

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

Pilotenassistenz in vernetzten Multi-Nutzer Multi-Vehikel Missionen durch Multi-Agenten Planung

Gunar Roth, M.Sc.

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

Doktor-Ingenieurs (Dr.-Ing.)

genehmigten Dissertation.

1. Gutachter: Univ.-Prof. Dr.-Ing. Axel Schulte
2. Gutachter: Univ.-Prof. Dr.-Ing. Florian Holzapfel

Diese Dissertation wurde am 13.06.2023 bei der Universität der Bundeswehr München eingereicht
und durch die Fakultät für Luft- und Raumfahrttechnik am 07.12.2023 angenommen.

Die mündliche Prüfung fand am 15.12.2023 statt.

Kurzfassung

Das Institut für Flugsysteme forscht im Bereich der intelligenten Automatisierung fliegender Systeme und der kognitiven Assistenz zur Führung unbemannter Luftfahrzeuge. Insbesondere in der militärischen Luftfahrt tritt die Vernetzung mehrerer bemannter und unbemannter Systeme immer stärker in den Fokus, sodass nicht mehr von einem permanenten exklusiven Zugriff durch einen einzelnen Nutzer ausgegangen werden kann. Dabei stellt die ungeteilte Führung unbemannter Systeme bereits an sich hohe kognitive Anforderungen an den menschlichen Nutzer. Die vorliegende Arbeit greift daher die Forschungsfrage auf, wie die Teilung von Hochwertressourcen, die in ihrem Wesen und ihrer Komplexität vergleichbar zu unbemannten Systemen sind, zwischen mehreren Nutzern gestaltet werden kann. Um möglichen Konflikten entgegenzuwirken, soll ihre verteilte Nutzung koordiniert und die damit verbundene Ausplanung unterstützt werden.

Hierfür wurde ein Nutzungskonzept erarbeitet, das die Autorität und die Nutzungshoheit über eine gemeinsam genutzte Ressource anhand von zwei dedizierten Rollen definiert. Über eine Anfrage zur Ressourcennutzung kann dabei ein Bedarfsträger an den bereitstellenden Nutzer herantreten. Anhand einer Interoperabilitätsskala kann die Kontrolle über eine Ressource mittels mehrerer Ebenen zwischen den Nutzern übertragen werden. Zur Planungsunterstützung wurde eine prototypische Assistenzfunktion konzeptioniert, die sich an den Methoden der Multi-Agenten Planung und der multikriteriellen Entscheidungsunterstützung orientiert. Hierbei wurden sowohl ein zentralisierter als auch ein dezentralisierter Ansatz betrachtet und gegeneinander bewertet. Die Implementierung orientierte sich maßgeblich am dezentralisierten Ansatz. Die Kommunikationsinfrastruktur basiert dabei auf einem Middle-Agent Ansatz, der über verteilte Agenten modelliert wurde.

Zur Erprobung diente eine institutseigene virtuelle Cockpit-Simulationsumgebung, die Untersuchungen zur Führung mehrerer unbemannter luftgestützter Systeme von Bord eines militärischen Transporthubschraubers und ihrer Teilung in vernetzten domänen-übergreifenden Missionen ermöglicht. Die integrierten Ansätze zum Nutzungskonzept und zur Planungsassistenz wurden in Mensch-Maschine Experimenten mit militärischen Hubschrauberpiloten evaluiert. Die Experimente waren aufgegliedert in ein dediziertes Telexperiment zur gezielten Evaluierung des Nutzungskonzepts und der Planungsunterstützung sowie einer Funktionsdemonstration unter deutlich komplexeren Anforderungen und erhöhter Realitätsnähe. Die Ergebnisse zeigen, dass sich das Nutzungskonzept als geeignete Herangehensweise zum nutzerübergreifenden Einsatz von UAVs erweisen konnte. Auch die Planungsunterstützung konnte einen größtenteils positiven Einfluss aufweisen.

Abstract

The Institute of Flight Systems conducts research in the field of intelligent automation of airborne systems and cognitive assistance for the guidance of unmanned aerial vehicles. Particularly in military aviation, the networking of several manned and unmanned systems is increasingly important, so that permanent exclusive access by a single user can no longer be assumed. The undivided control of unmanned systems already places high cognitive demands on the human user. This thesis therefore addresses the research question of how the sharing of high-value resources, which are comparable in nature and complexity to unmanned systems, can be organized between multiple users. In order to mitigate potential conflicts, their distributed use is to be coordinated and the associated planning must be supported.

To this end, a concept of use was developed that defines the authority and responsibility for the use of a shared resource on the basis of two dedicated roles. By requesting the use of a resource, a recipient can approach the providing user. Based on an interoperability scale, control over a resource can be transferred between users on several levels. For planning support, a prototype assistance function was designed that is based on the methods of multi-agent planning and multi-criteria decision support. Both a centralized and a decentralized approach were considered and evaluated against each other. The implementation was largely based on the decentralized approach. The communication infrastructure is based on a middle-agent approach, which was modeled using distributed agents.

For experimental evaluation, the institute's virtual cockpit simulation was used, which enables studies on the control of several unmanned airborne systems from on board a military transport helicopter and their sharing in networked cross-domain missions. The integrated approaches to the concept of use and planning assistance were validated in human-machine experiments with military helicopter pilots. The experiments were separated into a dedicated sub-experiment for specifically evaluating the utilization approach as well as the planning support and a functional demonstration under increased complexity and realism. The results show that the concept of use proved to be a suitable approach for the cross-user deployment of UAVs. The planning support also proved to have a largely positive influence.

Inhaltsverzeichnis

Kurzfassung.....	i
Abstract	ii
1. Einleitung	1
1.1. Motivation.....	2
1.2. Problemstellung	3
1.3. Aufbau der Arbeit	5
2. Technisch-wissenschaftliche Grundlagen	6
2.1. Stand der Technik und Forschung	6
2.2. Entscheidungstheorie	11
2.3. Planung	17
2.4. Multi-Agenten Planung.....	25
2.5. Planungsunterstützung	38
3. Konzept	46
3.1. Forschungsgegenstand	46
3.2. Anforderungsanalyse	46
3.3. Arbeitsprozessanalyse und Systemdesign.....	47
3.4. Kognitives Arbeitssystemdesign.....	49
3.5. Spezifische Einschränkungen	50
3.6. Konzept zum nutzerübergreifenden Ressourceneinsatz	50
3.7. Konzept zur Planungsunterstützung	57
4. Prototypische Implementierung	70
4.1. Zentralisierte Multi-Agenten Planung	70
4.2. Dezentralisierte Multi-Agenten Planung	74
4.3. Modularer Aufbau zur dezentralisierten Planung	82
5. Anwendung in MUM-T Forschungs-Simulationsumgebung.....	85
5.1. Manned-Unmanned Teaming	85
5.2. Simulationsumgebung zur Integration	86
5.3. Interoperabilität zur gemeinsamen UAV-Nutzung.....	90
5.4. Werkzeuge Client.....	90
5.5. Werkzeuge Host.....	93
6. Erprobung.....	104
6.1. Einzeluntersuchung – Unterstützung der Anfragenbearbeitung	105
6.2. Funktionsdemonstration im komplexen Anwendungsfeld	124

7. Zusammenfassung und Ausblick	130
7.1. Zusammenfassung.....	130
7.2. Empfehlungen	131
7.3. Ausblick	134
Literaturverzeichnis.....	136
Abkürzungsverzeichnis	143
Anhang	144

1. Einleitung

Das Ingenieurwesen beschäftigt sich im Wesentlichen mit der spezifischen Auslegung und Konstruktion technischer Systeme, die einen bestimmten Zweck verfolgt. Mit den Fortschritten in der Technologie werden solche Systeme vermehrt dahingehend entwickelt, Aufgaben automatisiert auszuführen und die Interaktion mit einem menschlichen Bediener auf ein praktikables Maß zu reduzieren. Die Gründe dafür sind vielfältig und reichen von der Steigerung der Erfolgswahrscheinlichkeit, der Präzision oder der Effizienz, über die Senkung von Arbeits- bzw. Personalaufwand, bis hin zur Minimierung von Risiko für Leib und Leben. Dank der Fortschritte in der Informationsverarbeitung lassen sich neben physischen Arbeiten auch zunehmend kognitive Aufgaben automatisieren. Mit dem Einsatz *künstlicher Intelligenz* (KI) kann z.B. das Analysieren von Daten, das Lösen von Problemen oder das Treffen von Entscheidungen automatisiert werden (Russell und Norvig 2012).

