7% (n=16). In der komplexeren Situation, in der sich der bemannte Helikopter in der HOA befand (Ende der Missionsphase B), ergab sich ein durchschnittlicher Wert von 76,5% (n=16).

Es zeigt sich, dass trotz des bereits in [Endsley 1995] und [Endsley 2004] prognostizierten und in den Versuchen gemessenen Abfalls des Situationsbewusstseins mit zunehmender Belastung der Probanden und Komplexität der Situation ein hohes Niveau an Situationsbewusstsein aufrecht erhalten werden konnte und kein signifikanter Abfall des Situationsbewusstseins feststellbar war.

5.5.2 Beanspruchung der Versuchspersonen

Zur Ermittlung der Beanspruchung des Kommandanten/UAV-Führers wurde das Verfahren NASA TLX nach [Hart und Staveland 1988] verwendet. Dieses Verfahren wurde gewählt, da es eine mehrdimensionale Erfassung der Beanspruchung ermöglicht. Damit kann eine Aussage über die Zusammensetzung der aufgetretenen Beanspruchung getroffen werden. Als intrusives Verfahren setzt es voraus, dass die simulierte Mission für die Messung unterbrochen werden muss. Da diese Unterbrechungen jedoch ohnehin für die Erfassung des Situationsbewusstseins (vgl. Abschnitt 5.5.1) stattfindet, wirkt sich dieser Nachteil des Verfahrens nicht zusätzlich aus. Um die Messung möglichst unverfälscht in Bezug auf die durch die Versuchspersonen soeben erlebte Situation durchzuführen, wird NASA TLX unmittelbar nach der Unterbrechung des Versuchs noch vor der Erfassung des Situationsbewusstseins durchgeführt.

Alternative Verfahren zur Ermittlung der Beanspruchung beinhalten die Ermittlung der Beanspruchung durch physiologische Messungen, aus Rückschlüssen aus der Leistung in der Hauptaufgabe oder in Nebenaufgaben sowie aus Verhaltensbeobachtungen. Für einen detaillierten Vergleich der Methoden mit Bewertung der jeweiligen Vor- und Nachteile sei an dieser Stelle auf [Donath 2012] verwiesen. Im Rahmen der hier beschriebenen Experimentalkampagne wurde NASA TLX als Erhebungsmethode gewählt, da

- *physiologische Messungen* innerhalb der Kampagne nur mit technisch hohem Aufwand zu realisieren sind. Ferner kann mit dieser Methode die Beanspruchung in dynamischen, komplexen Belastungssituationen nicht eindeutig ihrer Ursache zugeordnet werden. Eine Analyse der Zusammensetzung der Beanspruchung ist ebenfalls nicht möglich. Hinzu kommen die in [Donath 2012] erläuterten Nachteile der „*stark verrauschten Daten*“ und der interindividuellen Variation.
- *Leistung in der Hauptaufgabe* punktuell oder kontinuierlich aufgrund der Komplexität der dargestellten Mission nicht oder nur schwierig zu erfassen ist. Die in Abschnitt 5.3 dargestellten Ergebnisse zeigen zudem, dass die auf die Mission bezogene Leistung kontinuierlich hoch war, sich also für die Ausdifferenzierung verschiedener Beanspruchungshöhen nicht eignet. Im Einklang zu [Donath 2012] kann dies jedoch als Indiz dafür gewertet werden, dass es zu keinem beanspruchungsinduzierten Leistungsabfall kam.
- das Stellen von *Nebenaufgaben* eine hohe Intrusion und damit eine hohe Verfälschung der Werte ergeben hätte. Die Aufgabensituation, die sich für den Probanden darstellt, besteht bereits aus einer Reihe potentiell nebenläufiger Aufgaben und Verantwortlichkeiten (siehe Abschnitt 2.5.3) um die Situation mit den in der Simulation vorhandenen Mitteln möglichst realitätsnah darzustellen. Das Einbringen einer kontextfremden Nebenaufgabe verzerrt somit den Aufmerksamkeitsfokus und liefert nur ungenügende Aussagen über die durch den Hauptaufgabenkontext induzierte Beanspruchung. Eingebettete Nebenaufgaben wie etwa die Behebung simulierter Defekte am Helikopter oder die Ausgabe eines parallel abzuarbeitenden Auftrags bergen die Gefahr, dass je nach individueller Einschätzung der Versuchsperson die Nebenaufgabe als neue Hauptaufgabe wahrgenommen wird.
- Veränderungen im *Verhalten* nicht nur reaktiv auf Veränderungen der Situation bzw. Belastung erfolgen, sondern auch proaktiv zur vorbeugenden Vermeidung von Fehlern und Phasen hoher Beanspruchung (vgl. Abschnitt 5.4.1). Dadurch ist eine kontinuierliche, kausale Abhängigkeit von Verhalten und aus der Situation hervorgerufener Beanspruchung nicht mehr gegeben.

Obwohl aus den genannten Gründen nicht direkt für die Erfassung der Beanspruchung herangezogen, weisen die Ergebnisse der Leistungsbetrachtung (Abschnitt 5.3) und der Verhaltensanalyse der Versuchspersonen (insbes. Abschnitt 5.4.1) auf ein mittleres Beanspruchungsniveau hin, das deutlich unter der Grenze zur Überbeanspruchung liegt.

Ein Vorteil der verwendeten Erhebungsmethode NASA TLX ist die punktuelle, multidimensionale Erfassung der Beanspruchung in den Skalen „geistige Anforderung“, „körperliche Anforderung“, „zeitliche Anforderung“, „Einschätzung der eigenen Leistung“, „Anstrengung“ und „Frustration“. Die Erfassung erfolgt durch die subjektive Selbsteinschätzung der Versuchsperson in der jeweiligen Situation. Dazu wird die Missionssimulation in folgenden Situationen angehalten und mittels eines standardisierten Fragebogens die wechselseitige Gewichtung sowie die Höhe jeder Skala durch die Versuchsperson angegeben:

Die erste Unterbrechung (a) erfolgt zu Beginn der Mission, solange sich der bemannte Helikopter noch über eigenem, bedrohungsfreiem Gebiet befindet. Zu diesem Zeitpunkt läuft die Mission für die Versuchspersonen wie aus dem Briefing bekannt und innerhalb der Crew abgestimmt. Es besteht für die Versuchsperson keine Notwendigkeit, die an die UAVs vergebenen Aufträge zu modifizieren. Der Zeitpunkt der Unterbrechung des Versuchs war identisch mit der ersten Erfassung

des Situationsbewusstseins (vgl. Abschnitt 5.5.1). Da die Erfassung der Beanspruchung unmittelbar an der zu bewertenden Situation erfolgen soll, wurde zuerst der Fragebogen nach NASA TLX von den Versuchspersonen ausgefüllt und die Erfassung des Situationsbewusstseins erfolgte im Anschluss.

Da die Einschätzung der Beanspruchung hochgradig individuell ist, wurde diese Messung zur Ermittlung der von der Versuchsperson empfundenen Beanspruchung in einer Situation niedriger Arbeitsbelastung verwendet. Somit dienen die gewonnenen Werte als Messbasis für die Bewertung der nachfolgenden Situationen.

Die zweite Unterbrechung (b) zur Erfassung der Beanspruchung wird unmittelbar vor der zweiten Erfassung des Situationsbewusstseins durchgeführt (vgl. Abschnitt 5.5.1). In dieser Situation hoher Belastung sind durch den Kommandanten die Sensorinformationen der UAVs auszuwerten, die Kommunikation mit Bodentruppen sicherzustellen, die Nutzbarkeit der Landezonen zu bewerten und der Pilot ist – falls nötig – im Anflug der nutzbaren Landezone durch Navigationshinweise zu unterstützen.

Der Vergleich dieser Messung mit Messung a dient der Einschätzung der zusätzlichen Beanspruchung, welche in belastenden Situationen durch die parallele Führung eines bemannten und dreier unbemannter Fluggeräte entsteht.

Erwartungsgemäß zeigt sich bei den meisten Versuchspersonen ein Anstieg der Beanspruchung in Situation b im Vergleich zu Situation a. Lediglich bei Versuchsperson VP3 kam es in einem Versuchsdurchgang zu einem marginalen Rückgang des TLX-Wertes von durchschnittlich 49% in Situation a auf 47% in Situation b. Der Grund für diesen Rückgang liegt darin, dass die Versuchsperson unmittelbar vor der Messung a vom Piloten zur Unterstützung des „before-landing-checks“ gebeten wurde. Die Messung erfolgte deshalb unmittelbar nach der Durchführung dieser Unterstützungsaufgabe und die Arbeitsbelastung war geringfügig höher als bei den anderen Messungen des Typs a. Bei der Messung von Typ b hatte die Versuchsperson VP3 durch eine entsprechende Aufteilung der Aufklärungsaufträge auf die UAVs die Landezone bereits deutlich vor dem Eintreffen des bemannten Helikopters aufgeklärt und überwachte diese fortan kontinuierlich. Dadurch war es ihr möglich, die Aufklärungs- und Überwachungsaufgabe zeitlich von der Unterstützung des Piloten bei der Landung zu trennen. Dies resultierte in einer unterdurchschnittlichen Belastung bei der entsprechenden Messung b.

Um die deutlich streuenden individuellen Ergebnisse der einzelnen Versuchspersonen in eine gemeinsame Bewertung zu integrieren, werden die erzielten TLX-Werte auf eine Skala von 0 (niedrigster bei der Versuchsperson aufgetretener TLX-Wert) bis 100 (höchster bei der Versuchsperson aufgetretener TLX-Wert) normiert [Donath 2012]:

$$TLX_{VPN_{norm}} = \frac{TLX_{VPN} - \text{Min}(TLX_{VPN})}{\text{Max}(TLX_{VPN}) - \text{Min}(TLX_{VPN})} \cdot 100$$

Formel 5-4: Normierung der TLX-Werte einer Versuchsperson nach [Donath 2012]

Dabei bezeichnen TLX_{VPN} das arithmetische Mittel der nach [Hart und Staveland 1988] berechneten TLX-Werte einer Versuchsperson in der Situation a oder b, $\text{Min}(TLX_{VPN})$ das Minimum der bei dieser Versuchsperson aufgetretenen TLX-Werte und $\text{Max}(TLX_{VPN})$ das Maximum der bei der Versuchsperson aufgetretenen Werte. Auf diese Weise können inter-individuelle Unterschiede in der Interpretation der TLX-Skalen arithmetisch eliminiert werden.

Diese normierten Werte sind somit für den Vergleich der Versuchspersonen geeignet [Donath 2012], jedoch kann durch die Nutzung der kompletten Skala von 0 bis 100 bei jeder Versuchsperson keine quantitative Aussage über die Größenordnung der Veränderung getroffen werden. Zur quantitativen Einschätzung werden daher die normierten Werte auf den Bereich zwischen dem minimalen und maximalen TLX-Wert projiziert, um „einen möglichst realistischen Beanspruchungswert zu erhalten, der den Beanspruchungsbereich der im Rahmen der Versuche abgegebenen Einzelerhebungen widerspiegelt“ [Donath 2012]:

$$TLX_{proj} = TLX_{VP_{norm}} \cdot \frac{\text{Max}(TLX_{gesamt}) - \text{Min}(TLX_{gesamt})}{100} + \text{Min}(TLX_{gesamt})$$

Formel 5-5: Projektion der normierten TLX-Werte nach [Donath 2012]

Mittels dieser Projektion ergeben sich die in Abbildung 5-14 dargestellten, normierten Beanspruchungswerte:

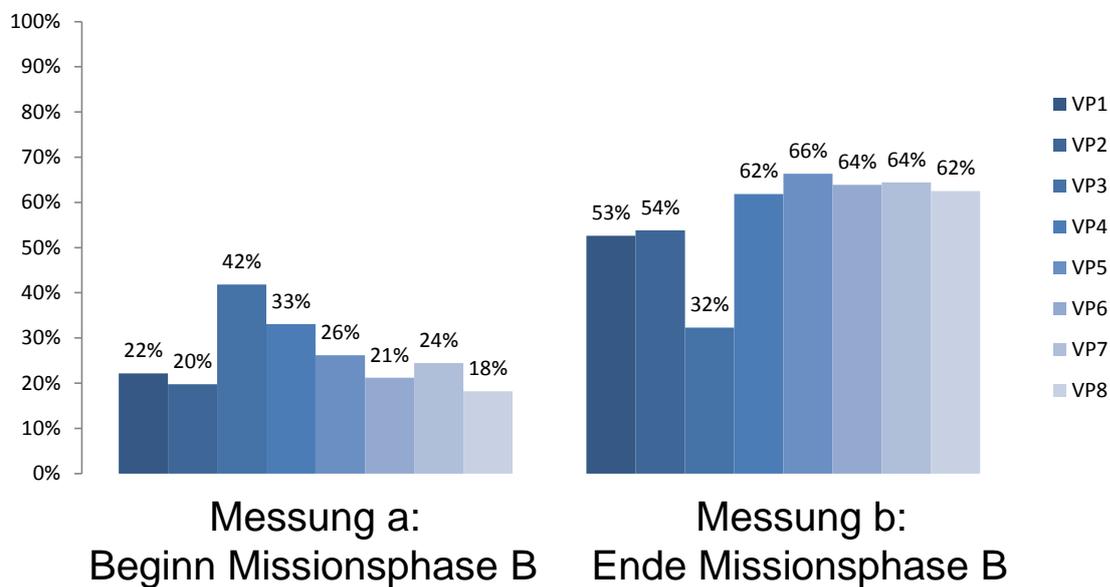


Abbildung 5-14: Normierte TLX-Werte

Es zeigt sich ein insgesamt moderater Anstieg der normierten TLX-Werte von durchschnittlich 26% auf 57%.

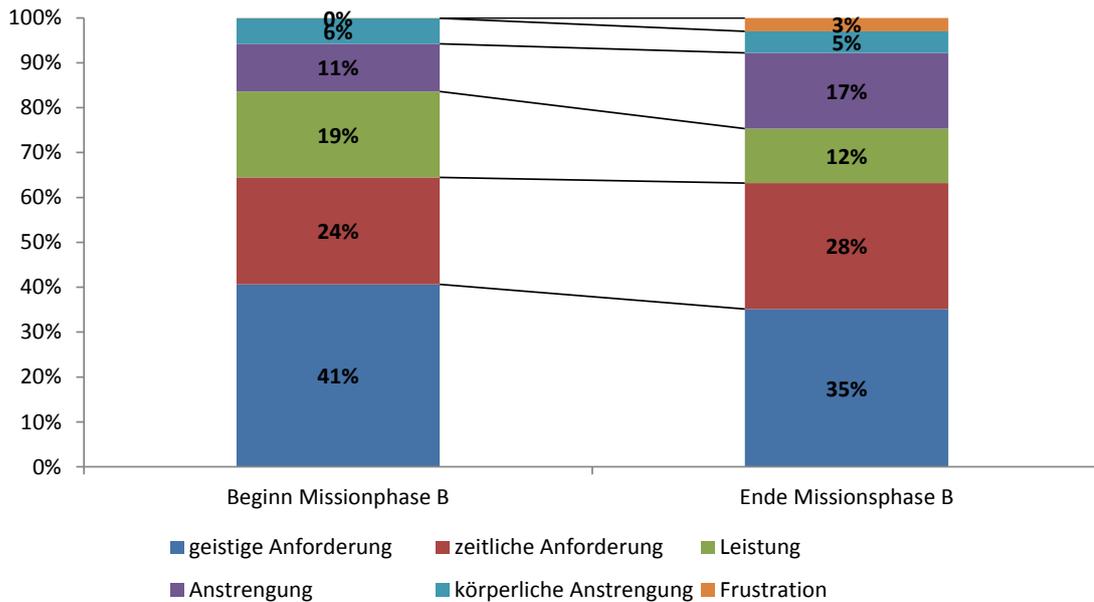


Abbildung 5-15: Verteilung der Beanspruchung auf einzelne Dimensionen

Bei der Betrachtung der einzelnen Beanspruchungsdimensionen ergibt sich über das Kollektiv der Versuchspersonen eine absolute Erhöhung der Beanspruchung in allen Dimensionen innerhalb der Missionsphase B. Relativ zur jeweiligen Gesamtbeanspruchung ist die Erhöhung jedoch unterschiedlich verteilt. Abbildung 5-15 zeigt, dass insbesondere die empfundene Anstrengung und der Zeitdruck überproportional ansteigen. Die Unzufriedenheit mit der eigenen Leistung nimmt zwar absolut zu, jedoch nicht in demselben Maße wie die gesamte Beanspruchung, wodurch sich ein relativer Rückgang von 19% auf 12% ergibt. Frustration tritt zu Beginn der Missionsphase B nicht auf, trägt aber auch am Ende der Missionsphase nur zu 3% zur empfundenen Beanspruchung bei. Wenig überraschend wird die Aufgabe des Kommandanten und UAV-Bedieners als wenig körperlich anstrengend empfunden.

Aufgrund der Subjektivität des Tests und lediglich acht Versuchspersonen kann keine belastbare statistische Aussage über den absoluten Anstieg der Beanspruchung gemacht werden. Die Verteilung der Beanspruchung auf die einzelnen Dimensionen lässt jedoch den Trend erkennen, dass die Kommandantenaufgabe und die UAV-Führung parallel als primär geistig anstrengend empfunden werden und einen kontinuierlichen Zeitdruck erzeugen.

5.5.3 Bewertungen durch die Versuchspersonen

Bei den jeweils im Anschluss an die Versuche durchgeführten Interviews mit den Probanden sollten diese den zeitlichen Aufwand der UAV-Führung in Relation zu den Tätigkeiten als Kommandant setzen. Abbildung 5-16 zeigt die Ergebnisse dieser Befragung.

Nach Angabe der Versuchspersonen wurde durchschnittlich 34% der zur Verfügung stehenden Zeit für Kommandantentätigkeiten aufgewendet. 62% der Zeit beanspruchte die UAV-Führung. Das subjektive Empfinden der Probanden entspricht damit dem beobachteten Verhältnis von Kommandantentätigkeit zu UAV-Führung, wie an Abbildung 5-8 zu sehen. Ein Widerspruch zu den Verhaltensbeobachtungen in Abschnitt 5.4.1 ergibt sich jedoch in der Einschätzung des absoluten Zeitanteils, denn

nach den Beobachtungen beansprucht die UAV-Führung weniger als die Hälfte der Zeit.

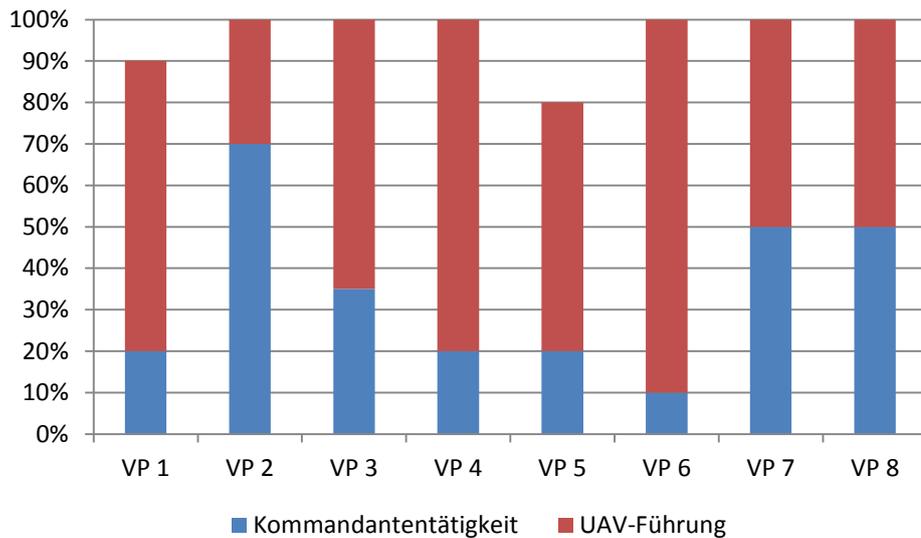


Abbildung 5-16: Einschätzung des Zeitanteils von Kommandantentätigkeit und UAV-Führung

Die Versuchspersonen VP1 und VP5 haben angegeben, dass sie nicht alle verfügbare Zeit für Kommandantentätigkeit und UAV-Führung aufgewendet haben, weshalb die entsprechenden Summen im Diagramm nicht 100% ergeben. Laut Aussagen dieser Versuchspersonen wurde die verbleibende Zeit nicht aktiv für die Mission genutzt, sondern stand beispielsweise für private Unterhaltungen mit dem anderen Besatzungsmitglied zur Verfügung. Umgekehrt gaben die Versuchspersonen an, dass sie zeitgleich UAV-Führungs- und Kommandantenaufgaben wahrgenommen haben.

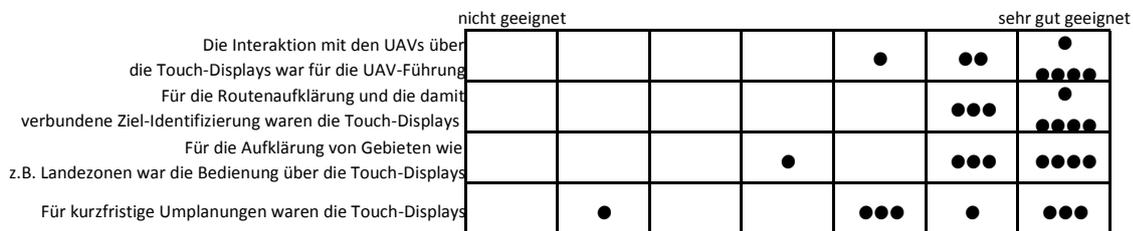


Abbildung 5-17: Bewertung der Mensch-Maschine-Schnittstelle

Die in Abbildung 5-17 dargestellten Ergebnisse zeigen die Antworten der Versuchspersonen zur Befragung nach der *Eignung der Mensch-Maschine-Schnittstelle* zur UAV-Führung. Insgesamt wurde die Schnittstelle von den Versuchspersonen als geeignet bewertet. Insbesondere die gewählte Modalität der grafischen Darstellung der Auftrags Elemente auf einer Karte wurde positiv hervorgehoben. Kritisch wurde das Interface in Bezug auf zeitkritische Umplanungen bewertet. Hierbei vermissten die Versuchspersonen die Möglichkeit, die Aufträge aller UAVs mit einer Bedienaktion zu stoppen.



Abbildung 5-18: Bewertung der Führung der UAVs nach dem Training

Die parallele Führung mehrerer UAVs bewerteten die Versuchspersonen mehrheitlich als einfach möglich, weitgehend selbsterklärend und zweckmäßig (Abbildung 5-18). Die schlechte Bewertung in der ersten Skala resultiert aus einem durch die Versuchsperson als unzureichend empfundenen Training. Die einzelne schlechte Bewertung in der dritten Skala resultiert aus einem Fehlen von Auftragsarten bzw. Eingriffsmöglichkeiten, welche die Versuchsperson für die Missionsdurchführung gerne genutzt hätte.

Die Befragung nach diesen *fehlenden Auftragsarten* ergab folgendes Ergebnis:

- Drei Versuchspersonen vermissten die Möglichkeit, das UAV zumindest vorübergehend über manuell spezifizierte Wegpunkte zu führen.
- Einen direkter Zugriff auf die Geschwindigkeitssteuerung, die je nach Versuchsperson die Geschwindigkeit in der Luft (IAS – Indicated Air Speed) oder die Geschwindigkeit über Grund regelt, vermissten drei Versuchspersonen. Laut ihrer Aussage würde diese Funktion genutzt, um die UAVs besser zu koordinieren.
- Zwei Versuchspersonen sprachen sich explizit gegen eine direkte Zugriffsmöglichkeit auf die Geschwindigkeitssteuerung aus und forderten stattdessen die Möglichkeit zur zeitlichen Koordinierung von Aufträgen, so dass diese gemeinsam bzw. kausal nacheinander durchgeführt werden können.
- Eine Versuchsperson vermisste die Möglichkeit, dem UAV zu befehlen, in der Nähe des bemannten Helikopters zu bleiben. Diese Funktionalität wäre nötig, damit bei einer Situationsänderung das UAV schnell in der Nähe des Helikopters zur Verfügung steht.
- Eine Versuchsperson bemerkte die fehlende Möglichkeit, eine Route zu patrouillieren und somit über einen längeren Zeitraum permanent aktuelle Aufklärungsergebnisse zu generieren.

Obwohl die zur Verfügung stehenden Auftragsarten aus einer Analyse der Mission in Absprache mit der Heeresfliegertruppe der Bundeswehr entstanden sind, zeigt der Versuch somit, dass weitere Eingriffsmöglichkeiten und Auftragsarten angefragt werden. Die subjektiven Bewertungen der Versuchspersonen zeigen jedoch insgesamt eine hohe Akzeptanz der Ansatzes der auftragsbasierten Führung (vgl. auch die weiteren Bewertungen in Anhang C.3).

Die Bewertung des *automatischen Einhaltens von Einsatzgrundsätzen* und die dadurch ermöglichte Führung mit unterschiedlicher Stringenz ist in Abbildung 5-19 dargestellt.

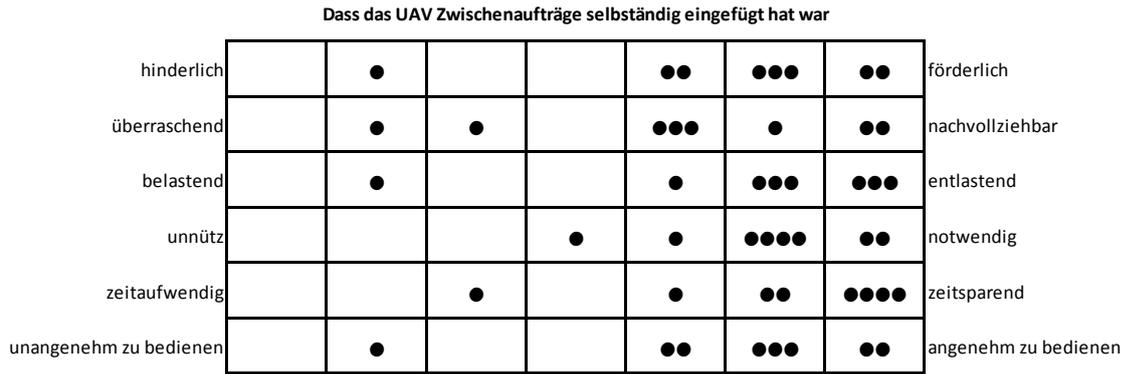


Abbildung 5-19: Bewertung des Einhaltens von Einsatzgrundsätzen

Das von zwei Versuchspersonen als überraschend empfundene Verhalten der UAVs wurde dadurch erklärt, dass die automatische Einhaltung von Einsatzgrundlagen im Training zwar enthalten war, jedoch kein zentrales Thema war. Wie aus Abbildung 5-19 ersichtlich, wurde das automatische Einhalten der Einsatzgrundsätze durch die UAVs von den Versuchspersonen überwiegend positiv in allen erhobenen Skalen bewertet.

Von zwei Versuchspersonen wurde der Wunsch geäußert, UAVs in besonderen Situationen gegen die Einsatzgrundsätze handeln zu lassen. Dies sei insbesondere in Situationen erforderlich, in denen das Einhalten der Einsatzgrundsätzen – v.a. das Nutzen der designierten Ein- und Ausflugpunkte eines Luftraums – zu aus Missionssicht nicht tolerablen Zeitverzögerungen führt. Eine derartige Möglichkeit ist zwar in der Konfiguration durch gezieltes Überspringen von Auftrags-elementen möglich (vgl. Abschnitt 4.8.2), jedoch war den Versuchspersonen in der jeweiligen Situation diese Möglichkeit laut eigener Aussage nicht bewusst.

Eine Bewertung der *automatischen Kooperation bei durch mehrere UAVs durchgeführten Aufträgen* kann aus der Bewertung des Verhaltens bei der gemeinsamen Routenaufklärung abgeleitet werden.

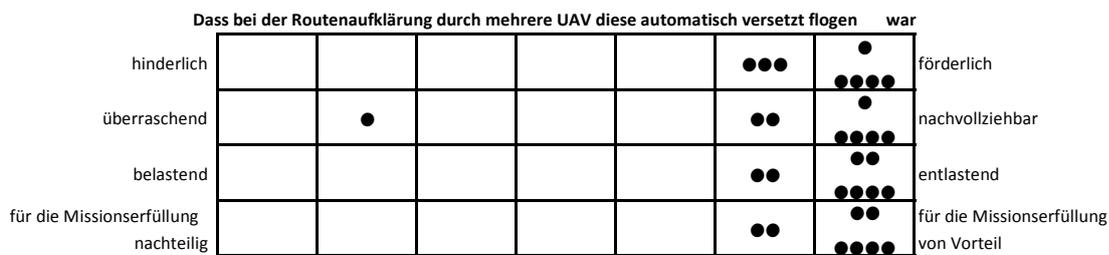


Abbildung 5-20: Bewertung der kooperativen Routenaufklärung mehrerer UAVs

Abbildung 5-20 zeigt die Ergebnisse der entsprechenden Befragung. Eine Versuchsperson gab an, dass das kooperative Verhalten der UAVs überrascht hat, obwohl dieses im Training erläutert wurde. Auffallend war, dass das kooperative Verhalten der UAVs nach Aussage mehrerer Versuchspersonen erst in der Retrospektive im Rahmen der Befragung aufgefallen ist. Dieses Ergebnis bestätigt die in Abschnitt 3.7 genannte Eigenschaft der unbewussten, rollenbasierten Kooperation auch durch die Wahrnehmung der Versuchspersonen.

Dieser unbewusste Charakter der kooperierenden UAVs zeigt sich auch darin, dass keine Versuchsperson den Wunsch nach einem Eingriff in die Kooperation der unbemannten Fluggeräte geäußert hat.

Zusammenfassend kann aus den Bewertungen der Versuchspersonen gefolgert werden, dass die auftragsbasierte, parallele Führung von drei unbemannten Fluggeräten als möglich bewertet wird. Der empfundene Zeitaufwand für die Führung wird dabei als doppelt so hoch eingeschätzt wie der zeitliche Aufwand für die Rolle des Helikopterkommandanten (vgl. Abbildung 5-16). Die in der Experimentalkampagne verwendete und in Abschnitt 4.8 beschriebene Mensch-Maschine-Schnittstelle mit kartographisch verankerten Auftrags-elementen wurde als geeignet und zweckgemäß bewertet.