Aktuelle Entwicklungen fokussieren sich zunehmend auf den Einsatz künstlicher Intelligenz im Automobilbereich, um langfristig das Ziel einer Vollautomatisierung der Fahrzeugführung zu erreichen. Handlungen, wie die Steuerung oder die Systembedienung, die bisher dem Menschen oblagen, werden dabei durch (Teil-)Automatisierung übernommen. Je komplexer sich ein automatisiertes System, dessen Arbeitsumgebung oder die durchzuführende Aufgabe jedoch gestaltet, desto schwieriger wird es auch, einen effizienten, zuverlässigen und sicheren Einsatz rein durch Automationsfunktionen sicherzustellen. Insbesondere zur Absicherung für unvorhergesehene Situationen bleibt ein Mensch als Überwacher und Entscheider in solchen Fällen unerlässlich, um Fehlverhalten erkennen und im Bedarfsfall intervenieren zu können. Dementsprechend sind die Sicherheit und Zuverlässigkeit eines hochautomatisierten Systems maßgeblich von der Mensch-Maschine-Interaktion mit dessen Überwacher abhängig (Wolf 2015). Damit verschiebt sich die Funktion des Menschen, von der ursprünglich aktiven Kontrolle im Rahmen der Fahrzeugführung hin zur Überwachung der Automationskomponenten und zum Eingreifen im Bedarfsfall.

Bestrebungen der Automatisierung sind dabei aber weder neu noch auf den Automobilbereich beschränkt. Sowohl im Bereich der Luft- als auch der Raumfahrt hat sich der Einsatz von Automation bereits seit langem etabliert und u.a. zur Entwicklung des Autopiloten geführt, der aus beiden Bereichen mittlerweile nicht mehr wegzudenken ist. Die fortschreitende Automatisierung hat in diesen Domänen auch bereits zur Entwicklung und zum Einsatz komplett unbemannter Systeme geführt. Satelliten werden bereits seit den 60er Jahren u.a. für die Wetterbeobachtung, Kommunikation, Navigation, Kartographie sowie die nachrichtendienstliche Aufklärung genutzt. Ihnen verdanken wir heute z.B. eine detaillierte Kartographie der Erdoberfläche sowie GPS-Navigation.

Auch im militärischen Anwendungsfeld werden unbemannte Luftfahrzeuge (engl. Unmanned Aerial Vehicles - UAVs) schon länger mit Sensorik oder Bewaffnung ausgestattet und zur Aufklärung und Überwachung sowie zur Bekämpfung aus der Luft verwendet. Jüngste Bestrebungen weiten ihre Fähigkeiten zur Anwendung im Bereich der elektronischen Kampfführung, z.B. zum Abhören, Stören oder Vortäuschen von Signalen des elektromagnetischen Spektrums aus. Doch auch unbemannte Bodenfahrzeuge, Wasserfahrzeuge oder Unterwasserfahrzeuge treten immer stärker in den Fokus militärischer Entwicklungen. Insbesondere im Zusammenwirken mit bemannten Systemen können unbemannte Systeme in vielen Szenarien einen wesentlichen Mehrwert liefern, indem sie gefährliche oder ermüdende Aufgaben, insbesondere in einer schwierigen Umgebung übernehmen. Mögliche Anwendungen reichen von der Suche und Rettung (engl. Search and Rescue – SAR), der Evakuierung oder Geiselnbefreiung, über die Seeraum-Überwachung und der U-Boot-Suche (engl. Anti Submarine Warfare – ASW), bis hin zur Unterdrückung gegnerischer Luftabwehr (engl. Suppression of Enemy Air Defense – SEAD) im defensiven oder offensiven Luftkampf (engl. Defensive/Offensive Counter Air – D/OCA). Neben militärischen Interessen sind UAVs auch für zivile Anwendungen relevant, wie in der Agrarwirtschaft, zur 3-D Vermessung von Objekten, für den Transport sowie zum Auffinden vermisster Personen oder zur Katastrophenhilfe bspw. bei Erdbeben oder Waldbränden (Mahmoud et al. 2015; Koubâa et al. 2019).

1.1. Motivation

Unter dem Paradigma der *netzwerkzentrierten Operationsführung* (engl. Network-Centric Warfare) wird eine Vernetzung militärisch operierender Einheiten angestrebt, um ihre Zusammenarbeit zu intensivieren und sich Synergieeffekte zunutze zu machen (Fewell und Hazen 2005). Sie ist die logische Weiterentwicklung der plattformzentrierten Kriegsführung, die auf eine Bezwingung des Feindes durch zahlenmäßige und fähigkeitsspezifische Überlegenheit der eigenen Einheiten abzielt. Nun treten das koordinierte Zusammenwirken der Einheiten, erhöhtes Situationsbewusstsein sowie präzise und beschleunigte Entscheidungsfähigkeit in den Vordergrund. Dabei ist die Vernetzung sowohl auf der infrastrukturellen als auch auf der operationellen Ebene von großer Bedeutung (Phister und Cherry 2006). Die infrastrukturelle Vernetzung (engl. Network Centric Infrastructure) umfasst die Bildung eines Netzwerks zum Kommunikations- und Informationsmanagement, um erforderliche Informationen zur richtigen Zeit am richtigen Ort bereitzustellen. Unter der operationellen Vernetzung (engl. Network Centric Operations) sind die Prozesse und Hilfsmittel zu verstehen, die einen Entscheidungsträger (z.B. einen Befehlshaber) befähigen, vernetzte militärische Operationen auf strategischer, operativer und taktischer Ebene durchzuführen. Neben Vorteilen auf der physischen, der informativen und der sozialen Ebene werden somit auch Auswirkungen auf der kognitiven Ebene erwartet. Trotz dieser Erkenntnis über den Einfluss auf die

menschliche Kognition, finden Modelle des Entscheidungsprozesses in der operationellen Umsetzung bisher jedoch selten Einzug. Dabei ist ein wesentlicher Treiber der Netzwerkzentrierung die Unterstützung des Entscheidungsprozesses der übergeordneten Führung (engl. Command and Control – C2). Mit der Digitalisierung des Gefechtsfeldes sollen auch Methoden der künstlichen Intelligenz Einzug finden, um den Entscheidungsprozess militärischer Führer zu unterstützen. Insbesondere wenn Sensoren, Entscheidungsinstanzen und Wirksysteme verteilt sind, erhöht dies die Komplexität des sog. *sensor-to-shooter cycle*. Dieser Prozess, der vom Auftauchen eines Ziels über die Planung und Genehmigung bis zu dessen Bekämpfung reicht, soll durch Automationsfunktionen verkürzt werden, um die Komplexität zu senken und zu schnelleren Entscheidungen beizutragen.