Das Einhalten von Einsatzgrundsätzen wird generell als positiv und entlastend eingestuft, jedoch soll eine einfache Möglichkeit bestehen, dieses Verhalten zu deaktivieren oder zu übersteuern. In Situationen, in denen der Operateur aufgrund seiner taktischen Erfahrung und Fähigkeiten bewusst eine Verletzung von Einsatzgrundsätzen riskieren will, soll diese einfach zu kommandieren sein. Ähnlich motiviert war die Forderung nach einer Definition neuer Verhaltensweisen der UAVs, welche mit der Auftragsbearbeitung nur mittelbar zusammenhängen, nämlich der Forderung eines *definierten zeitlichen und räumlichen Bezugs zur bemannten Plattform* und der Forderung nach dem *taktischen Vorhalten von UAVs in missionsrelevanten Gebieten*.

Letzteres wurde gelegentlich durch Abbrechen der Auftragsbearbeitung durch die Versuchspersonen erreicht (vgl. „Stop Task“ in Abschnitt 4.8.2 sowie Anhang D).

6 Zusammenfassung und Ausblick

Die Nutzung von unbemannten Fluggeräten in einer Helikoptermission als Surrogat für bemannte Aufklärungskräfte ist ein Anwendungsfall für UAVs, der sich grundlegend von der Führung von UAVs aus einer Bodenk Kontrollstation unterscheidet. Auf letztere konzentriert sich jedoch ein Großteil der aktuellen Forschung, wodurch es verstärkt zu einer Betrachtung von Teilproblemen kommt, ohne den holistischen Ansatz des gesamten Arbeitssystems der Führung von *Helikopter und mehreren UAVs* zu betrachten.

Diese Arbeit stellt in Abschnitt 2.3 die Grenzen der derzeit im Einsatz befindlichen Systeme und der isolierten Betrachtung von Einzelkomponenten eines unbemannten Flugsystems dar. Diese Einschränkungen werden im Ansatz der auftragsbasierten Führung adressiert. So sind sowohl die aus der klassischen Automation bekannten Probleme der Mensch-Maschine-Kooperation betrachtet, als auch die für zwischenmenschliche Delegationsbeziehungen bekannten Phänomene untersucht worden.

Mittels der kognitiven Automation an Bord der unbemannten Fluggeräte kann das rationale Verhalten eines menschlichen Piloten schließlich soweit nachgebildet werden, dass ein grundlegendes Situationsverständnis auch in einer künstlichen Einheit ermöglicht wird. Dieses Verständnis der gegenwärtigen Situation, deren Zusammenhänge, der Aufträge des Menschen, der Einsatzgrundlagen und der zugrundeliegenden Zielsetzung ermöglicht sowohl eine reaktive Bearbeitung der Aufträge des Bedieners als auch eine proaktive Zusammenarbeit mit anderen bemannten und unbemannten Kräften und die proaktive Nutzung günstiger Gelegenheiten im Missionsverlauf.

Diese Fähigkeiten wurden im Rahmen dieser Arbeit prototypisch implementiert und in einem komplexen, militärischen Szenario mit Helikoptercrews der Heeresfliegertruppe der Bundeswehr evaluiert. Bei den in Kapitel 5 beschriebenen Evaluationsexperimenten konnte gezeigt werden, dass diese Experten bereits nach kurzer Einweisungszeit die UAVs taktisch sinnvoll einsetzen können und damit die Sicherheit der Mission und die Chance eines Missionserfolgs erhöhen. Ferner zeigte sich, dass trotz der Doppelbelastung durch Kommandantentätigkeiten und UAV-Führung der Bediener eine gute Situationswahrnehmung über den ganzen Versuch hinweg aufrechterhalten kann.

Durch die Ergänzung mit maschineller Pilotenunterstützung durch ein Pilotenassistenzsystem [Maiwald und Schulte 2011; Benzler et al. 2008] und einem bei der Führung der UAVs unterstützenden Assistenzsystem [Rauschert 2013] für den Kommandanten (vgl. Abschnitt 2.4) wird die auftragsbasierte UAV-Führung zu einem akzeptierten und in der Simulation evaluierten Systemansatz. Dieser drängt weder den Mensch aus der Führung und Verantwortung, noch wird er durch die Bedienung der Automationsfunktionen überlastet.

Die Möglichkeit, auf einer Abstraktionsebene mehrere intuitiv und implizit vorgegebene Stringenzniveaus der UAV-Führung zu nutzen, zeigt einen Weg auf, adaptierbare Automation zu entwerfen, ohne dass die Adaptierbarkeit in zusätzlichen Bedienoperationen resultiert. Darüber hinaus wird die Möglichkeit der Intervention

geschaffen, über die Mensch und Maschine anhand maschinell vorgeschlagener, aber dennoch frei editierbaren Vorgehensplänen zu einer gemeinsam entwickelten Agenda gelangen können.

Anhand der taktischen Verhaltensweisen der Probanden und deren taktischen Umgang mit dem zu evaluierendem System zeigte sich auch, dass der Systemansatz noch weiteres, derzeit ungenutztes Potential aufweist. So wurde die Möglichkeit nach anderen Führungsebenen neben der auftragsbasierten Führung angefragt. Unbeantwortet ist hierbei die Fragestellung, wie ein Systemeingriff durch den Menschen in ein UAV-Teilsystem – z.B. Autopilot, Geschwindigkeitsregelung, Missionssensorik – durch die übergeordneten Automationsschichten zu behandeln ist. Dieser wird als notwendig erachtet um eine taktische Überlegenheit und den Informationsvorsprung des menschlichen Bedieners gegenüber der kognitiven Automation insbesondere in zeitkritischen Situationen zu nutzen.

Vorstellbar sind nicht nur Eingriffe auf Abstraktionsebenen, die unterhalb der auftragsbasierten Führung liegen. Die Führung von mehreren Fluggeräten mit einem gemeinsamen Auftrag – der Führung von maschinellen Teams – aus dem Cockpit bedarf ebenfalls einer genaueren Betrachtung. Aspekte der Führung von maschinellen Teams werden in [Gangl et al. 2013] und [Meitinger 2008] für das Anwendungsfeld der unbemannten Kampfflugzeuge betrachtet. Für die Führung durch den Kommandanten eines bemannten Helikopters sind jedoch genauere Betrachtungen der Auswirkungen hinsichtlich der taktischen Anforderungen, der Machbarkeit, der resultierenden Arbeitsbeanspruchung und des Situationsbewusstseins nötig. Für die Verbesserung dieses Situationsbewusstseins sowohl bei der auftragsbasierten Führung eines UAV-Teams als auch bei der Führung einzelner unbemannter Fluggeräte soll die Selbsterklärungsfähigkeit der UAVs [Gangl et al. 2013] gesteigert werden.

Betrachtet man Abstraktionsebenen der Führung jenseits der Führung von Teams, so stellt sich die Frage nach einer Loslösung der unbemannten Fluggeräte vom bemannten Helikopter. Ein Abkoppeln und Wiedereingliedern der UAVs aus dem MUM-T-Arbeitssystem könnte genutzt werden, um die Betrachtung unbemannter Fluggeräte auf ihre *Fähigkeiten* zu reduzieren. Diese Fähigkeiten können – vollständig oder teilweise – in einem Einsatzgebiet verbleiben und von anderen Helikoptern oder Truppenteilen genutzt werden, selbst wenn der bemannte Helikopter seine Mission bereits beendet hat. Umgekehrt sind nicht mehr alle Fähigkeiten a priori mit dem Helikopter mitzuführen, sondern können räumlich vorgehalten werden. Die Fragestellung hierbei ist, wie die Verantwortung über Fluggeräte eindeutig zugeordnet und übertragen werden kann, wenn diese gleichzeitig auf ihre Fähigkeiten bzgl. der Mission reduziert werden. Ebenfalls ist zu beachten, wie dieses hohe Abstraktionsniveau mit der oben beschriebenen Forderung nach variablen Automationsgraden kombiniert werden kann.

Anstatt ein technisches Artefakt ohne Rücksicht auf Mensch und Nutzbarkeit zu optimieren, wird der Mensch im Arbeitssystem als oberste Entscheidungsinstanz integriert. Sein Erfahrungsschatz soll nicht durch technische Systeme in der Geltung behindert sondern aktiv nutzbar gemacht werden um das Gelingen der übergeordneten Zielsetzung zu unterstützen.

A Literaturverzeichnis

[ACT-R Research Group 2011]

ACT-R Research Group: Homepage ACT-R. Carnegie Mellon University. Online verfügbar unter <http://act-r.psy.cmu.edu/>, zuletzt geprüft am 03.11.2011.

[Aibotix GmbH 2012]

Aibotix GmbH (2012): Aibotix Homepage. Kassel. Online verfügbar unter <http://aibotix.de/produkte/aibot-x6/anwendungen/>, zuletzt geprüft am 14.02.2012.

[Alparslan 2006]

Alparslan, Adem (2006): Strukturalistische Prinzipal-Agent-Theorie. Eine Reformulierung der Hidden-Action-Modelle aus der Perspektive des Strukturalismus. 1. Auflage, Wiesbaden: Deutscher Universitätsverlag.

[Anderson et al. 2004]

Anderson, John R.; Bothell, Daniel; Byrne, Michael D.; Douglass, Scott; Lebiere, Christian; Qin, Yulin (2004): An integrated theory of the mind. In: *Psychological Review*, vol. 111, no. 4, S. 1036–1060. Online verfügbar unter <http://act-r.psy.cmu.edu/papers/526/FSQUERY.pdf>.

[AOS 2008]

Pressemitteilung der AOS - Autonomous Decision-Making Software. JACK Decision-making for Taranis UCAV (2008). Online verfügbar unter http://www.aosgrp.com/news/jack_decision-making_for_ta.html, zuletzt aktualisiert am 09.05.2008, zuletzt geprüft am 22.03.2012.

[AOS 2012]

AOS - Autonomous Decision Making Software: JACK product homepage. Online verfügbar unter <http://www.agent-software.com.au/products/jack/>, zuletzt geprüft am 22.03.2012.

[ATP 49(E) 2004]

ATP 49(E) (2004): Use of helicopters in land operations - doctrine. NATO.

[Australian Government 2011]

Australian Government (2011): Civil Aviation Safety Regulations 1998. CASR. Online verfügbar unter <http://www.comlaw.gov.au/Details/F2011C00973>.

[Baishya und Lewis 2009]

Baishya, Dhruva; Lewis, Michael (2009): Algorithm Steering for Mixed-Initiative Robot Teams. In: *8th International Conference on Autonomous Agents and Multiagent Systems (AAMAS09)*. Workshop on Mixed-Initiative MAS. Online verfügbar unter <http://usl.sis.pitt.edu/ulab/aamas-wk09.pdf>, zuletzt geprüft am 21.03.2012.

[Balzert 2011]

Balzert, Helmut (2011): Lehrbuch der Software-Technik. Softwaremanagement. 3. Aufl. Heidelberg: Spektrum Akademischer Verlag.

[Benzler et al. 2008]

Benzler, Andreas; Maiwald, Felix; Schulte, Axel (2008): Projektbericht MiRA. Hg. v. Universität der Bundeswehr München. Institut für Flugsysteme. Neubiberg.

[Benzler et al. 2009]

Benzler, Andreas; Maiwald, Felix; Schulte, Axel (2009): Military Rotocraft Associate Teaming (MiRA-T). Hg. v. Universität der Bundeswehr München. Institut für Flugsysteme. Neubiberg.

[Billings 1997]

Billings, C. E. (1997): Aviation automation. The search for a human-centered approach. Mahwah, N.J: Lawrence Erlbaum Associates Publishers.

[Boden 2008]

Boden, Margaret A. (2008): Mind as machine. Oxford: Clarendon Press.

[Bourne et al. 2005]

Bourne, Lyle E.; Ekstrand, Bruce R.; Bourne-Ekstrand (2005): Einführung in die Psychologie. 4. Aufl. Eschborn: Klotz.

[Braubach et al. 2005]

Braubach, L.; Pokahr, A.; Moldt, D.; Lamersdorf, W. (2005): Goal representation for BDI agent systems. In: *Programming multi-agent systems*, S. 44–65. Online verfügbar unter https://vsis-www.informatik.uni-hamburg.de/getDoc.php/publications/208/goalsemantics_postproc_springer.pdf zuletzt geprüft am 06.03.2012.

[Breece und Meely 2010]

Breece, Roger; Meely, Michael (2010): Testing the MUM Teaming System from the Apache Block III Attack Helicopter: An Armed Manned-Unmanned Team. The Aviation Flight Test Directorate (AFTD), US Army. Huntsville, AL, USA, 16.06.2010. Online verfügbar unter https://acc.dau.mil/adl/en-US/386253/file/52136/Breece-Testing_UAS_from_the_Apache_V3_June2010.pdf, zuletzt geprüft am 23.03.2012.

[Brown et al. 2007]

Brown, Kim; Drake, Sam; Mason, Keith; Piotrowski, Andrew; Swierkowski, Leszek (2007): A distributed stand-in EW hunter-killer system. In: *10th International Conference on Information Fusion*, S. 1–8. Online verfügbar unter <http://ieeexplore.ieee.org/jelx5/4407957/4407958/04407985.pdf?tp=&arnumber=4407985&isnumber=4407958>.

[Burchardt et al. 2011]

Burchardt, Ulla; Feist, Thomas; Röspel, René; Neumann, Martin; Sitte, Petra; Fell, Hans-Joseph (2011): Stand und Perspektiven der militärischen Nutzung unbemannter Systeme. Bericht des Ausschusses für Bildung, Forschung und Technologiefolgenabschätzung. Deutscher Bundestag (17/6904). Online verfügbar unter <http://dip21.bundestag.de/dip21/btd/17/069/1706904.pdf>, zuletzt geprüft am 14.02.2012.

- [Busch 2008]
Busch, Michael W. (2008): Kompetenzsteuerung in Arbeits- und Innovationsteams. Eine gestaltungsorientierte Analyse. 1. Aufl. Wiesbaden: Gabler.
- [CAA 2002]
Unmanned aerial vehicle operations in UK airspace. Guidance (2002). London: Civil Aviation Authority. Online verfügbar unter <http://www.soton.ac.uk/~jps7/D8%20website/CAA%20UAV%20operation%20guidelines.pdf>, zuletzt geprüft am 14.02.2012.
- [Cardelli und Wegner 1985]
Cardelli, Luca; Wegner, Peter (1985): On understanding types, data abstraction, and polymorphism. In: *ACM Computing Surveys*, vol. 17, no. 4, S. 471–523.
- [Clarke und Baniassad 2005]
Clarke, Siobhán; Baniassad, Elisa (2005): Aspect-oriented analysis and design. The theme approach. Upper Saddle River, N.J., London: Addison-Wesley.
- [von Clausewitz 2008]
Clausewitz, Carl von (2008): Vom Kriege. Hamburg: Nikol.
- [Cleary et al. 2000]
Cleary, Michael E.; Abramson, Mark; Adams, Milton B.; Kolitz, Stephan (2000): Metrics for Embedded Collaborative Intelligent Systems. Charles Stark Draper Laboratory Inc.
- [Clough 2002]
Clough, Bruce T. (2002): Metrics, Schmetrics! How The Heck Do You Determine A UAV's Autonomy Anyway? In: *2002 Performance Metrics for Intelligent Systems (PerMIS'02) Workshop*. Gaithersburg, MD, USA, 13.-15. August 2002. Online verfügbar unter <http://www.dtic.mil/cgi-bin/GetTRDoc?AD=ADA515926>, zuletzt geprüft am 16.08.2012.
- [COP 2007]
Kampfhubschrauberregiment 36 der Bundeswehr (2007): Combat Operating Procedures (COP) Air Manoeuvre.
- [Cummings und Mitchell 2008]
Cummings, M.L; Mitchell, P.J (2008): Predicting controller capacity in supervisory control of multiple UAVs. In: *IEEE Transactions on Systems, Man and Cybernetics, Part A: Systems and Humans*, vol. 38 no. 2, S. 451-460. Online verfügbar unter <http://web.mit.edu/aeroastro/labs/halab/papers/CummingsMitchell07.pdf>.
- [de Bento 2008]
Bento, Maria Fátima de (2008): Unmanned Aerial Vehicles. An Overview. In: *Inside GNSS* (1), S. 54–61. Online verfügbar unter <http://www.insidegnss.com/auto/janfeb08-wp.pdf>, zuletzt geprüft am 20.03.2012.
- [Delogne 1999]
Delogne, Robert (1999): The B-Hunter UAV System (ADA390637). Online verfügbar unter <http://www.dtic.mil/cgi-bin/GetTRDoc?AD=ADP010763>, zuletzt geprüft am 26.01.2012.

[DIN EN ISO 9241]

DIN EN ISO 9241, April 1999: Ergonomie der Mensch-System-Interaktion.

[DIN EN ISO 6385]

DIN EN ISO 6385, Mai 2004: Grundsätze der Ergonomie für die Gestaltung von Arbeitssystemen.

[Doherty und Rudol 2007]

Doherty, Patrick; Rudol, Piotr (2007): A UAV Search and Rescue Scenario with Human Body Detection and Geolocalization. AI 2007: Advances in Artificial Intelligence. In: Mehmet Orgun und John Thornton (Hg.): *Advances in Artificial Intelligence*, Bd. 4830: Springer Berlin / Heidelberg (Lecture Notes in Computer Science), S. 1–13. Online verfügbar unter <http://www.springerlink.com/content/t361252205328408/fulltext.pdf>, zuletzt geprüft am 14.02.2012.

[Donath 2012]

Donath, Diana (2012): Verhaltensanalyse der Beanspruchung des Operators in der Multi-UAV-Führung. Dissertation. Universität der Bundeswehr München, Neubiberg. Institut für Flugsysteme.

[Donath et al. 2010]

Donath, Diana; Rauschert, Andreas; Schulte, Axel (2010): Cognitive assistant system concept for multi-UAV guidance using human operator behaviour models. In: *Conference on Humans Operating Unmanned Systems (HUMOUS'10)*. Toulouse, France, 26.-27.04.2010.

[Drake et al. 2003]

Drake, Sam; Brown, Kim; Bowyer Richard; Bogner Robert (2003): Agent control of autonomous air vehicles for geolocation of radar emitters. In: *Proceedings of the Sixth International Conference of Information Fusion*. Online verfügbar unter <http://www.isif.org/fusion/proceedings/fusion03CD/special/s19.pdf>, zuletzt geprüft am 01.12.2012.

[Duggan et al. 2009]

Duggan, David S.; Felio, David A.; Pate, Billy B.; Longhi, Vince R.; Petersen, Jerry L.; Bergee, Mark J. (2009): Vehicle Control System Including Related Methods and Components. Patentanmeldung. Angemeldet durch Geneva Aerospace. Anmelden: 12/008,176. Veröffentlichungsnr: US 2009/0125163 A1.

[Eisenbeiss 2004]

Eisenbeiss, H. (2004): A mini unmanned aerial vehicle (UAV): system overview and image acquisition. In: *International Archives of Photogrammetry Remote Sensing and Spatial Information Sciences* 36 (5/W1). Online verfügbar unter <http://www.isprs.org/proceedings/XXXVI/5-W1/papers/11.pdf>, zuletzt geprüft am 01.12.2012.

[Eisenführ und Weber 2003]

Eisenführ, Franz; Weber, Martin (2003): Rationales Entscheiden. 4. Auflage Berlin u.a: Springer-Verlag (Springer-Lehrbuch).

[EMT 2009]

EMT (2009): LUNA Datenblatt. Hg. v. EMT Ingenieursgesellschaft Dipl.-Ing. Hartmut Euer mbH. Online verfügbar unter http://www.emt-penzberg.de/fileadmin/download/LUNA_de.pdf, zuletzt aktualisiert am 25.11.2009, zuletzt geprüft am 16.02.2012.

[EMT 2012]

EMT (2012): Aladin Drohnensystem. Homepage EMT. Hg. v. EMT Ingenieursgesellschaft Dipl.-Ing. Hartmut Euer mbH. Online verfügbar unter <http://www.emt-penzberg.de/index.php?id=13>, zuletzt geprüft am 30.07.2012.

[Endsley 1988]

Endsley, Mica R. (1988): Situation awareness global assessment technique (SAGAT). In: *Proceedings of the IEEE Aerospace and Electronics Conference*, S. 789–795. Online verfügbar unter <http://ieeexplore.ieee.org/stamp/stamp.jsp?arnumber=195097>, zuletzt geprüft am 01.12.2012.

[Endsley 1995]

Endsley, M.R (1995): Toward a theory of situation awareness in dynamic systems. In: *Human Factors: The Journal of the Human Factors and Ergonomics Society* 37 (1), S. 32–64. Online verfügbar unter <http://uwf.edu/skass/documents/HF.37.1995-Endsley-Theory.pdf>, zuletzt geprüft am 24.01.2012.

[Endsley 2004]

Endsley, Mica R. (2004): Situation awareness: Progress and directions. In: Simon Banbury und Sébastien Tremblay (Hg.): *A Cognitive approach to situation awareness. Theory and application*. Burlington, VT: Ashgate Pub., S. 317–341.

[Farrell et al. 2007]

Farrell, P.; Gersh, J.; Hollnagel, Erik; MacLeod, I.; Miller, Christopher; Schulte, Axel; Stensson, P. (2007): Theoretical Frameworks. In: RTO/NATO (Hg.): *Uninhabited Military Vehicles (UMVs): Human Factors Issues in Augmenting the Force*. Final Report of the RTO Human Factors and Medicine Panel (HFM) Task Group HFM-078/TG-017.

[Ferry et al. 2007]

Ferry, M.; Ziming, Tu; Stephens, L.; Prickett, G. (2007): Towards True UAV Autonomy. In: *Information, Decision and Control, 2007*, S. 170–175. Online verfügbar unter <http://ieeexplore.ieee.org/stamp/stamp.jsp?arnumber=4252496>, zuletzt geprüft am 22.03.2012.

[Fitts 1951]

Fitts, Paul M. (1951): Human engineering for an effective air-navigation and traffic-control system. Washington: National Research Council, Division of Anthropology and Psychology, Committee on Aviation Psychology.

[Flesher et al. 2011]

Flesher, Daniel; Oni, Oluseyi; Sassoon, Aaron (2011): Border Security: Air Team. Online verfügbar unter <http://www.isr.umd.edu/~austin/enes489p/projects2011a/BorderSecurity-Air-Team-FinalReport.pdf>.

[Freed et al. 2005]

Freed, Michael; Bonasso, Pete; Ingham, Michel; Kortenkamp, David; Pell, Barney; Penix, John (2005): Trusted autonomy for spaceflight systems. In: *AIAA First Space Exploration Conference*.

[Friehmelt 2004]

Friehmelt, Holger (2004): Practical Examples of Procedure Development for Unmanned Flight in Controlled Airspace. Online verfügbar unter http://www.icas.org/ICAS_ARCHIVE_CD1998-2010/ICAS2004/PAPERS/107.PDF, zuletzt geprüft am 14.02.2012.

[Fudge et al. 2003]

Fudge, Michael; Stagliano, Thomas; Tsiao, Sunny (2003): Non-traditional flight safety systems & integrated vehicle health management systems. Descriptions of Proposed & Existing Systems and Enabling Technologies & Verification Methods. Federal Aviation Administration. Online verfügbar unter http://ipv6.faa.gov/about/office_org/headquarters_offices/ast/licenses_permits/media/DO3_Report_final.pdf, zuletzt geprüft am 26.01.2012.

[Funk und Miller 2001]

Funk, Harry; Miller, Christopher (2001): User acceptance and plan recognition: Why even perfect intent inferencing might not be good enough. In: *AAAI Fall Symposium on Intent Inference for Collaborative Tasks*. North Falmouth, MA, USA, 2.-4. November 2001. Association for the Advancement of Artificial Intelligence. Online verfügbar unter <http://www.sift.net/sites/default/files/documents/2001/AAAI-FS-01.pdf>, zuletzt geprüft am 27.01.2012.

[Gamma 2010]

Gamma, Erich (2010): Design patterns. Elements of reusable object-oriented software. 38. Auflage. Boston [u.a.]: Addison-Wesley.

[Gangl et al. 2013]

Gangl, Stefan; Lettl, Benjamin; Schulte, Axel (2013): Single-seat cockpit-based management of multiple UCAVs using on-board cognitive agents for coordination in manned-unmanned fighter missions. In: *HCI Int. 2013*.

[Girard et al. 2004]

Girard, A. R.; Howell, A. S.; Hedrick, J. K. (2004): Border patrol and surveillance missions using multiple unmanned air vehicles. In: *Decision and Control, 2004. CDC. 43rd IEEE Conference on Decision and Control 1*, S. 620–625. Online verfügbar unter <http://ieeexplore.ieee.org/ielx5/9774/30836/01428713.pdf?tp=&arnumber=1428713&isnumber=30836>, zuletzt geprüft am 01.12.2012.

[González et al. 2011]

González, Enrique; La Rosa, Fernando de; Miranda, Alvaro Sevastián; Angel, Julián; Figueredo, Juan Sebastián (2011): A Control Agent Architecture for Cooperative Robot Tasks. In: Toshiyuki Yasuda (Hg.): *Multi-Robot Systems, Trends and Development: Intech*, S. 491–514. Online verfügbar unter http://cdn.intechopen.com/pdfs/12655/InTech-A_control_agent_architecture_for_cooperative_robotic_tasks.pdf, zuletzt geprüft am 26.04.2012.

[Goodrich und Olsen 2003]

Goodrich, M.A; Olsen, D.R (2003): Seven principles of efficient human robot interaction. In: *SMC'03 Conference Proceedings. 2003 IEEE International Conference on Systems, Man and Cybernetics. Conference Theme - System Security and Assurance* (Cat. No.03CH37483): IEEE, S. 3942–3948.

[Gouqing Zhou et al. 2005]

Gouqing Zhou; Chaokui Li; Penggen Cheng (2005): Unmanned aerial vehicle (UAV) real-time video registration for forest fire monitoring. In: *Geoscience and Remote Sensing Symposium, 2005. IGARSS '05. Proceedings. 2005 IEEE International 3*, S. 1803–1806. Online verfügbar unter <http://ieeexplore.ieee.org/ielx5/10226/32597/01526355.pdf>, zuletzt geprüft am 14.02.2012.

[Hammond 2004]

Hammond, Grant Tedrick (2004): *The mind of war. John Boyd and American security*. Washington: Smithsonian Books.

[Hanks et al. 1993]

Hanks, Steve; Pollack, Martha E.; Cohen, Paul R. (1993): Benchmarks Test Beds Controlled Experimentation and the Design of Agent Architectures. In: *AI Magazine* 14 (4), S. 17-42. Online verfügbar unter <https://www.aaai.org/ojs/index.php/aimagazine/article/viewFile/1066/984>, zuletzt geprüft am 03.04.2012.

[Hart und Staveland 1988]

Hart, Sandra G.; Staveland, Lowell E. (1988): Development of NASA-TLX (Task Load Index): Results of empirical and theoretical research. In: *Human mental workload* 1, S. 139-183.

[Hartmann 2004]

Hartmann, Matthias H. (2004): Komplexitätsreduktion als Kunst. In: Matthias H. Hartmann (Hg.): *Berichtswesen für High-Tech-Unternehmen. Reporting mit Balanced Scorecard, web-basierten Systemen und Beteiligungsmanagement*. Berlin: Schmidt, S. 39–60.

[Hasslacher und Tilden 1995]

Hasslacher, Brosl; Tilden, Mark W. (1995): Living machines. In: *Robotics and Autonomous Systems* 15 (1), S. 143–169. Online verfügbar unter http://www.robot.cl/pics/viaje/living_machines.pdf, zuletzt geprüft am 01.12.2012.

[Hazlebeck 2011]

Hazlebeck, Thomas E. (2011): United States Air Force Aircraft Investigation Board Report. MQ-1B, T/N 07-3249. Flugunfallbericht. Hg. v. United States Air Force. Holloman Air Force Base, New Mexico. Online verfügbar unter http://usaf.aib.law.af.mil/ExecSum2011/MQ-1B_Djibouti_17%20May%2011.pdf, zuletzt geprüft am 22.08.2012.

[HDv 100/900 1998]

Heeresdienstvorschrift der Bundeswehr 100/900: Führungsbegriffe (15.08.1998).

[Herczeg 2002]

Herczeg, Michael (2002): Intention-Based Supervisory Control. Kooperative Mensch-Maschine-Kommunikation in der Prozessführung. In: *DGLR Bericht* (4), S. 29–42. Online verfügbar unter http://www.imis.uni-luebeck.de/publikationen/Herczeg-DGLR_FAST54-2002-web.pdf, zuletzt geprüft am 22.08.2012.

[Herrmann et al. 2003]

Herrmann, Thomas; Jahnke, Isa; Loser, Kai-Uwe (2003): Die Unterstützung von Rollenzuweisung und Rollenübernahme: ein Ansatz zur Gestaltung von Wissensmanagement- und CSCL-Systemen. In: Szwillus, Gerd & Ziegler, Jürgen (Hg.): *Mensch & Computer*, S. 87–98. Online verfügbar unter <http://mc.informatik.uni-hamburg.de/konferenzbaende/mc2003/konferenzband/muc2003-09-herrmann.pdf>, zuletzt geprüft am 22.08.2012.

[Hill 1963]

Hill, Lawrence S. (1963): The application of queuing theory to the span of control. In: *Academy of Management journal* 6 (1963), S. 58–69.

[Huang 2006]

Huang, Hui-Min (2006): The Autonomy Levels For Unmanned Systems (ALFUS) Framework. Interim Results. In: *Performance Metrics for Intelligent Systems (PerMIS'06) Workshop*. Gaithersburg, MD, USA, 21.-23. August 2006. Online verfügbar unter http://www.nist.gov/customcf/get_pdf.cfm?pub_id=823586, zuletzt geprüft am 16.08.2012.

[Huang 2008]

Huang, Hui-Min (2008): Autonomy Levels for Unmanned Systems (ALFUS) Framework. Volume I: Terminology. Version 2.0. National Institute of Standards and Technology (NIST Special Publication 1011-I-2.0). Online verfügbar unter http://www.nist.gov/el/isd/ks/upload/NISTSP_1011-I-2-0.pdf, zuletzt geprüft am 15.08.2012.

[Jarasch et al. 2010]

Jarasch, Gregor; Meier, Sonja; Kingsbury, Patrick; Minas, Mark; Schulte, Axel (2010): Design Methodology for an Artificial Cognitive System Applied to Human-Centred Semi-Autonomous UAV Guidance. In: *Conference on Humans Operating Unmanned Systems (HUMOUS'10)*. Toulouse, France, 26.-27.04.2010.

[Johannsen 1993]

Johannsen, Gunnar (1993): *Mensch-Maschine-Systeme*. Berlin: Springer.