Zukünftige militärische Vorhaben streben eine Vernetzung von Systemen über sämtliche Domänen an. Insbesondere in sog. *Multi-Domain Operations (MDO)* sollen Fähigkeiten aus den Domänen Luft, Land, Wasser, Weltraum und Informationsraum vereint werden. Dazu wird die Vernetzung bemannter und unbemannter Systeme in aktuellen Bestrebungen zunächst überwiegend mit der Anwendung in zukünftigen militärischen Luft-Operationen in Zusammenhang gebracht (siehe u.a. „Loyal Wingman“, „Tempest“ und „Future Combat Air System“). Hier wird der Einsatz mehrerer „künstlicher Wingmans“, also UAVs mit heterogenen Fähigkeiten aus einem Kampfjet vorgeschlagen. Sie sollen insbesondere Aufgaben der sensorischen Aufklärung, des elektronischen Kampfes sowie des Einsatzes von Wirkmitteln zur Unterdrückung oder Bekämpfung aus der Luft übernehmen. Dabei ist das Ziel die Vernetzung auch domänenübergreifend auszuweiten, um auch bemannte und unbemannte Land- oder Wasserfahrzeuge in einen gemeinsamen Fähigkeitsverbund einzugliedern.

1.2. Problemstellung

Komplexe, hoch automatisierte Systeme wie UAVs werden i.d.R. entwickelt, um spezielle Fähigkeiten bereitzustellen, die einen wesentlichen Mehrwert zur Durchführung einer spezifischen Aufgabe leisten. Aufgrund diverser Faktoren, wie z.B. einer hohen Systemkomplexität, einer aufwändigen Betriebsinfrastruktur oder wegen damit verbundenen hohen Anschaffungs- und Unterhaltungskosten, können sie jedoch möglicherweise nur in limitiertem Maße mehreren Nutzern verfügbar gemacht werden. Gibt es mehrere Bedarfsträger in einem gemeinsamen Anwendungsumfeld, stellen sie entsprechender Weise begehrte Hochwertressourcen dar. Eine Möglichkeit, um dieser Ressourcenknappheit zu begegnen und den Bedarf mehrerer Nutzer zu decken, ist ein nutzerübergreifender Einsatz solcher Systeme. Insbesondere durch die fortschreitenden Entwicklungen in der Datenkommunikation und -vernetzung besteht die Möglichkeit, die Fähigkeiten solcher Systeme durch digitalen Austausch zwischen mehreren Nutzern zu teilen. Dadurch können limitierte Hochwertsysteme auch zusätzlichen Nutzern bereitgestellt werden, welche bspw. aufgrund der begrenzten Verfügbarkeit andernfalls

keine Möglichkeit ihrer Nutzung erhalten hätten. Weiterhin besteht das Potenzial, die Effizienz ihrer Nutzung zu steigern, indem ungenutzte Zeiträume anderen Nutzern zur Verfügung gestellt werden.

Trotz diverser Vorteile birgt ein nutzerübergreifender Einsatz begehrter Systeme jedoch auch mögliche Nachteile, insbesondere dann, wenn mehrere Nutzer zeitgleich Bedarf an den geteilten Systemen haben. So können sich die Nutzer durch Überschneidungen im Gebrauch ggf. gegenseitig behindern, weil sie in ihrer jeweiligen Nutzung des Systems durch den Anderen eingeschränkt oder unterbrochen werden. Auch bezüglich einer Entscheidung darüber, wer zu welchem Zeitpunkt Ressourcenzugriff erhält, ergibt sich die Herausforderung, festzustellen, welcher Nutzer das höhere Nutzungsprivileg besitzt, nach welchen Kriterien dies zu entscheiden ist und welche Instanz diese Entscheidung fällt und verantwortet. Auch sind negative Effekte auf den Workflow der Nutzer nicht auszuschließen, bspw. aufgrund von Verzögerungen durch Wartezeiten oder wenn Handlungen wegen einer begrenzten oder eingeschränkten Nutzungszeit nicht gut aufeinander abgestimmt werden können. Solche Effekte sind ebenso denkbar, wenn eine allgemeine Unsicherheit darüber herrscht, ob eine geteilte Ressource in der Zukunft verfügbar sein wird, wenn sie vorher durch einen anderen Nutzer eingesetzt wurde. Gegebenenfalls ist diese zum benötigten Zeitpunkt immer noch in Nutzung, noch nicht frei gegeben oder in einem ungünstigen Zustand (z.B., weil sie schlecht positioniert, falsch konfiguriert, oder nicht mit ausreichend Verbrauchsmitteln ausgestattet ist).

Eine Ressourcennutzung durch mehrere Bedarfsträger sollte daher zwingend abgestimmt werden, um Konflikte als Folge von Nutzungsüberschneidungen oder Unsicherheiten über ihre Verfügbarkeit zu vermeiden. Dabei kann eine detaillierte Planung der eigenen Handlungen und des damit verbundenen Ressourcenbedarfs als Mittel zur Koordinierung dienen. Ein Koordinierungsprozess unter den Nutzern, um sich in der Systemnutzung abzustimmen und ggf. Kompromisslösungen zu erarbeiten, wird jedoch erschwert durch die räumliche Trennung der Parteien und die damit verbundene eingeschränkte Kommunikation.

Der Einsatz von computergestützter Planungsautomation, also die Unterstützung des menschlichen Planungsprozesses durch maschinelle Planungsmethoden, hat sich bereits in anderen Anwendungen als vielversprechender Ansatz in Einzel-Nutzer Multi-Ressourcen Strukturen herausgestellt (Heilemann und Schulte 2020; Schmitt und Schulte 2015; Hope et al. 2004; Miller et al. 2002). Dabei ist eine menschenzentrierte Auslegung der Mensch-Maschine Interaktion wichtig, um eine ergonomische Zusammenarbeit zwischen Anwender und Planungsautomation zu ermöglichen. In der vorliegenden Arbeit soll dieser Ansatz ausgeweitet werden, um die Erarbeitung von Kompromisslösungen in dezentralen Multi-Nutzer Multi-Ressourcen Strukturen zu unterstützen.

Durch eine Multi-Nutzer Planung wird es ermöglicht, gemeinsam genutzte Systeme als geteilten Ressourcen in der Planerstellung für mehrere Instanzen zu berücksichtigen. Dadurch

lassen sich Handlungen vorab zwischen den Nutzern abstimmen, um einen koordinierten Ablauf zu ermöglichen und ggf. symbiotische Effekte auszunutzen. Außerdem fördert es das Bewusstsein darüber, wann und durch wen sich eine Ressource in Benutzung befindet. Beides soll ein vorausschauendes Handeln fördern, um kurzfristige, reaktiv notwendig gewordene Handlungen zu vermeiden und einen positiven Einfluss auf den Workflow, die Leistung und die effiziente Ressourcennutzung zu erzielen.

1.3. Aufbau der Arbeit

Die Arbeit untergliedert sich in insgesamt 7 Kapitel. Dieser Abschnitt bildet den Abschluss des ersten Kapitels, das die Thematik und die Problemstellung eingeleitet hat. In Kapitel 2 werden die zum Verständnis notwendigen technischen und wissenschaftlichen Grundlagen gelegt. Neben dem aktuellen Stand der Technik werden die Grundlagen zur Entscheidungstheorie, die als Basis des Planungsprozesses verstanden werden kann, zur automatisierten Multi-Agenten Planung und zur Planungsunterstützung durch kognitive Agenten vermittelt. Kapitel 3 beschreibt das Konzept zum nutzerübergreifenden Ressourceneinsatz und die darauf aufbauende Konzeptionierung einer Assistenzfunktionalität zur Unterstützung der Missionsplanung mit geteilten Ressourcen unter Nutzung eines Multi-Agenten Planungsansatzes. In Kapitel 4 wird das erarbeitete Konzept am spezifischen Anwendungsfall des geteilten Einsatzes unbemannter Systeme prototypisch implementiert. Die Integration der Module in den institutseigenen Forschungs-Hubschraubersimulator und die Beschreibung ihrer Anwendung aus Nutzersicht wird in Kapitel 5 beschrieben. Kapitel 6 thematisiert ihre Erprobung mit fachkundigem, operationellem Personal und diskutiert die Ergebnisse, bevor die Arbeit in Kapitel 7 abschließend zusammengefasst und ausgeleitet wird.

2. Technisch-wissenschaftliche Grundlagen

Dieses Kapitel widmet sich den Grundlagen in den Bereichen unbemannter Luftfahrzeuge und ihrer Vernetzung sowie der maschinellen Unterstützung bei Entscheidungsproblemen im Rahmen einer nutzerübergreifenden Ressourcenplanung. Dazu werden einleitend der derzeitige Stand der Technik sowie aktuelle Bestrebungen in der Forschung erläutert, die das Augenmerk auf das spezifische Anwendungsfeld unbemannter Systeme, schwerpunktmäßig unbemannter Luftfahrzeuge legen. Jedoch ist die Problematik eines nutzerübergreifenden Einsatzes auch auf andere Hochwertressourcen übertragbar, die weder in die Domäne Luft noch in die Kategorie unbemannter Systeme fallen. Anschließend werden die wissenschaftlichen Grundlagen im Bereich der Entscheidungs- und Planungsprobleme vermittelt. Im Hinblick auf einen menschenzentrierten Ansatz ist hierbei insbesondere der Entscheidungsprozess in der menschlichen Kognition relevant. Weiterhin wird die maschinelle Planung, zunächst für die Einzel-Agenten Planung und anschließend für die Multi-Agenten Planung, eingeführt, bevor das Kapitel mit den Grundlagen zur Planungsunterstützung abschließt.

2.1. Stand der Technik und Forschung

Unbemannte Systeme gewinnen sowohl für zivile als auch für militärische Anwendungen immer mehr an Bedeutung. Ihr Einsatz eignet sich insbesondere zur Durchführung lang andauernder, repetitiver oder ermüdender Aufgaben, in denen Menschen Schwierigkeiten bekommen können, ihre Konzentration aufrechtzuerhalten. Doch auch ihr Einsatz in risikobehafteten Umgebungen, wie z.B. in Katastrophen- oder Krisengebieten trägt dazu bei, die Gefahr für Menschenleben zu senken. Derzeit kommen höher automatisierte unbemannte Systeme hauptsächlich im Bereich der Luft- und Raumfahrt zum Einsatz. Zwar werden unbemannte Systeme auch in den Dimensionen Land und Wasser eingesetzt (z.B. bei der Kampfmittelbeseitigung oder der Tiefseeforschung), i.d.R. jedoch mit einem deutlich niedrigeren Automationsgrad. Insbesondere UAVs finden vor allem im militärischen Kontext zur signalerfassenden Aufklärung, zur bildgebenden Aufklärung oder zum Einsatz präzisionsgelenkter Munition Anwendung.

2.1.1. UAVs der HALE/MALE Klasse

Zur weiträumigen Aufklärung in der Tiefe des Operationsgebietes kommen dabei insbesondere sog. High bzw. Medium Altitude Long Endurance (HALE/MALE) UAV zum Einsatz. Aufgrund ihrer Verwendung im Kampf gegen den Terrorismus in Afghanistan sind dabei vor allem die US-Amerikanischen Drohnen *RQ-4 Global Hawk* von *Northrop Grumman* sowie die

MQ-9 Reaper von *General Atomics* bekannt. Die Bundeswehr nutzt derzeit die *HERON 1* und zukünftig die *Heron TP* der israelischen Firma *Israel Aerospace Industries*. Dabei gibt es mit der *Eurodrohne* von *Airbus* aber auch europäische Bestrebungen zur Entwicklung eines MALE UAV. Die Steuerung und der Zugriff auf die Sensorik solcher Systeme erfolgt i.d.R. durch eine stationäre Bodenkontrollstation und erfordert mehrere Personen für den Start, den Betrieb und die Landung. Die Steuerung erfolgt dabei entweder durch kontinuierliche manuelle Fernsteuerung oder programmgesteuert anhand eines vorab geplanten Flugpfads. Sie ist dabei, genauso wie der Zugriff auf die Nutzlast des UAV, dem Operateur vorbehalten. Die Übergabe an einen anderen Bediener (sog. Handover) ist aufgrund des komplexen Verfahrens bisher hauptsächlich aus funktionalen Gründen vorgesehen (z.B. wegen einer Überschreitung der maximalen Reichweite oder zur Übergabe für Start bzw. Landung).

2.1.2. Taktische UAVs zur Nahaufklärung

Für die Nah- und Nächstaufklärung über dem Einsatzgebiet und damit vor allem für den taktisch-infanteristischen Einsatz relevant, sind kleinere und tiefer fliegende UAVs. Sie sind nicht auf eine Start- und Landebahn angewiesen, sondern können mobil (z.B. aus der Hand oder über eine Rampe) gestartet und gelandet werden. Die Starrflügeldrohne *Luna NG* (Abbildung 2-1) von *EMT Penzberg* (heute Teil der *Rheinmetall AG*) wird bspw. über eine mobile Rampe gestartet und kann mehr als 12 Stunden in der Luft verbleiben. Die kompakte Einsatzdrohne *Skylark I-LEX* verfügt bei einer maximalen Flugzeit von 3 Stunden über eine Reichweite von bis zu 100 km und kann durch einen einzelnen Soldaten gestartet und bedient werden. Sie kann mit Sensortechnik (z.B. elektrooptischen Kameras, Infrarot-Sensoren oder Radarsystemen) oder Laser-Zielbeleuchtung ausgestattet werden.

Im Vergleich zu Starrflügeldrohnen zeichnen sich Drehflüglerdrohnen, wie die *UMS Skeldar V-200 Sea Falcon* (Abbildung 2-1), durch ihre Möglichkeit des automatischen Senkrechtstarts sowie des stationären Schwebeflugs aus. Entsprechend bieten sie sich z.B. für den Betrieb auf Schiffen an, und werden durch die Bundeswehr z.T. bereits an Bord einer Korvette eingesetzt.



Abbildung 2-1 Links: *Luna NG* (Quelle: *EMT Penzberg*); Rechts: *UMS Skeldar V-200 Sea Falcon* (Quelle: *Bundeswehr*)

Für die Führung taktischer UAV ist eine für ihren Einsatz angepasste Bodenkontrollstation notwendig, die für eine mobile Nutzung ausgelegt ist, durch eine einzelne Person bedient werden kann und eine schnelle Verlegefähigkeit ermöglicht.

Das *Unified Video Terminal* von *Kutta* ist eine Commercial-Off-The-Shelf Software-Lösung für den mobilen Zugriff auf ein unbemanntes System, das auf bestehenden mobilen Endgeräten installiert werden kann. Es unterstützt verschiedene Zugriffsebenen auf ein UAV (sog. Level of Interoperability - LOI) nach STANAG 4586 (2017), um an die Fähigkeiten des Systems und die Bedürfnisse des Operators angepasst zu werden. Die LOI sind in Tabelle 2-1 aufgeführt.

Tabelle 2-1 Levels of Interoperability nach STANAG 4586 (2017)

Level 1	Indirect receipt and/or transmission of sensor product and associated metadata, for example Key Length Value Metadata Elements from the UAV.
Level 2	Direct receipt of sensor product data and associated metadata from the UAV.
Level 3	Control and monitoring of the UAV payload unless specified as monitor only.
Level 4	Control and monitoring of the UAV, unless specified as monitor only, less launch and recovery.
Level 5	Control and monitoring of UAV launch and recovery unless specified as monitor only.

Der *RAPTOR* und die taktische Smartwatch *Smartview* (Abbildung 2-2) sind Android-basierte Nutzerschnittstellen von *Elbit Systems*, die für den taktischen Einsatz abgessener Soldaten entwickelt wurden. Dabei handelt es sich um tragbare Bedieneinheiten mit Touchdisplay, die den Bediener über ein aktuelles operationelles Lagebild zu einer schnelleren Lagebeurteilung befähigen sollen. Durch die Möglichkeit, Live-Ziel- und Missionsdaten zu senden und zu empfangen, eignen sie sich auch zur Integration in ein Battle Management System.