[Johnson et al. 2007]

Johnson, Rubin; Leen, Michael; Goldberg, Daniel (2007): Testing Adaptive Levels of Automation (ALOA) for UAV Supervisory Control. Air Force Research Laboratory. Wright Patterson AFB, OH, USA (AFRL-HE-WP-TR-2007-0068). Online verfügbar unter <http://www.dtic.mil/cgi-bin/GetTRDoc?AD=ADA470315&Location=U2&doc=GetTRDoc.pdf>, zuletzt geprüft am 21.03.2012.

[Kamal et al. 2005]

Kamal, W.A; Da, Wei Gu; Postlethwaite, I. (2005): Real Time Trajectory Planning for UAVs Using MILP. In: *44th IEEE Conference on Decision and Control, 2005 and 2005 European Control Conference*, S. 3381–3386. Online verfügbar unter <http://ieeexplore.ieee.org/stamp/stamp.jsp?arnumber=1582684>, zuletzt geprüft am 01.12.2012

[Kaminer et al. 2006]

Kaminer, I.; Yakimenko, O.; Pascoal, A.; Ghabcheloo, R. (2006): Path Generation, Path Following and Coordinated Control for TimeCritical Missions of Multiple UAVs. In: *American Control Conference, 2006*, S. 4906–4913. Online verfügbar unter <http://ieeexplore.ieee.org/stamp/stamp.jsp?arnumber=1657498>, zuletzt geprüft am 01.12.2012

[Karim und Heinze 2005]

Karim, Samin; Heinze, Clint (2005): Experiences with the design and implementation of an agent-based autonomous UAV controller. In: *AAMAS '05 Proceedings of the fourth international joint conference on Autonomous agents and multiagent systems*, S. 19–26.

[Kendoul 2012]

Kendoul, Farid (2012): Survey of advances in guidance, navigation, and control of unmanned rotorcraft systems. In: *Journal of Field Robotics*, vol. 29, no. 2, S. 315–378. Online verfügbar unter <http://www.ict.csiro.au/staff/farid.kendoul/JFR-2012.pdf>, zuletzt geprüft am 01.12.2012

[Kingdon und Thurber 2011]

Kingdon, John W.; Thurber, James A. (2011): *Agendas, alternatives, and public policies*. Boston: Pearson Longman (Longman classics in political science).

[Klußmann und Malik 2007]

Klußmann, Niels; Malik, Arnim (2007): *Lexikon der Luftfahrt*. 2. Auflage Berlin: Springer.

[Kreitz et al. 2008]

Kreitz, Arne; Lindstädt, Hagem; Wolff, Michael (2008): Führungsoptimalität versus Organisationsoptimalität von Leitungsspannen. In: Hugo Kossbiel und Thomas Spengler (Hg.): *Modellgestützte Personalentscheidungen 10*. Online verfügbar unter http://www.ibu.kit.edu/rd_download/09_Fuehrungs_vs_Organisatinsoptimalitaet_von_Leitungsspannen.pdf, zuletzt geprüft am 01.08.2012.

[Kriegel 2011]

Kriegel, Michael (2011): *Wissensbasierte Konfiguration eines unbemannten Fluggeräts als Architekturansatz zur kognitiven Flugführung*. Dissertation. Universität der Bundeswehr, München. Institut für Flugsysteme.

[Kutta Technologies 2012]

Kutta Technologies (2012): *Manned / Unmanned Teaming Kit (MUM-TK)*. Produktbroschüre. Online verfügbar unter <http://www.kuttatech.com/KuttaTechPDF/Kutta-MUMT.pdf>, zuletzt aktualisiert am 25.07.2012, zuletzt geprüft am 17.08.2012.

[Laird et al. 1998]

Laird, John E.; Coulter, Karen.J; Jones, Randolph M.; Kenny, Patrick G.; Koss, Frank; Nielsen, Paul E.: Integrating intelligent computer generated forces in distributed simulations: TacAir-Soar in STOW-97. In: *Proceedings of the 1998 Simulation Interoperability Workshop*.

[Laird et al. 1986]

Laird, John; Newell, Allen; Rosenbloom, Paul S. (1986): Soar. An architecture for general intelligence. Stanford: Dept. of Computer Science, Stanford University.

[Laird et al. 2011]

Laird, John E.; Congdon, Clare Bates; Coulter, Karen J.; Derbinsky, Nate; Nu, Joseph (2011): The Soar User's Manual. Version 9.3.1 (Draft). Computer Science and Engineering Department, University of Michigan. Online verfügbar unter <http://soar.googlecode.com/files/SoarManual931.pdf>, zuletzt aktualisiert am 06.06.2011, zuletzt geprüft am 01.09.2011.

[Lanc 1975]

Lanc, Otto (1975): Ergonomie. Psychologie der technischen Welt. Stuttgart: Kohlhammer (Urban-Taschenbücher, 197).

[Leistenschneider 2002]

Leistenschneider, Stephan (2002): Auftragstaktik im preussisch-deutschen Heer 1871 bis 1914. Hamburg: Mittler.

[Lekavý und Návrát 2007]

Lekavý, Marián; Návrát, Pavol (2007): Expressivity of STRIPS-like and HTN-like planning. In: *Agent and Multi-Agent Systems: Technologies and Applications*, S. 121–130. Online verfügbar unter http://www2.fiit.stuba.sk/~lekavy/publikacie/2007%20Expressivity%20of%20STRIPS-Like%20and%20HTN-Like%20Planning/strips_vs_htn_lekavy.pdf, zuletzt geprüft am 22.03.2012.

[Li und Wang 2012]

Li, Yibo; Wang, Xinxing (2012): Hierarchical Model and Evaluation Method for Autonomy Levels of Unmanned Platforms. In: *Research Journal of Applied Sciences, Engineering and Technology* 4 (11), S. 1488–1493. Online verfügbar unter <http://maxwellsci.com/print/rjaset/v4-1488-1493.pdf>, zuletzt geprüft am 16.08.2012.

[Loebner 2012]

Loebner, Hugh: The Loebner Prize in Artificial Intelligence. "The First Turing Test". Online verfügbar unter <http://www.loebner.net/Prizef/loebner-prize.html>, zuletzt geprüft am 06.03.2012.

[Luftbild-Service-System Deutschland GmbH 2012]

Luftbild-Service-System Deutschland GmbH (2012): Homepage Luftbild-Service-System Deutschland. service-drone.de GmbH. Berlin. Online verfügbar unter <http://www.service-drone.de/>, zuletzt geprüft am 14.02.2012.

[MacSween-George 2003]

MacSween-George, Sandra Lynn (2003): Will the public accept UAVs for cargo and passenger transportation? In: *Aerospace Conference, 2003. Proceedings. 2003 IEEE* 1, S. 1–367 vol.1. Online verfügbar unter <http://ieeexplore.ieee.org/ielx5/8735/27660/01235066.pdf?tp=&arnumber=1235066&isnumber=27660>.

[Maiwald und Schulte 2011]

Maiwald, Felix; Schulte, Axel (2011): Mental Resource Demands Prediction as a Key Element for Future Assistant Systems in Military Helicopters. In: Don Harris (Hg.), *Engineering Psychology and Cognitive Ergonomics*. Bd. 6781: Springer Berlin / Heidelberg (Lecture Notes in Computer Science), S. 582–591. Online verfügbar unter <http://www.springerlink.com/content/n215745434q72070/fulltext.pdf>, zuletzt geprüft am 01.12.2012.

[Martins 1990]

Martins, Joao P. (1990): The truth, the whole truth, and nothing but the truth. In: *AI Magazine* 11 (4), S. 7. Online verfügbar unter <http://www.aaai.org/ojs/index.php/aimagazine/article/download/866/784>, zuletzt geprüft am 31.01.2012.

[Matzner 2009]

Matzner, Alexander (2009): Weiterentwicklung einer Kognitiven Systemarchitektur auf Basis von Graphtransformationen. Dissertation. Universität der Bundeswehr München, Neubiberg. Fakultät für Luft- und Raumfahrttechnik.

[Maza und Ollero 2007]

Maza, I.; Ollero, A. (2007): Multiple UAV cooperative searching operation using polygon area decomposition and efficient coverage algorithms. In: *Distributed Autonomous Robotic Systems 6*, S. 221-230.

[Meitinger 2008]

Meitinger, Claudia (2008): Kognitive Automation zur kooperativen UAV-Flugführung. Dissertation. Universität der Bundeswehr, München. Institut für Systemdynamik und Flugmechanik.

[Meitinger und Schulte 2007]

Meitinger, Claudia; Schulte, Axel (2007): Algorithmenentwicklung und Simulation zur Schwarmführung von UCAVs. GARTEUR AG FM-14 "Autonomy in UAVs". Universität der Bundeswehr München (624/45200430).

[Miller 2005]

Miller, Christopher (2005): Delegation Architectures: Playbooks and Policy for Keeping Operators in Charge. In: *Workshop on Mixed-Initiative Planning and Scheduling*, S. 28.

[Miller et al. 2004]

Miller, Christopher; Goldman, Robert; Funk, Harry; Wu, Peggy; Pate, Billy: A playbook approach to variable autonomy control: Application for control of multiple, heterogeneous unmanned air vehicles. In: *Proceedings of FORUM 60, the Annual Meeting of the American Helicopter Society*. Online verfügbar unter <http://mpls.sift.info/sites/default/files/documents/2004/MGFWP-AHS04-fin.pdf>, zuletzt geprüft am 01.12.2012.

[Miller et al. 2005]

Miller, Christopher; Funk, Harry; Wu, Peggy; Goldman, Robert; Meisner, John; Chapman, Marc (2005): *The Playbook (Trademark) Approach to Adaptive Automation*. Ft. Belvoir: Defense Technical Information Center.

[Miura et al. 2002]

Miura, Ryu; Maruyama, Masaaki; Suzuki, Mikio; Tsuji, Hiroyuki; Oodo, Masayuki; Nishi, Yuichiro (2002): Experiment of telecom/broadcasting mission using a high-altitude solar-powered aerial vehicle Pathfinder Plus. In: *The 5th International Symposium on Wireless Personal Multimedia Communications 2*, S. 469–473 vol.2. Online verfügbar unter <http://ieeexplore.ieee.org/ielx5/8154/23648/01088218.pdf?tp=&arnumber=1088218&isnumber=23648>, zuletzt geprüft am 01.12.2012.

[STANAG 4586 2007]

STANAG 4586, 14.11.2007: Standard Interfaces of UAV control system (UCS) for NATO UAV interoperability. NATO.

[Nau et al. 2003]

Nau, Dana S.; Au, Tsz-Chiu; Ilghami, Okhtay; Kuter, Ugur; Murdock, J. William; Wu, Dan; Yaman, Fusun (2003): SHOP2: An HTN Planning System. In: *Journal of Artificial Intelligence Research*, Bd. 20, S. 379–404. Online verfügbar unter <http://www.cs.utexas.edu/~chiu/papers/Nau03shop2.pdf>, zuletzt geprüft am 02.03.2012.

[Newell und Simon 1976]

Newell, Allen; Simon, Herbert A. (1976): Computer science as empirical inquiry: symbols and search. In: *Communications of the ACM*, vol. 19, no. 3, S. 113–126. Online verfügbar unter <http://www.cs.utexas.edu/~kuipers/readings/Newell+Simon-cacm-76.pdf>, zuletzt geprüft am 12.03.2012.

[Norman 2007]

Norman, Donald A. (2007): *The design of future things*. 1. Auflage, New York: Basic Books/Perseus Book Group.

[Offutt et al. 1993]

Offutt, A.J; Harrold, M.J; Kolte, P. (1993): A software metric system for module coupling. In: *Journal of Systems and Software*, vol. 20 no. 3, S. 295–308. Online verfügbar unter <http://pleuma.cc.gatech.edu/aristotle/Publications/Papers/jss93.pdf>, zuletzt geprüft am 01.12.2012.

[Olsen Jr. und Wood 2004]

Olsen Jr., Dan R.; Wood, Stephen Bart (2004): Fan-out: measuring human control of multiple robots. In: *Proceedings of the SIGCHI conference on Human factors in computing systems*, S. 231-238.

[Olsen und Goodrich 2003]

Olsen, Dan R.; Goodrich, Michael A. (2003): Metrics for evaluating human-robot interactions. In: *2003 Performance Metrics for Intelligent Systems (PerMIS'03) Workshop*. Gaithersburg, MD, USA, 16.-18. September 2003.

[Onken 1997]

Onken, Reiner (1997): The cockpit assistant system CASSY as an on-board player in the ATM environment. In: *1st USA/Europe Air Traffic Management Research and Development Seminar*. Saclay, France, 17.-19. Juni 1997.

Online verfügbar unter

http://www.atmseminar.org/seminarContent/seminar1/papers/p_024_ASSP.pdf

zuletzt geprüft am 24.07.2012.

[Onken und Schulte 2010]

Onken, Reiner; Schulte, Axel (2010): System-ergonomic design of cognitive automation. Dual-mode cognitive design of vehicle guidance and control work systems. Berlin, Heidelberg: Springer.

[Oppermann 1994]

Oppermann, Reinhard (1994): Adaptive user support: ergonomic design of manually and automatically adaptable software: Lawrence Erlbaum Assoc Inc.

[OSD/ATL/PSA-UW 2011]

OSD/ATL/PSA-UW (2011): Unmanned Systems Integrated Roadmap FY2011-2036. Unmanned Technology Timeline. Hg. v. U.S.A Department of Defence (11-S-3613). Online verfügbar unter

<http://www.acq.osd.mil/sts/docs/Unmanned%20Systems%20Integrated%20Roadmap%20FY2011-2036.pdf>, zuletzt geprüft am 17.01.2012.

[Parasuraman et al. 2000]

Parasuraman, Raja; Sheridan, Thomas B.; Wickens, Christopher D. (2000): A model for types and levels of human interaction with automation. In: *IEEE Transactions on Systems, Man, and Cybernetics - Part A: Systems and Humans* 30 (3), S. 286–297. Online verfügbar unter

<http://ieeexplore.ieee.org/ielx5/3468/18307/00844354.pdf?tp=&arnumber=844354&isnumber=18307>, zuletzt geprüft am 01.12.2012.

[Passenbrunner et al. 2011]

Passenbrunner, Thomas E.; Schwarzgruber, Thomas; Ortner, Peter; del Re, Luigi; Naderhirn, Michael (2011): The SkyObserver project: Autonomous Swarms in Civil Emergency and Disaster Management. In: *AIAA Guidance Navigation and Control GNC Conference*.

[Poole et al. 1998]

Poole, David; Mackworth, Alan K.; Goebel, Randy (1998): Computational intelligence. A logical approach. New York, Oxford: Oxford University Press.

[Puri et al.2007]

Puri, A.; Valavanis, K. P.; Kontitsis, M. (2007): Statistical profile generation for traffic monitoring using real-time UAV based video data. In: *Mediterranean Conference on Control & Automation, 2007*.

Online verfügbar unter <http://www.cse.usf.edu/USL/Papers/med07-traffic.pdf>, zuletzt geprüft am 01.12.2012

[Putzer 2004]

Putzer, Henrik J. (2004): Ein uniformer Architekturansatz für kognitive Systeme und seine Umsetzung in ein operatives Framework. 1. Auflage, Berlin: Köster.

[Rabbath et al. 2011]

Rabbath, C. A.; Léchevin, N.; Apkarian, J. (2011): Experiments with a Passivity-based Formation Control System for Teams of Small Robotic Drones. In: *AIAA Guidance Navigation and Control GNC Conference*.