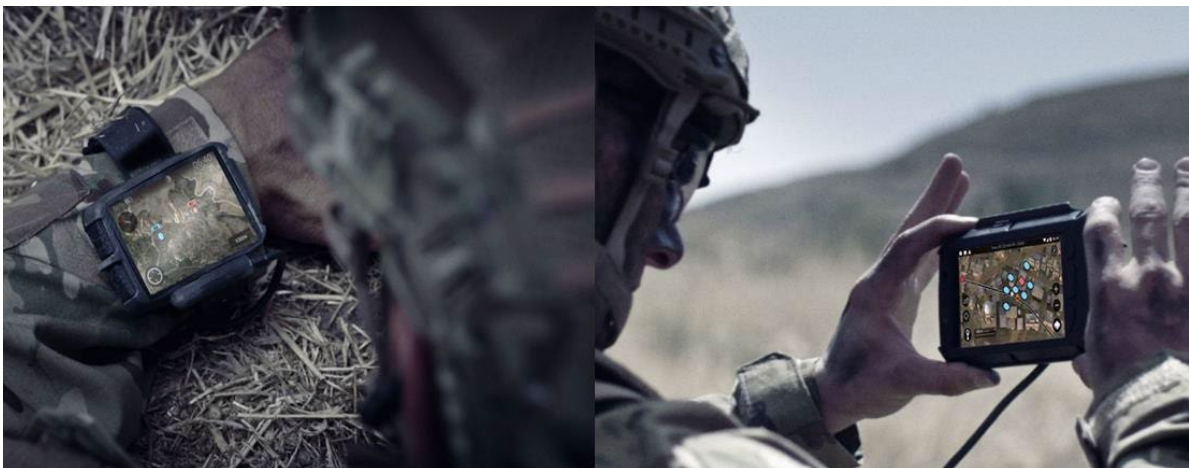


Abbildung 2-2 Links: Smartview; Rechts: RAPTOR (Quelle: Elbit Systems)

2.1.3. Aktuelle Rüstungsprojekte

Mit dem vermehrten Einsatz unbemannter Systeme tritt auch ihre Vernetzung immer weiter in den Vordergrund militärischer Interessen. Daher verfolgen aktuell einige zukunftsorientierte Rüstungsprojekte den Gedanken, ein verteiltes System aus mehreren Sensoren, C2-Führungssystemen und Waffensystemen zu einem Gesamtgefüge zu fusionieren.

Das *Main Ground Combat System* (MGCS) ist ein deutsch-französisches Rüstungsprojekt, in dessen Fokus die Nachfolge des Kampfpanzers Leopard 2 sowie eine drastische Modernisierung derzeitiger Einsatzkonzepte steht. Dabei soll der Einsatz in einem Team mit unbemannten Boden- und Luftfahrzeugen eine erhöhte kollaborative Kampffähigkeit erzielen und die Gesamtleistung durch Koordination mehrerer Plattformen steigern.

Mit dem deutsch-niederländischen Vorhaben *Tactical Edge Networking* (TEN) wurden die beiden nationalen Programme *Digitalisierung Landbasierte Operationen* (D-LBO) und *FOXTROT* verschmolzen, die eine gemeinsame Vernetzung von Sensoren und Wirkmitteln in der zukünftigen Operationsführung verfolgen. Neben der Bereitstellung von IT-Services auf mobil genutzten Geräten sollen einem militärischen Führer auch durch den Einsatz von KI Möglichkeiten des Handelns unterbreitet werden.

Das *Advanced Battle Management System* (ABMS) ist der jüngste Vorstoß der US-Airforce, um ein C2-Führungssystem der nächsten Generation zu schaffen (USAE 2020). Als Beitrag der US-Luftwaffe zum *Joint All Domain Command and Control* (JADC2) Programm konzentriert es sich insbesondere auf die Modernisierung der operationellen Entscheidungsprozesse. ABMS beabsichtigt, sämtliche fliegende Plattformen (inkl. Unbemannter Systeme) in einer Cloud-Umgebung zu vernetzen, um unter dem Einsatz von künstlicher Intelligenz einen nahtlosen Datenaustausch und eine schnellere Entscheidungsfindung zu ermöglichen.

Ebenfalls als Beitrag zum JADC2-Programm setzte die US-Army auf der Übung *Project Convergence 21* eine sog. Combat Cloud zum Aufbau eines kompletten Sensor-to-Shooter-Systems über eine Satellitenverbindung ein. Drei dedizierte KI-Programme (RAINMAKER, PROMETHEUS und FIRESTORM) waren für die Vernetzung von 15 Sensoren und 19 Waffensystemen mit der Combat Cloud, die Suche nach Zielen und ihre Zuordnung zu adäquaten Waffensystemen verantwortlich. Für jedes Ziel wurde dem militärischen Befehlshaber eine Auswahl an Möglichkeiten zu dessen Bekämpfung präsentiert. Ein viertes Programm (SHOT) war anschließend für die automatisierte Umsetzung der gewählten Lösung zuständig. Insgesamt sollen im Rahmen der *Multi-Domain Task Force* fünf solcher Combat Cloud Server aufgebaut werden.

Im Rahmen des europäischen Verteidigungsprojekts *Future Combat Air System* (FCAS) ist die Entwicklung des zukünftigen Fighter-Jets (sog. Next Generation Fighter) in ein Konzept zur Vernetzung auf Plattform-Ebene eingebettet (sog. System-of-Systems). Fester Bestandteil des

FCAS Projekts ist auch die Einbringung von Zukunftstechnologien wie künstlicher Intelligenz und unbemannter Luftfahrzeuge (sog. Remote Carriers). Eine wesentliche Rolle zur Vernetzung spielt dabei die sog. *Multi-Domain Combat Cloud*, eine Cloud-Architektur zur Verknüpfung der militärischen Domänen Land, Luft, Wasser, Weltraum und Cyberspace. Durch die Vernetzung von Sensoren, Effektoren und Lagebildern aller Dimensionen soll sie einen Informations- und Fähigkeitspool bereitstellen, der die Informations-, Führungs- und Wirküberlegenheit sichert.

2.1.4. Vernetzung unbemannter Systeme in der Forschung

Verschiedene Untersuchungen widmen sich der Vernetzung mehrerer unbemannter Systeme durch ihren Anschluss an das *Internet of Things* (IoT), um kollaboratives Multi-UAV Verhalten und einen flexiblen Zugriff auf die UAVs zu ermöglichen. Zur Vernetzung wird dabei häufig auf einen sog. *Middle-Agent*¹ zurückgegriffen, der zwischen einem Bedarfsträger und einem Bereitsteller von Informationen bzw. Fähigkeiten angesiedelt ist.

Sara und Nader schlagen einen Aufbau vor, der einen Middle-Agent-Mechanismus verwendet, um ein kollaboratives UAV-Verhalten zu ermöglichen. Die UAVs verwalten ihre Daten und organisieren ihre Missionen über eine Cloud-Architektur. Die kollaborativen Fähigkeiten werden als Dienste angeboten und können von Nutzern über einen Webservice im Internet angefordert werden.

Dronemap Planner ist ein serviceorientiertes, cloudbasiertes Drohnenmanagementsystem zur Steuerung und Überwachung mehrerer Drohnen über das Internet (Koubâa et al. 2019). Es erlaubt eine nahtlose Kommunikation mit den Drohnen, und ermöglicht ihre Steuerung ohne Entfernungsbeschränkung. Weiterhin wird den Drohnen Zugang zu Cloud-Computing-Ressourcen gewährt, um berechnungsintensive Vorgänge auszulagern. Über Webdienste wird der Zugang zu den Drohnen virtualisiert und die Planung ihrer Einsätze ermöglicht.

IMPACT ist ein Forschungsprojekt der University of Maryland, das Multiagenten-Interaktionen und Agenten-Interoperabilität auf anwendungsunabhängige Weise unterstützt (Arisha et al. 1998; Arisha et al. 1999). Dieses System verwendet einen Middle-Agent, der Anfragen an geeignete Agenten weiterleitet. Aufträge werden mit Hilfe von Verb-Nomen-Ausdrücken angefragt, die unter Nutzung eines Lexikons ausführbaren Diensten zugewiesen werden können.

Die gleichzeitige Führung mehrerer unbemannter Systeme durch einen einzelnen Operateur ist derzeit ebenfalls Gegenstand der Forschung und bezieht dabei mehrheitlich die Planungsunterstützung durch künstliche Intelligenz ein.

¹ Eine eingehendere Beschreibung des Middle-Agent erfolgt in Kapitel 3.7.1

RoboLeader ist ein intelligenter Agent, der einen Operateur bei der Planung mehrerer bodengebundener Roboter unterstützen kann (Chen et al. 2010). Durch Echtzeit-Pfadplanung, kooperative Steuerung und maschinelle Auswahl taktischer Strategien wird es dem Operateur ermöglicht, Entscheidungen auf hohem Niveau treffen zu können. Gleichzeitig wird dadurch die Abhängigkeit der unbemannten Systeme von menschlicher Interaktion reduziert.

Die Projekte MiRA-CA und CASIMUS sowie ihre Vorgängerprojekte untersuchten die Führung mehrerer UAVs aus einem zweisitzigen Hubschraubercockpit heraus (Brand und Schulte 2018; Rudnick und Schulte 2016; Schmitt und Schulte 2018). Dabei stand die Kooperation zwischen den Piloten und der Automation sowie eine beanspruchungsadaptive Assistenz im Fokus der Untersuchungen. Unterstützung in der Missionsplanung wurde dabei durch einen Planungsagenten mit Mixed-Initiative-Ansatz geleistet.

Vor dem Hintergrund einer netzwerkzentrierten Operationsführung verfolgen die genannten Projekte die Vision dreier zusammengehöriger Aspekte: die intensive Vernetzung bemannter und unbemannter Systeme, die Bildung eines domänenübergreifenden Fähigkeitspools sowie den Einsatz künstlicher Intelligenz, um Komplexität zu reduzieren und den C2-Entscheidungsprozess zu unterstützen. Für einen nutzerübergreifenden Einsatz, insbesondere unter einsatznahen Randbedingungen, sind bisher jedoch keine konzeptionellen Überlegungen zu finden. Daher widmet sich diese Arbeit der Erweiterung bisheriger Studien, um mehreren Nutzern den Zugang zu unbemannten Systemen in einem vernetzten Operationsraum zu ermöglichen, insbesondere wenn der Bedarf an diesen Systemen hoch ist. Um dadurch auftretende Konflikte zu reduzieren, soll ihre verteilte Nutzung koordiniert und die damit verbundene Einsatzplanung unterstützt werden. Entsprechend sollen nachfolgend die Grundlagen zum Entscheidungs- und Planungsprozess erörtert werden.

2.2. Entscheidungstheorie

Situationen zum Treffen einer Entscheidung können stark in ihrer Komplexität, ihrer Vertrautheit oder ihren Auswirkungen auf den Entscheider oder dessen Umwelt variieren. Entsprechend lassen sich manche Entscheidungen schnell und z.T. sogar unterbewusst treffen, während andere deutlich mehr Zeit benötigen. Anstatt Entscheidungen hauptsächlich auf Basis von unmittelbar einwirkenden Umwelteinflüssen und direkten Auswirkungen zu treffen, ist der Mensch in der Lage, deutlich komplexere Entscheidungsvorgänge zu durchlaufen. Dabei können z.B. Erfahrungen aus früheren Ereignissen oder durch Projektion in die Zukunft auch langfristige Auswirkungen in die Entscheidung einbezogen werden.

Die Entscheidungslogik untersucht diese Vorgänge wissenschaftlich und beschäftigt sich mit der Entwicklung von Modellen rationaler Entscheidung. Sie bildet damit die Grundlage für die beiden Teilgebiete der *deskriptiven* und *präskriptiven* Entscheidungstheorie (Edwards 2001;

Wang und Ruhe 2007; Laux et al. 2005). Dabei beschäftigt sich die *deskriptive* (auch explikative) Entscheidungstheorie mit dem Erklären und Beschreiben von Entscheidungen, also einer nachträglichen Analyse zur Ermittlung der rationalen Gründe, die zur Entscheidungsfindung beigetragen haben. Bei der *präskriptiven* (auch normativen) Entscheidungstheorie werden Methoden zum Treffen rationaler Entscheidungen erarbeitet. Im Unterschied zur deskriptiven Theorie werden hierbei keine Erklärungen, sondern Vorgehensempfehlungen bzw. Handlungsanleitungen geliefert, an denen man sich bei zukünftigen Entscheidungen orientieren kann. Dabei baut die präskriptive auf der deskriptiven Entscheidungstheorie auf, denn um Anleitungen zum Treffen von Entscheidungen geben zu können, muss der menschliche Entscheidungsprozess zunächst verstanden werden.

2.2.1. Entscheidungsprobleme

Die Notwendigkeit zum Treffen einer Entscheidung wird durch ein *Entscheidungsproblem* initiiert, welches nach Grünig und Kühn (2013) grundsätzlich durch zwei Merkmale charakterisiert ist: ein Problem und mehrere Handlungsoptionen zu dessen Lösung. Ein *Problem* liegt prinzipiell dann vor, wenn der momentane Ist-Zustand einer Situation von einem erstrebenswerten Soll-Zustand abweicht und zu dessen Erreichung ein Handlungsbedarf notwendig ist. Stehen einer handelnden Person (dem sog. Akteur) dabei verschiedene Optionen offen, so handelt es sich um ein Entscheidungsproblem.

Der Soll-Zustand kann dabei durch ein *Ziel-System* definiert werden, das aus einer Menge von einzelnen Zielen besteht. Dabei repräsentiert ein Ziel jeweils die Vorstellung des Akteurs über einen gewünschten, also entweder einen anzustrebenden oder einen zu erhaltenden Zustand. Die Ziele innerhalb eines Zielsystems können nach Grünig und Kühn (2013) anhand der drei Kriterien *Bedeutung*, *Charakter* und *Effizienz der Zielerreichung* klassifiziert werden. Die *Bedeutung* eines Zieles gibt dabei grundsätzlich an, ob es sich um ein Hauptziel handelt, welches notwendigerweise zu erreichen ist, oder um ein Nebenziel, dessen Erreichung lediglich wünschenswert ist. Unter den *Charakter* eines Ziels können leistungswirtschaftliche, finanzwirtschaftliche oder auch soziale Interessen fallen. Das Ziel einer Fabrik, möglichst viele Exemplare eines bestimmten Produkts herzustellen, wäre bspw. leistungswirtschaftlicher Natur. Möchte die Firma hingegen einen möglichst großen Gewinn erreichen, also die Differenz zwischen Umsatz und Ausgaben maximieren, so wäre dies ein finanzwirtschaftliches Ziel. Unter Ziele mit sozialem Charakter fallen z.B. die Schaffung möglichst guter Arbeitsbedingungen oder die Steigerung der Arbeitsmotivation. Schließlich können Ziele noch an der *Effizienz* des Lösungsweges unterschieden werden. Während Satisfaktionsziele lediglich die reine Erreichung des Zieles fordern, wird bei Optimierungszielen zusätzlich ein möglichst guter Lösungsweg angestrebt.

2.2.2. Der kognitive Entscheidungsprozess

Zachary et al. (1982) beschreiben die Entscheidungsfindung schematisch anhand der drei Komponenten *Entscheidungssituation*, *Akteur* und *Entscheidungsprozess*. Die *Entscheidungssituation* umfasst dabei alle entscheidungsrelevanten Elemente der Umwelt. Der *Akteur*, bzw. der Entscheider, ist die handelnde Person, der die Entdeckung, Analyse und Lösung des Entscheidungsproblems obliegt. Dazu herrscht zwischen Situation und Akteur ein kontinuierlicher Informationsaustausch, i.d.R. im Rahmen der Überwachung der Situation.