[Rasmussen 1983]

Rasmussen, Jens (1983): Skills, rules, and knowledge; signals, signs, and symbols, and other distinctions in human performance models. In: *IEEE Transactions on Systems, Man, and Cybernetics - Part A: Systems and Humans* 13 (3), S. 257–266. Online verfügbar unter http://roland.pri.ee/raamatud/konspektid/Olulised%20otsused/Ras_1983.pdf, zuletzt geprüft am 30.01.2012.

[Rauschert 2013]

Rauschert, Andreas (2013): Kognitives Assistenzsystem zur Führung unbemannter Fluggeräte in bemannt-unbemannten Flugmissionen. Dissertation. Universität der Bundeswehr München, Neubiberg. Institut für Flugsysteme.

[Reidelstürz und Schulte 2010]

Reidelstürz, Patrick; Schulte, Axel (2010): Unbemanntes Kleinflugzeugsystem für den Einsatz in der Präzisionslandwirtschaft. Hg. v. Universität der Bundeswehr München. Institut für Flugsysteme. Neubiberg.

[Richards und How 2005]

Richards, A.; How, J. (2005): Mixed-integer programming for control. In: *Proceedings of the American Control Conference 2005*, S. 2676–2683. Online verfügbar unter <http://ieeexplore.ieee.org/stamp/stamp.jsp?arnumber=1470372>, zuletzt geprüft am 01.12.2012

[Romeo et al. 2007]

Romeo, G.; Frulla, G.; Cestino, E. (2007): Design of a High-Altitude Long-Endurance Solar-Powered Unmanned Air Vehicle for Multi-Payload and Operations. In: *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part G: Journal of Aerospace Engineering* 221 (2), S. 199–216. Online verfügbar unter http://www.mp.haw-hamburg.de/pers/Scholz/ewade/2005/JAERO2007_Romeo.pdf, zuletzt geprüft am 01.12.2012

[Russell und Norvig 2010]

Russell, Stuart J.; Norvig, Peter (2010): Artificial intelligence. A modern approach. 3. Auflage. Boston: Pearson (Prentice-Hall series in artificial intelligence).

[Russo et al. 2006]

Russo, Jon; Amduka, Mohammed; Pedersen, Keith; Lethin, Richard; Springer, Jonathan; Manohar, Rajit; Melhem, Rami (2006): Enabling Cognitive Architectures for UAV Mission Planning. In: *High Performance Embedded Computing (HPEC) 2006*. Lexington, U.S.A., 19.09.2006.

[Ruz et al. 2006]

Ruz, J.J; Arevalo, O.; La Cruz, J.M de; Pajares, G. (2006): Using MILP for UAVs Trajectory Optimization under Radar Detection Risk. In: *IEEE Conference on Emerging Technologies and Factory Automation, 2006*, S. 957–960. Online verfügbar unter <http://ieeexplore.ieee.org/stamp/stamp.jsp?arnumber=4178340>, zuletzt geprüft am 01.12.2012

[Saget et al. 2008]

Saget, Sylvie; Legras, François; Coppin, Gilles (2008): Cooperative Interface for a Swarm of UAVs. In: *Conference on Humans Operating Unmanned Systems 2008 (HUMOUS'08)*. Online verfügbar unter <http://conferences.telecom-bretagne.eu/data/humous08/proceedings/17-saget08humous.pdf>, zuletzt geprüft am 17.08.2012.

[Sarter und Woods 1995]

Sarter, Nadine B.; Woods, David D. (1995): How in the world did we ever get into that mode? Mode error and awareness in supervisory control. In: *Human Factors*, vol. 37, no. 1, S. 5–19.

[Schlick et al. 2010]

Schlick, Christopher M.; Luczak, Holger; Bruder, Ralph (2010): *Arbeitswissenschaft*. Heidelberg: Springer.

[Schouwenaars et al. 2006]

Schouwenaars, T.; Valenti, M.; Feron, E.; How, J.; Roche, E. (2006): Linear programming and language processing for human/unmanned-aerial-vehicle team missions. In: *Journal of guidance, control, and dynamics* 29 (2), S. 303–313. Online verfügbar unter http://vertol.mit.edu/papers/SVFHR_AIAA_JGCD_2006.pdf, zuletzt geprüft am 01.12.2012.

[Schreiber et al. 2000]

Schreiber, Guus; Akkermans, Hans; Anjewierden, Anjo; Hoog, Robert de; Shadbolt, Nigel; van de Velde, Walter; Wielinga, Bob (2000): *Knowledge engineering and management. The CommonKADS methodology*. Cambridge: MIT Press.

[Schulte und Stütz 1998]

Schulte, Axel; Stütz, Peter (1998): Evaluation of the cockpit assistant military aircraft CAMA in simulator trials. In: *NATO RTO System Concepts and Integration Panel Symposium. Sensor Data Fusion and Integration of the Human Element*. Ottawa, Kanada.

[Schutte und Trujillo 1996]

Schutte, P.C; Trujillo, A.C (1996): Flight crew task management in non-normal situations. In: *Proceedings of the 40th Annual Meeting of the Human Factors and Ergonomics Society*. Santa Monica, CA, USA.

[Sheridan 1992]

Sheridan, Thomas B. (1992): *Telerobotics, automation, and human supervisory control*. Cambridge: MIT Press.

- [Sheridan und Verplank 1978]
Sheridan, Thomas B.; Verplank, William L. (1978): Human and Computer Control of Undersea Teleoperators. Ft. Belvoir: Defense Technical Information Center.
- [Simon 1996]
Simon, Herbert A. (1996): The sciences of the artificial. 3. Auflage, Cambridge, MS: MIT Press.
- [Soar group 2011]
Soar group: Soar Homepage. University of Michigan. Online verfügbar unter <http://sitemaker.umich.edu/soar/home>, zuletzt geprüft am 03.11.2011.
- [Srinivasan et al. 2007]
Srinivasan, S.; Latchman, H.; Shea, J.; Wong, T.; McNair, J. (2007): Airborne traffic surveillance systems: video surveillance of highway traffic. In: *Proceedings of the ACM 2nd international workshop on Video surveillance & sensor networks*. Online verfügbar unter http://utopia.csis.pace.edu/dps/2007/amannette-wright/airborne_traffic_surveillance.pdf, zuletzt geprüft am 25.11.2012.
- [Strenzke et al. 2011]
Strenzke, Ruben; Uhrmann, Johann; Benzler, Andreas; Maiwald, Felix; Rauschert, Andreas; Schulte, Axel (2011): Managing Cockpit Crew Excess Task Load in Military Manned-Unmanned Teaming Missions by Dual-Mode Cognitive Automation Approaches. In: *AIAA Guidance Navigation and Control GNC Conference 2011*.
- [Strenzke und Schulte 2011]
Strenzke, Ruben; Schulte, Axel (2011): The MMP: A Mixed-Initiative Mission Planning System for the Multi-Aircraft Domain. In: *Scheduling and Planning Applications woRKshop (SPARK) at ICAPS 2011*.
- [Stupakis 2003]
Stupakis, John S. (2003): Automated cargo transport system. Patentanmeldung. Angemeldet durch BoXaiR Engineering LLC, Hewitt, NJ (US) am 13.01.2003. Veröffentlichungsnr: US 6,948,681 B2.
- [Sullivan 2001]
Sullivan, Gregory T. (2001): Aspect-Oriented Programming using Reflection and Metaobject Protocols. In: *Communications of the ACM* 44 (10), S. 95–97. Online verfügbar unter <http://people.csail.mit.edu/gregs/cacm-sidebar.pdf>, zuletzt geprüft am 10.11.2007.
- [Sun-Tzu und Peyn Gitta 2001]
Sun-Tzu; Peyn Gitta (2001): Sun-Tzu über die Kunst des Krieges. Die älteste militärische Abhandlung der Welt. Lüchow: Phänomen-Verlag.
- [Temple und Kingston 2011]
Temple, Thomas; Kingston, Derek (2011): Application of a general index heuristic to road surveillance using multiple UAVs. In: *AIAA Guidance Navigation and Control GNC Conference 2011*.

[Thomson 2009]

Thomson, Carole (2009): Apache Block III completes a milestone, the Limited User Test. Boeing. Online verfügbar unter http://www.boeing.com/apachenews/2009/issue_01/army_s21_p2.html, zuletzt geprüft am 23.03.2012.

[Turing 1950]

Turing, Alan Mathison (1950): Computing machinery and intelligence. In: *Mind : a quarterly review of psychology and philosophy*, S. 433–460.

[UML 2011]

Unified Modeling Language Specification (version 2.4.1) (2011). Online verfügbar unter <http://www.omg.org/spec/UML/2.4.1/>, zuletzt geprüft am 13.12.2011.

[U.S. Air Force 2012a]

U.S. Air Force (2012): MQ-1B Predator Fact Sheet. U.S. Air Force. Online verfügbar unter <http://www.af.mil/information/factsheets/factsheet.asp?fsID=122>, zuletzt aktualisiert am 05.01.2012, zuletzt geprüft am 16.02.2012.

[U.S. Air Force 2012b]

U.S. Air Force (2012): MQ-9 Reaper Fact Sheet. U.S. Air Force. Online verfügbar unter <http://www.af.mil/information/factsheets/factsheet.asp?id=6405>, zuletzt aktualisiert am 05.01.2012, zuletzt geprüft am 16.02.2012.

[Uhrmann et al. 2009]

Uhrmann, Johann; Strenzke, Ruben; Rauschert, Andreas; Schulte, Axel (2009): Manned-unmanned teaming: Artificial cognition applied to multiple UAV guidance. In: *NATO SCI-202 Symposium on Intelligent Uninhabited Vehicle Guidance Systems*. München, 30.06.2009-02.07.2009.

[Uhrmann et al. 2010]

Uhrmann, Johann; Strenzke, Ruben; Schulte, Axel (2010): Task-based Guidance of Multiple Detached Unmanned Sensor Platforms in Military Helicopter Operations. In: *COGIS 2010*. Crawley, UK, 22.11.2010.

[Uhrmann und Schulte 2011]

Uhrmann, Johann; Schulte, Axel (2011): Task-based Guidance of Multiple UAV Using Cognitive Automation. In: Terry Bossomaier und Pascal Lorenz (Hg.): *COGNITIVE 2011 - The Third International Conference on Advanced Cognitive Technologies and Applications*. Rom, S. 47–52.

[Uhrmann und Schulte 2012]

Uhrmann, Johann; Schulte, Axel (2012): Concept, Design and Evaluation of Cognitive Task-based UAV Guidance. In: *International Journal On Advances in Intelligent Systems 2012*.

[Wandke und Nachtwei 2008]

Wandke, Hartmut; Nachtwei, Jens (2008): The different human factor in automation: the developer behind versus the operator in action. In: D. de Waard, F.O. Flemisch, B. Lorenz, H. Oberheid und K.A. Brookhuis (Hg.): *Human factors for assistance and automation*. Maastricht: Shaker Publishing, S. 493–502.

[Weibel 2002]

Weibel, Roland E. (2002): Safety Considerations for Operation of Different Classes of Unmanned Aerial Vehicles in the National Airspace System. Masterarbeit. Massachusetts Institute of Technology, Cambridge, MS. Department of Aeronautics & Astronautics. Online verfügbar unter <http://dspace.mit.edu/bitstream/handle/1721.1/30364/61751476.pdf>, zuletzt geprüft am 14.02.2012.

[Wickens 2002]

Wickens, C.D (2002): Multiple resources and performance prediction. In: *Theoretical issues in ergonomics science* 3 (2), S. 159–177. Online verfügbar unter <http://people.usd.edu/~schieber/psyc792/workload/Wickens2002b.pdf>, zuletzt geprüft am 20.08.2012.

[Wohldmann et al. 2008]

Wohldmann, Erica L.; Healy, Alice F.; Bourne, Lyle E. (2008): A mental practice superiority effect: Less retroactive interference and more transfer than physical practice. In: *Journal of Experimental Psychology: Learning, Memory, and Cognition* 34 (4), S. 823–833.

[Wohlers und Blohm 2007]

Wohlers, Klaus; Blohm, Christian: Flugführungskonzept der KZO Drohne. Autonomie und Verantwortlichkeiten. In: *Workshop der DGLR Fachausschüsse*. Neubiberg, 15.02.2007. Online verfügbar unter http://q3.dglr.de/fileadmin/inhalte/dglr/fb/q3/veranstaltungen/2007_UAV_Fuehrungsaspekte/13BlohmWohlers/Flugfuehrungskonzept_KZO_DGLR.pdf, zuletzt geprüft am 16.02.2012.

[Wohletz et al. 2001]

Wohletz, J.M; Castanon, D. A.; Curry, M. L. (2001): Closed-loop control for joint air operations. In: *American Control Conference, 2001*, Bd. 6. Arlington, USA.

[Xu et al. 2011]

Xu, Yunjun; Xin, Ming; Wang, Jianan (2011): Unmanned aerial vehicle formation flight via a hierarchical cooperative control approach. In: *AIAA Guidance Navigation and Control GNC Conference 2011*.

[Yamaha Motor Co. Ltd. 2002]

Yamaha Motor Co. Ltd. (2002): Homepage Yamaha Motor. Yamaha Autonomous-flight Unmanned Helicopter deployed for observation illegal dumping around Mt. Fuji. Online verfügbar unter <http://www.yamaha-motor.co.jp/global/news/2002/02/06/sky.html>, zuletzt geprüft am 15.02.2012.

[Zeitz 1997]

Zeitz, Colleen M. (1997): Some Concrete Advantages of Abstraction. How Experts' Representations Facilitate Reasoning. In: Paul J. Feltovich, Kenneth M. Ford und Robert R. Hoffman (Hg.): *Expertise in context. Human and machine*. Cambridge: MIT Press, S. 43–63.

B Abkürzungsverzeichnis

ACT-R	Adaptive Control of Thought - Rational
ACU	Artificial Cognitive Unit
AEF	Autonomy Enabling Functions
ALFURS	Autonomy Levels for Unmanned Rotorcraft Systems
ALFUS	Autonomy Levels for Unmanned Systems
AMC	Air Mission Commander
ATR	Automated Target Recognition
BDI	Belief, Desire, Intention
C4ISTAR	Command, Control, Communication, Computers, Intelligence, Surveillance, Target Acquisition and Reconnaissance
CAMA	Crew Assistant Military Aircraft
CAS	Close Air Support
CASSY	Cockpit Assistant System
CDU	Control and Display Unit
CGF	Computer Generated Forces
COSA	Cognitive System Architecture
CSAR	Combat Search and Rescue
FCS	Flight Control System
FLOT	Forward Line of Own Troops
FMS	Flight Management System
FO	Fan-Out
FOB	Forward Operating Base
HALE	High Altitude, Long Endurance
HDv	Heeresdienstvorschrift
HOA	Helicopter Operation Area
HTN	Hierarchical Task Network
IAS	Indicated Air Speed
IED	Improvised Explosive Device
ISR	Intelligence, Surveillance, Reconnaissance
IT	Interaction Time
KI	künstliche Intelligenz
KNN	künstliches neuronales Netz
KP	kognitiver Prozess
KZO	Kleinfluggerät Zielortung
LoI	Levels of Interoperability
LRE	Launch and Recovery Element
MABA-MABA	men are better at - machines are better at
MACR	Moderately Abstract Conceptual Representation
MHDD	Multifunctional Head-Down Display
MILP	Mixed Integer Linear Programming
MiRA	Military Rotorcraft Associate
MiRA-T	Military Rotorcraft Associate Teaming
MM	Mission Management
MTOW	maximum takeoff weight
MUM-T	Manned-Unmanned Teaming
MUM-TK	Manned / Unmanned Teaming Kit
NT	Neglect Time

OCU	Operating Cognitive Unit
OF.....	Operating Force
OODA	Observe, Orient, Decide, Act
OSM	Operation Supporting Means
PFD.....	Primary Flight Display
POI	Point of Interest
RAD	Robot Attention Demand
RPG.....	Rocket Propelled Grenade
SA.....	Situation Awareness
SAGAT.....	Situation Awareness Global Assessment Technique
SAM	Surface to Air Missile
SCU	Supporting Cognitive Unit
SHOP2.....	Simple Hierarchical Ordered Planner 2
TLX	Task Load Index
UAS.....	Uninhabited Aerial System
UML.....	Unified Modelling Language
VACS	Variable Autonomy Control System
VFR.....	Visual Flight Rules
WT.....	Wait Time

C Bewertung der Versuchsanordnung durch die Versuchspersonen

Im Rahmen der in Kapitel 5 beschriebenen Versuche, wurde die Simulationsumgebung, die Missionen, das Briefing und das den Messversuchen vorausgehende Training durch die Versuchspersonen bewertet. Die Ergebnisse sind im Folgenden dargestellt.

C.1 Missionsbriefing

Abbildung C-1 stellt das Ergebnis der Befragung bzgl. der Eignung der Missionsbriefings dar. Die Briefings wurden in Anlehnung an ein Trainingsbriefing für eine Helikopter-Verbundoperation erstellt, welche in der Ausbildung von Helikopter-piloten an der Heeresfliegerwaffenschule Bückeburg verwendet wird.

Das Originalbriefing wurde in folgenden Punkten abgewandelt:

- Der Kräfteansatz wird auf einen einzelnen bemannten Helikopter reduziert. Das Originalbriefing sieht mehrere Rotten mit jeweils mindestens zwei bemannten Helikoptern vor. Die Simulation mehrerer bemannter Helikopter war im Rahmen des Versuchsaufbaus und der zu prüfenden Hypothesen nicht zweckdienlich.
- Der Flug findet bei Tag und ausreichenden Sichtverhältnissen statt. Das Originalbriefing beschreibt einen Nachtflug. Der Einsatz der dazu notwendigen Nachtsichtgeräte hätte jedoch eine unverhältnismäßige Steigerung des Simulationsaufwands erfordert. Da die beteiligten Versuchspersonen Simulator- und Realflüge bei Tag und bei Nacht absolviert hatten, war zudem keine Verbesserung des Realismus zu erwarten.
- Die Rahmenlagen wurden wie in Kapitel 5 beschrieben abgeändert.
- Der Kräfteansatz wurde um drei unbemannte Fluggeräte ergänzt, welche für Aufklärungsaufgaben einzusetzen sind.

Die resultierenden Briefings der Versuchsmission bestehen aus

- einer Beschreibung der Rahmenlage.
- der durchzuführenden Mission.
- dem Einfluss des Wetters auf die Mission. Um die Ergebnisse vergleichbar zu halten, hatte in allen Briefings das Wetter keinerlei Einfluss auf die Operation.
- einer nachrichtendienstlichen Einschätzung bzgl. möglicher feindlicher Aktivitäten. Die darin beschriebenen feindlichen Systeme umfassen je nach Mission Flugabwehrraketen mit ca. 5 km Reichweite, Gewehre, Jeeps mit Maschinengewehren auf Lafette sowie un gelenkten Panzerabwehrwaffen. Des Weiteren geht aus der nachrichtendienstlichen Einschätzung hervor, in welchen Phasen der Mission vermehrt mit dem Auftreten feindlicher Aktivitäten zu rechnen ist. Als Folgerungen wurde in jedem Briefing angeführt, dass der bemannte Helikopter eine Flughöhe von weniger als 150 ft über Grund im feindlichen Gebiet zu halten hat während die UAVs konstant auf 3000 MSL fliegen.
- Kartenmaterial des Einsatzgebietes sowie Luftaufnahmen und Anflugrichtungen der Landezonen. Diese Karten enthalten die Lufträume, Einsatzgebiete, und Luftraumkorridore.

- dem Zeitansatz für den bemannten Helikopter und die UAVs.
- den Regeln zum Waffeneinsatz. Hier wurde stets gefordert, dass Waffen nur zur Selbstverteidigung eingesetzt werden dürfen, jeder andere Waffeneinsatz ist verboten. Anzumerken ist hier, dass keine Bewaffnung des bemannten Helikopters simuliert wurde und auch die unbemannten Fluggeräte nicht über Wirkmittel verfügen.
- einem Handout mit einer Kurzübersicht der Mission, der Funkfrequenzen (im Helikoptersimulator schon voreingestellt) sowie der Möglichkeit für eigene Notizen.

inhaltslos				●	●●●●	●●●	informativ
detailarm		●	●●●	●	●●	●	detaillreich
überflüssig				●●	●●●	●●●●	notwendig
lückenhaft		●	●	●●	●●●●		umfassend
unrealistisch		●●	●●	●●	●	●	realistisch
überfrachtet				●●●	●●●●	●	zielgerichtet

Abbildung C-1: Bewertung der Missionsbriefings durch die Versuchspersonen

Wie aus Abbildung C-1 ersichtlich, bestätigt die Mehrheit der Versuchspersonen die Eignung der verwendeten Unterlagen. Der Einsatz unbemannter Fluggeräte und die Nutzung nur eines einzelnen bemannten Helikopters wirkt sich laut Aussage der Versuchspersonen negativ auf die Einschätzung des Realismus der Missionen auf. Die fehlenden Details wirkten sich nach Aussage der Versuchspersonen nicht auf den Ablauf der Mission aus.

C.2 Einweisung und Training

Um die Bedienung des Systems zu erlernen und in den Messversuchen Lerneffekte zu reduzieren, erhielten alle Versuchsteilnehmer eine detaillierte Beschreibung der Bedienschnittstelle zur UAV-Führung, eine mündliche Einweisung und absolvierten je zwei Trainingsmissionen.

Der Fokus der ersten Trainingsmission lag hierbei auf dem *Erlernen der Systembedienung*. Unter Anleitung der Experimentatoren und Anwesenheit aller Versuchsteilnehmer wurde in einer Mission alle Arten von Auftrags-elementen verwendet und die Auswertung der Sensorbilder geübt. Der simulierte, bemannte Helikopter blieb in dieser Trainingsmission an seiner Startposition, so dass der Fokus auf der UAV-Führung lag.

Nach Abschluss dieser Trainingsphase hatten die Versuchspersonen Gelegenheit, Fragen zum System zu stellen. In den Diskussionen der Versuchspersonen etablierten sich zudem Strategieansätze zur effektiven Nutzung der UAVs. Dazu zählen insbesondere unterschiedliche zeitliche Vorläufe der UAVs sowie die Strategie, mindestens ein UAV möglichst nahe am bemannten Helikopter zu führen, um eine Aufklärungskomponente bei grundlegenden Situationsänderungen schnell zur Verfügung zu haben.

Der Schwerpunkt der zweiten Trainingsmission liegt in der *Integration der UAVs in einen Missionskontext*. Dabei sollen die in der ersten Mission erlernten Bedienkonzepte gefestigt werden und zudem erste taktische Verhaltensweisen zum Einsatz der UAVs erarbeitet werden. Das zweite Training ist an den Ablauf der Versuchsmission angelehnt, erfolgt nach einem Missionsbriefing und das Training wird für die Erfassung von Messdaten (NASA TLX und SAGAT) unterbrochen. Die erhobenen Daten gehen jedoch nicht in die Versuchsauswertung ein. Hilfestellung erhalten die Versuchspersonen in diesem Training nur, wenn sie diese explizit anfragen.

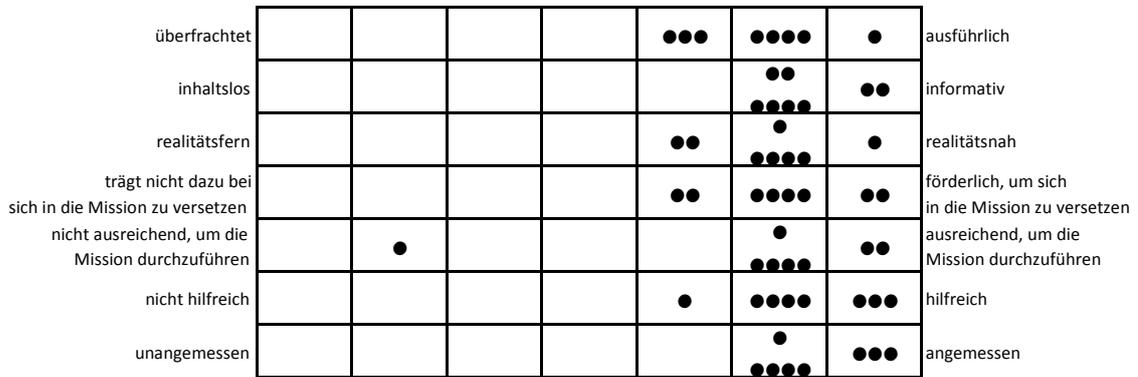


Abbildung C-2: Bewertung des Trainings durch die Versuchspersonen

In Abbildung C-2 sind die Bewertungen des Trainings durch die Versuchspersonen dargestellt. Da für das Training der acht Versuchspersonen nur je eineinhalb Tage zur Verfügung standen, wirkte es auf einige Versuchspersonen überfrachtet und für eine Versuchsperson als nicht ausreichend.

Insgesamt wurde das Training als gut geeignete, für die Versuche unabdingbare Voraussetzung zur Durchführung der Versuche bewertet. Trotz dieser auch in Abbildung C-2 ersichtlichen Bewertung konnten nicht alle Bedienschritte in der zur Verfügung stehenden Trainingszeit gefestigt werden, so dass Lerneffekte auch in den Messversuchen auftraten. Zu erkennen ist dies an den Hilfestellungen, welcher der Pilot dem Kommandanten bei der UAV-Führung anbietet. Diese vor allem zwischen den Versuchspersonen VP7 und VP8 aufgetretene Unterstützung bezog sich exklusiv auf Bedienschritte, d.h. dem Aufrufen von Funktionen und Teilfunktionen. Taktische Unterstützung wurde dabei nicht geleistet.

C.3 Führung der UAV

Die Bewertung der UAV-Führung durch die Versuchspersonen gliedert sich in die Bewertung der Mensch-Maschine-Schnittstelle und die Bewertung der auftragsbasierten Führung als solche.

Abbildung 5-17 in Abschnitt 5.5.3 betrachtet bereits die grundlegende Einschätzung der Bedienoberfläche hinsichtlich ihrer Eignung für die Missionserfüllung. Die folgende Abbildung gibt die Ergebnisse der Befragung hinsichtlich der für die Versuche gewählten Struktur der Bedienoberfläche wieder.

Grundlegende Unterteilung des Displays in CAM, TASKS und ID

nicht hilfreich		••		•	••	•••	hilfreich
hinderlich bei der Aufgabenbearbeitung	•	•			••	••••	hat ein schnelles Bearbeiten der Aufgaben ermöglicht
nicht sinnvoll		•		•	••••	••	sinnvoll gewählt

Wechsel zwischen den Anzeigemodi CAM, TASK MGNT, INS TASK, DIRCT TO und ID war

unintuitiv	•	•	•	•	••	••	intuitiv möglich
dauernd nötig	•	•	••••	•	•		kaum nötig
anstrengend			••	••			einfach

Abbildung C–3: Bewertung der Struktur der Bedienschnittstelle

Uneinig sind sich die Versuchspersonen über die Unterteilung der Bedienoberfläche in die Sensorsicht (CAM), die Auftragsvergabe und -manipulation (TASK) und die Objektidentifikation (ID). Zwei Versuchspersonen regten eine stärkere Integration dieser einzelnen Funktionen an, um den typischen Arbeitsablauf der Objektidentifikation zu vereinfachen. Dieser besteht durch die Unterteilung in die drei Ansichten aus folgenden Schritten:

1. Lokalisierung eines Objekts durch ein oder mehrere UAV. Hierzu ist keine Bedienaktion des Operators notwendig. Das Objekt wird in der Karte als Fragezeichen eingetragen. Sobald durch die UAVs Kamerabilder des Objekts vorhanden sind, wird das Fragezeichen durch ein Kamerasymbol ergänzt.
2. Selektion des Fragezeichens auf der Karte (Modus TASK) durch den Operator.
3. Selektion des Modus ID durch den Operator.
4. Bewertung der Fotos und Eingabe des Objekttyps und des Bedrohungsstatus (eigene Einheit, feindliche Einheit, neutrales Objekt) in die Bedienoberfläche.
5. Umschalten auf die Kartenansicht (Modus TASK).

Der dadurch oft notwendige Wechsel zwischen den einzelnen Modi der Schnittstelle erschien den meisten Versuchspersonen als anstrengend (Abbildung C–3, unten).

nicht möglich				•	••••	•••	problemlos möglich
unangenehm				••	••	••••	angenehm
aufwendig				•	•••	••••	einfach
für die Aufgabenerfüllung nicht ausreichend			•		••	•	für die Aufgabenerfüllung ausreichend

Abbildung C–4: Bewertung der Objektidentifikation

Die Bewertung der Objektidentifikation im Modus ID ist in Abbildung C–4 dargestellt und wird mehrheitlich als einfach zu nutzen und problemlos beurteilt.

D Bearbeitung von Auftrags-elementen in den Versuchsmissionen

Die folgenden Abbildungen zeigen die von den UAVs bearbeiteten Auftrags-elemente. Auftrags-elemente, die durch die automatische Einhaltung von Einsatzgrundsätzen durch das UAV selbst eingefügt wurden, sind schmal dargestellt. Die breit dargestellten Auftrags-elemente wurden explizit durch den Operateur als Auftrag an das jeweilige UAV vergeben.

Ein schwarzer Pfeil in der Darstellung des zeitlichen Ablaufs markiert Zeiten, an denen durch den Operateur die Durchführung der aktuellen Aufgabe des UAVs abgebrochen wurde. Unterbrechungen in den Abläufen kennzeichnen Zeitintervalle, in denen das betreffende UAV keine Aufgabe bearbeitete.

Zu jeder Auftragsart ist im Diagramm der Kurzname der Zielposition angegeben. Die Arten der Aufträge sind für die bessere Darstellung abgekürzt:

- | | | |
|-------|-------------|--|
| - DEP | Departure | Durchführen der Startprozedur |
| - TR | Transit | Transitflug |
| - CF | Cross Flot | Durchqueren der FLOT |
| - RR | Route Recce | Aufklären der Flugroute mittels E/O-Sensor |
| - RA | Recce Area | Aufklären/Überwachen eines Gebiets |
| - APP | Approach | Durchführung von Anflug und Landung |

Die Schriftzüge beginnen mit dem Auftrags-element, das sie beschreiben.

An den Abszissen der Diagramme ist die simulierte Missionszeit angetragen. Laut Briefing sollen die Missionen bei 10 Uhr beginnen.