Kommt es innerhalb der Entscheidungssituation zu einem Problem, respektive einer Abweichung zwischen dem Soll- und Ist-Zustand der betrachteten Situation, so setzt die Entdeckung dieser Diskrepanz den *Entscheidungsprozess* in Gang. Abbildung 2-3 zeigt den Entscheidungsprozess nach Grünig und Kühn (2013) als internen Vorgang des Akteurs. Der *Entdeckung* folgt die *Analyse* des Entscheidungsproblems, um ggf. die Ursache, die Auswirkungen, und damit die Bedeutsamkeit des Problems zu ermitteln. Im Falle mehrerer, gleichzeitig auftretender Entscheidungsprobleme kann so priorisiert werden, welchem Problem zuerst begegnet werden muss.

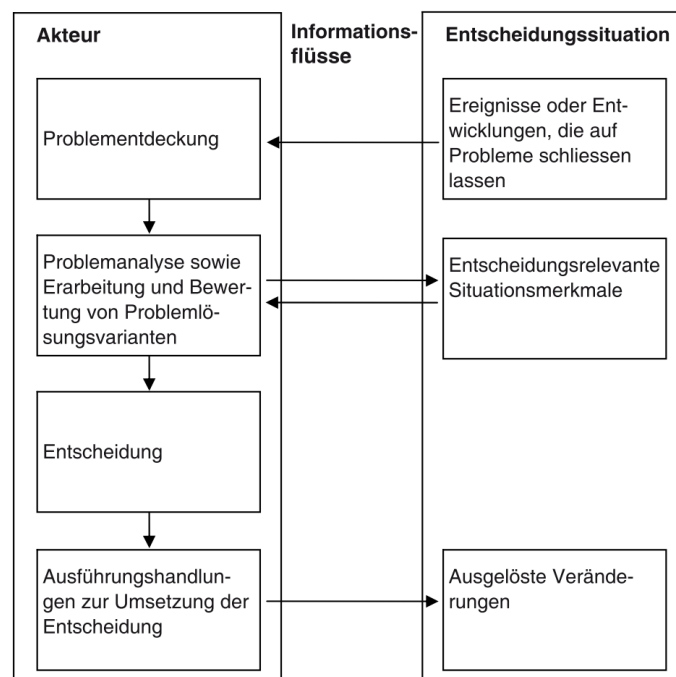


Abbildung 2-3 Der Entscheidungsprozess nach Grünig und Kühn (2013)

Zur Lösung des Entscheidungsproblems (auch *Entscheidungsfindung*) gehören drei essenzielle Bestandteile: das Zielsystem, ein Set aus alternativen Handlungsoptionen und ein Set von Auswahlkriterien bzw. Auswahlstrategien (Wang und Ruhe 2007). Die Entscheidungsfindung selbst bezeichnet dabei den Prozess zur Auswahl einer bevorzugten Handlungsoption aus dem gegebenen Set von Möglichkeiten, um damit den angestrebten Ziel-Zustand zu erreichen (Wilson und Keil 2001; Fischer et al. 2012). Dazu muss der Akteur mögliche

Handlungsoptionen identifizieren, ausarbeiten und anhand von entscheidungsrelevanten Situationsmerkmalen evaluieren. Für den Auswahlprozess können dann die Auswahlstrategien herangezogen und/oder die Kriterien ausgewertet werden.

Das Resultat des Entscheidungsprozesses ist schließlich die Entscheidung selbst, also die Wahl einer der erarbeiteten Optionen und ihre Umsetzung. Damit ist jedoch noch nicht sichergestellt, dass das Entscheidungsproblem, welches den gesamten Entscheidungsprozess initiiert hat, auch tatsächlich behoben wurde. Dazu muss der Akteur die Effekte innerhalb der Entscheidungssituation beobachten, die durch die umgesetzte Entscheidung ausgelöst wurden, und überprüfen, ob dadurch der gewünschte Soll-Zustand eintritt. Andernfalls muss der Entscheidungsprozess (ggf. mit neu gewonnenen Informationen) erneut durchlaufen werden.

2.2.2.1. Entscheidungsmechanismen

Aus der deskriptiven Entscheidungstheorie geht hervor, dass Menschen auf sog. Entscheidungsmechanismen zurückgreifen, um eine Handlungsoption aus mehreren Alternativen auszuwählen. Diese Mechanismen repräsentieren Strategien zur schnellen, effizienten oder möglichst präzisen Entscheidungsfindung und lassen sich nach Wang und Ruhe (2007) in vier Kategorien klassifizieren. Entscheidungen können demnach durch *intuitive*, *empirische*, *heuristische* oder *rationale* Entscheidungsmechanismen getroffen werden.

Beim *intuitiven* Treffen einer Entscheidung basiert die Wahl zum größten Teil auf den Gefühlen und dem Empfinden des Entscheiders, wie z.B. auf persönlichen Präferenzen, dem „Bauchgefühl“ oder dem „logischen Menschenverstand“. Die Entscheidung kann dabei nicht unmittelbar an definierten Eigenschaften oder Parametern begründet werden.

Eine *empirische* Entscheidung ist hingegen vornehmlich von Beobachtungen in der Praxis, wie z.B. experimentellen Ergebnissen, Erfahrungen aus ähnlichen Situationen oder der Routine geprägt. Repräsentative Beispiele für empirische Verfahren sind bspw. die Methode von Versuch und Irrtum (engl. „Trial-and-Error“) oder auch die Übernahme einer Expertenlösung.

Heuristische Entscheidungsmechanismen basieren auf Regeln, welche durch eine vereinfachte Sichtweise auf das Problem eine schnelle Lösung bei begrenztem Wissen erlauben (sog. Heuristiken). Das Problem wird dabei in seiner Komplexität so weit reduziert, bis eine universell einsetzbare Regel auf das reduzierte Problem angewendet werden kann. Dies können z.B. Daumen-Regeln, Prinzipien, oder auch ethische Regeln sein. Menschen nutzen in der Praxis meistens heuristische Verfahren, da diese neben den intuitiven und den empirischen Entscheidungsstrategien auch bei unvollständigem Wissen über das Entscheidungsproblem eine schnelle Entschlussfassung ermöglichen (Wang und Ruhe 2007). Allerdings können sich bei diesen Entscheidungsmechanismen der starke Einfluss subjektiver Wertungen, mangelnde

Erfahrungswerte oder eine ungenaue Zielorientierung auch nachteilig auf die Qualität der Entscheidung auswirken (Grünig und Kühn 2013).

Rationale Entscheidungen werden durch einen systematischen, analytischen Denkprozess über die Wirkung ihrer selbst getroffen und benötigen i.d.R. deutlich mehr Zeit, denn sie umfassen einen zeitaufwändigen Bewertungsprozess. Dieser erfordert die detaillierte Ausarbeitung und Evaluierung möglicher Problemlösungen zur Identifikation der besten Lösungsvariante. Insbesondere dann, wenn mehrere, aufeinander folgende Entscheidungen getroffen werden müssen (sog. Mehrstufige Entscheidungsprobleme), wird dabei außerdem zwischen statischen und dynamischen Entscheidungssituationen unterschieden. In statischen Situationen sind die Entscheidungssituationen, d.h. die für eine Entscheidung maßgeblichen Umweltfaktoren, unabhängig von den Handlungen des Entscheiders. Hierbei können Entscheidungen z.B. auf Basis der minimalen Kosten, des maximalen Gewinns oder des bestes Kosten-Nutzen Verhältnisses ermittelt werden. Im Gegensatz zu statischen Situationen stehen dynamische Entscheidungssituationen mit dem Entscheider in Wechselwirkung und verändern sich in Abhängigkeit von einer vorher durch den Entscheider gewählten Handlung. Modelle für dynamische Entscheidungssituationen sind z.B. die Spiele-Theorie, Entscheidungsraaster oder Entscheidungsbäume.