D.1 Mission 1

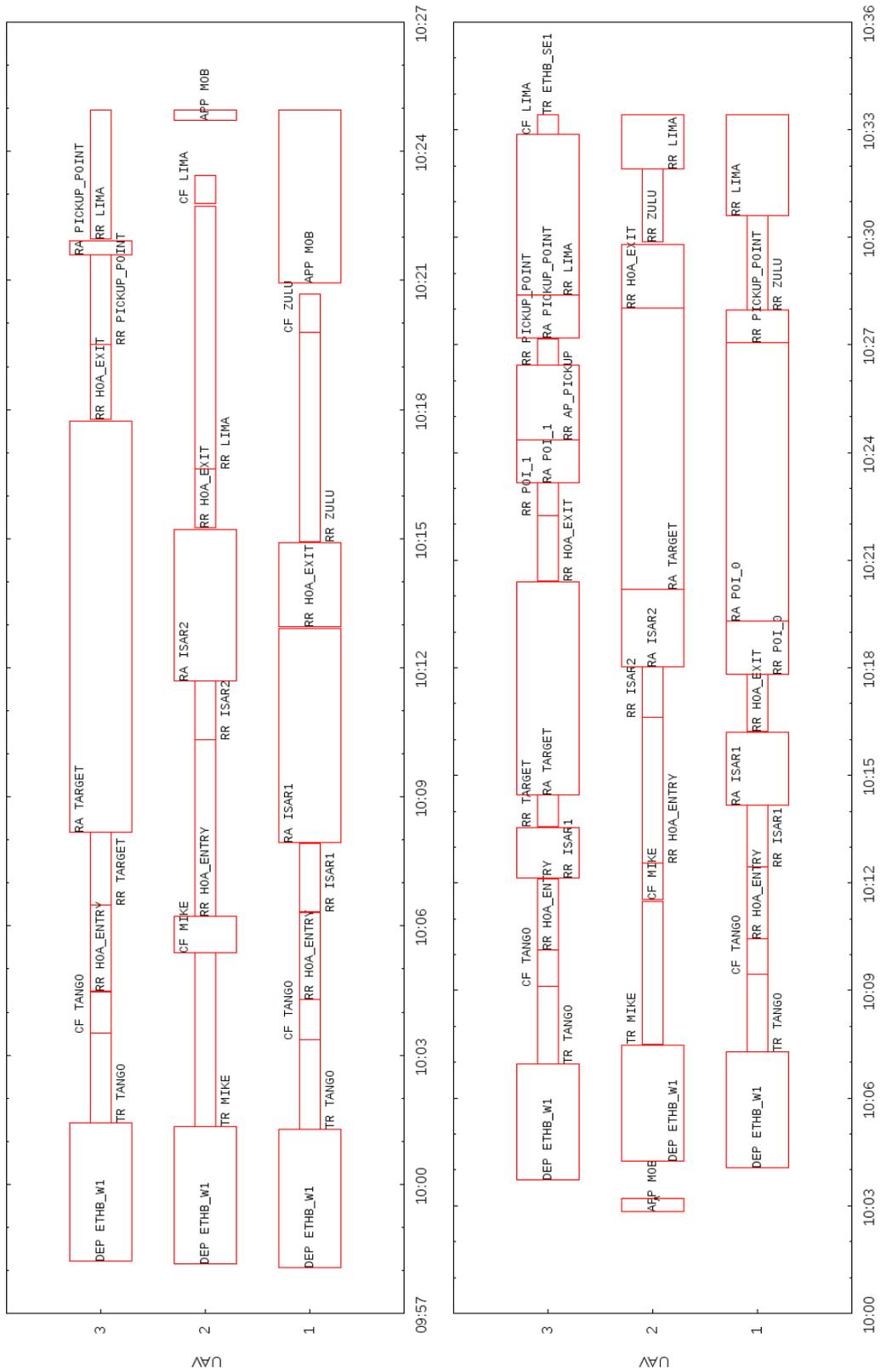


Abbildung D-1: Auftragsbearbeitung bei VP2 (links) und VP4 (rechts)

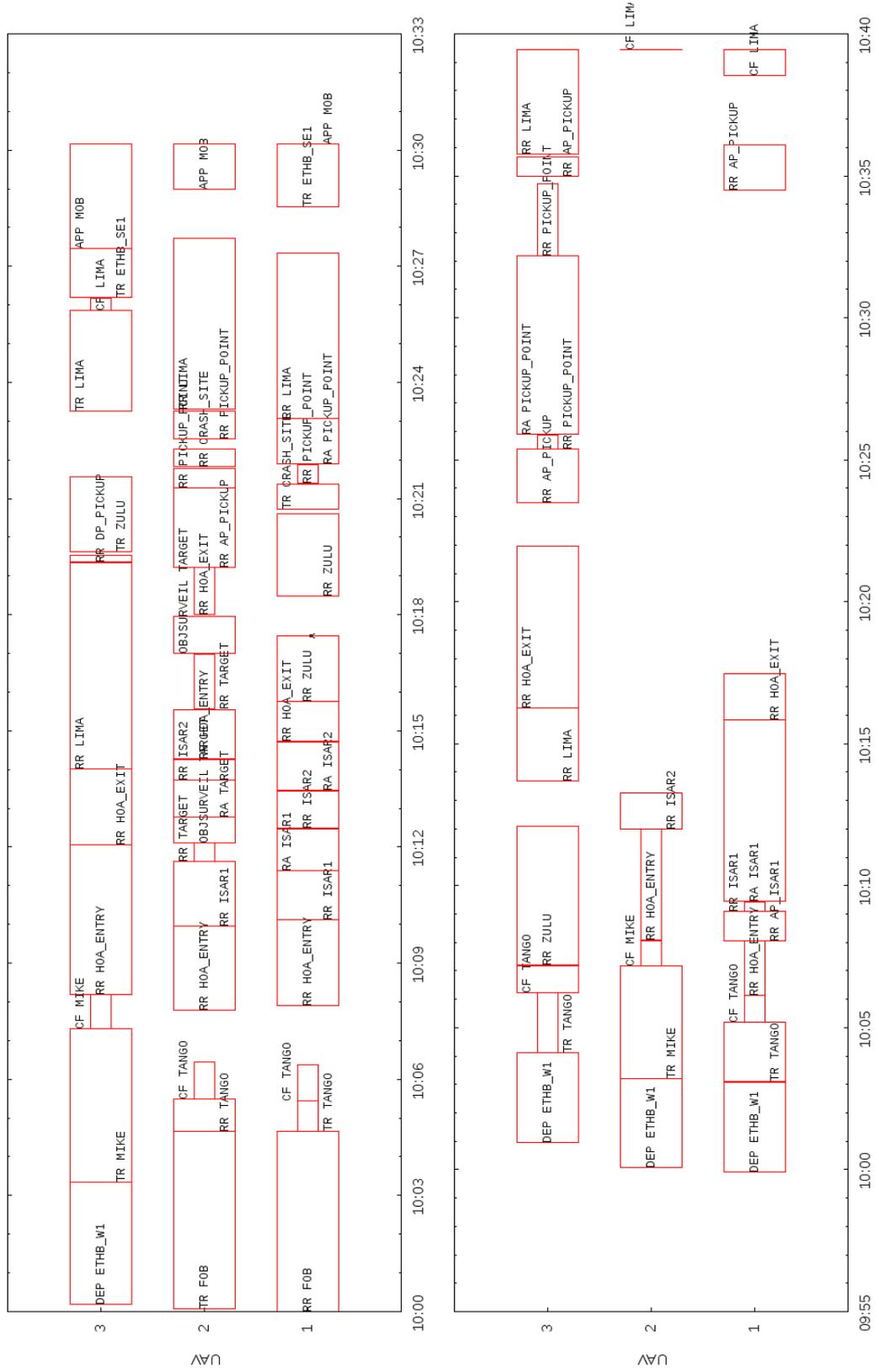


Abbildung D-2: Auftragsbearbeitung bei VP6 (links) und VP7 (rechts)

D.2 Mission 2

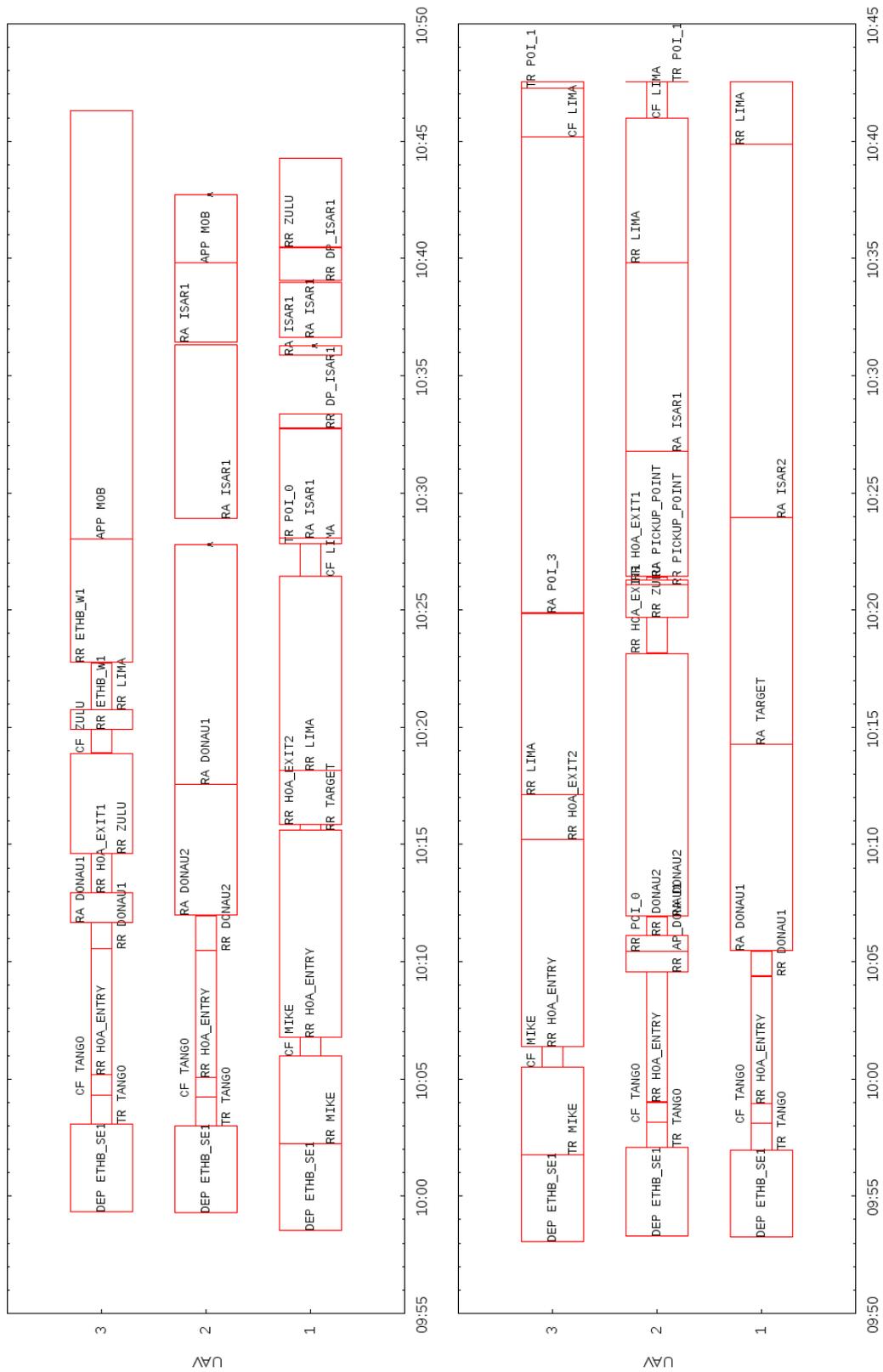


Abbildung D-3: Auftragsbearbeitung bei VP1 (links) und VP3 (rechts)

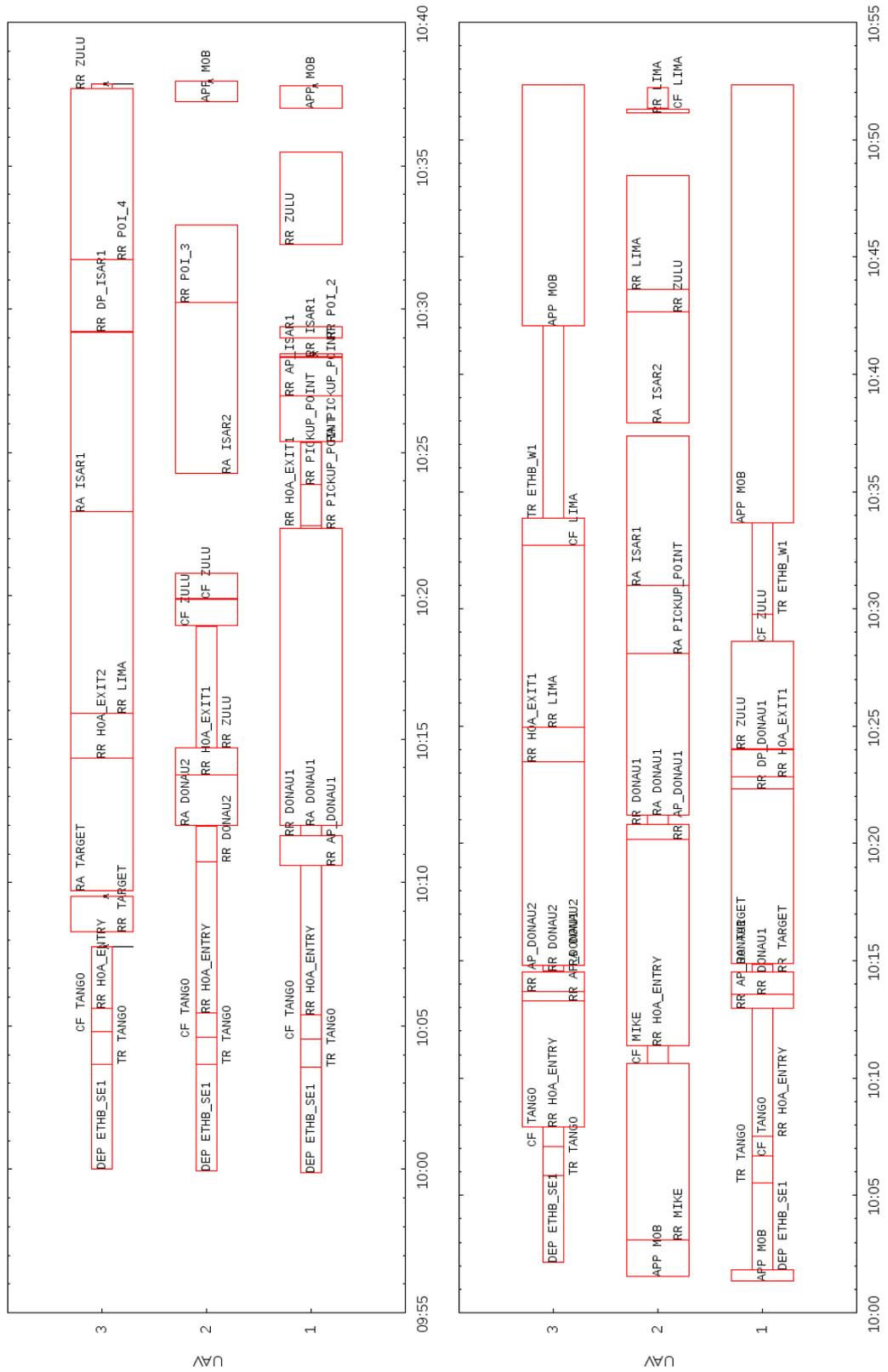


Abbildung D-4: Auftragsbearbeitung bei VP7 (links) und VP8 (rechts)