2.2.2.2. Entscheidungsverfahren

Entscheidungsverfahren sollen durch eine systematische Verfahrensweise dazu beitragen, die Zielausrichtung und den Einfluss von Faktenwissen zu verbessern sowie die Effizienz und Qualität der Lösung eines Entscheidungsproblems zu steigern. Dabei werden unter Entscheidungsverfahren Methoden verstanden, mit denen sich anhand von intersubjektiv nachvollziehbaren Regeln der Informationsbeschaffung und -verarbeitung bestimmte Entscheidungsprobleme methodisch und zielgerichtet bewältigen lassen (Little 1970; Klein 2013).

Sie lassen sich in ihrer Anwendbarkeit in *allgemeine* und *spezielle* Verfahren unterscheiden. Während sich die Anwendung von speziellen Verfahren auf spezifische Probleme beschränkt, erheben allgemeine Verfahren einen Anspruch auf eine universelle Anwendbarkeit. Weiterhin wird zwischen *analytischen* und *heuristischen* Verfahren differenziert. Sie unterscheiden sich darin, ob sie eine optimale Lösung oder eine befriedigende, aber nicht notwendigerweise optimale Lösung liefern. Der Optimalität steht der Aufwand (d.h. Arbeits- und Zeitaufwand) gegenüber, unter denen die Lösung ermittelt wird. Während heuristische Verfahren das Potenzial besitzen, eine befriedigende Lösung unter relativ geringem Aufwand zu finden, können mit analytischen Verfahren optimale Lösungen unter entsprechend höherem Lösungsaufwand erarbeitet werden.

Ein allgemeines heuristisches Verfahren ist das Entscheidungsverfahren in seiner Grundform nach Grünig und Kühn (2013), dargestellt in Abbildung 2-4. Abgeleitet vom Entscheidungsprozess aus Abbildung 2-3 bildet es die Teilaufgaben der Problemanalyse, der Entwicklung und Bewertung von Handlungsalternativen sowie der Entscheidung ab. Dabei können zur Variantenerarbeitung in Schritt 3 sog. Kreativitätstechniken eingesetzt werden, um eine möglichst gute und sinnvolle Abdeckung des Lösungsraums zu erreichen. Die anschließende Bestimmung von Entscheidungskriterien verfolgt den Zweck der Bildung von Beurteilungsmaßstäben zur konkreten Bemessung des i.d.R. vage formulierten Ziels. Reicht zur Beurteilung ein einziges Kriterium aus, so handelt es sich um ein einwertiges Entscheidungsproblem. Meistens erfordern komplexe Entscheidungsprobleme jedoch mehrere Bewertungskriterien und werden entsprechend als mehrwertig bezeichnet. Dabei sollten die unterschiedlichen Bewertungskriterien möglichst unabhängig voneinander sein, d.h. die Güte eines Kriteriums sollte weder direkt noch indirekt mit der Güte eines anderen Kriteriums zusammenhängen. In Schritt 5 wird bewertet, ob Auswirkungen der Varianten von externen, unkontrollierbaren Faktoren abhängig sind. In diesem Fall muss eine Bewertung für die möglichen Situationen (die sog. Umfeldszenarien) entsprechend ihrer Eintrittswahrscheinlichkeiten erfolgen. Anschließend werden die Konsequenzen jeder Lösungsvariante durch Evaluierung der Bewertungskriterien und der Umfeldszenarien ermittelt. Im finalen Schritt erfolgt schließlich die Gesamtbewertung über alle Lösungsvarianten, die mittels sog. Entscheidungsmaxime auf eine Entscheidung zugunsten einer Lösungsvariante abzielt.

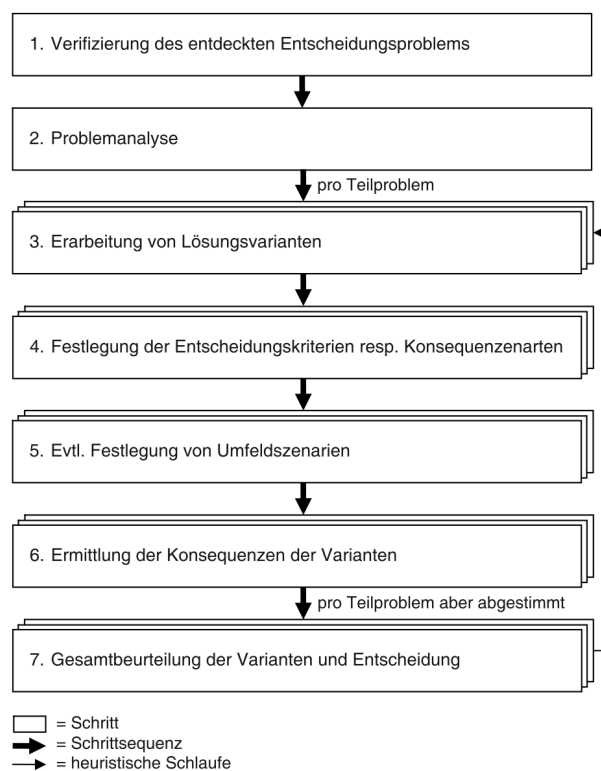


Abbildung 2-4 Allgemeines Entscheidungsverfahren nach Grünig und Kühn (2013)

Ein ähnliches Entscheidungsverfahren ist durch Wang und Ruhe (2007) gegeben. Im Unterschied zur sequenziellen Erarbeitung von Lösungsvarianten und Entscheidungskriterien erfolgen die Suche nach Handlungsalternativen und nützlichen Bewertungskriterien hierbei jedoch parallel.

Bei der Anwendung auf ein komplexes Entscheidungsproblem, dessen Lösung das Treffen mehrerer Einzelentscheidungen erfordert, wird das Problem im Rahmen der Analyse (Schritt 2) in mehrere Teilprobleme aufgegliedert. Diese können dann entweder parallel oder sequenziell abgearbeitet werden. Dazu werden die Teilschritte 3 bis 7 für jedes Unterproblem individuell durchgeführt. In den seltensten Fällen können diese Teilprobleme jedoch vollkommen unabhängig voneinander betrachtet werden. Insbesondere bei der parallelen Verarbeitung müssen die Entscheidungen i.d.R. aufeinander abgestimmt sein und beeinflussen sich daher. Bei der sequenziellen Verarbeitung ist zunächst zu identifizieren, ob die Teilprobleme einer hierarchischen Ordnung unterliegen und in welcher Reihenfolge sie gelöst werden müssen. Doch auch hier können sich die Teilprobleme derart gegenseitig beeinflussen, dass der Entscheidungsprozess an einem vorangegangenen Teilproblem erneut angesetzt werden muss.

2.3. Planung

Der Mensch führt jedoch nicht für jedes Entscheidungsproblem stets eine ausführliche Analyse des Ist- und des Soll-zustandes sowie eine Evaluation verschiedener Handlungsoptionen durch. Ein solches rational-analytisches Vorgehen ist zeit- und ressourcenaufwändig und in vielen Situationen auch ineffizient, da es in diesem Maße gar nicht notwendig ist. Nach Rasmussen (1983) ist das menschliche Entscheidungsverhalten stark davon abhängig, wie bekannt oder fremd die Situation ist, in der die Entscheidung zu treffen ist². In bekannten Situationen z.B. handeln Menschen i.d.R. zielorientiert. Dabei ist das Handeln nicht durch das Ziel selbst bestimmt, sondern schlicht darauf ausgerichtet, dem gewünschten Ziel stetig näher zu kommen, also die Soll-Ist-Abweichung zu reduzieren. Dazu werden Entscheidungsmechanismen angewendet, wie z.B. empirische Regeln, die sich in früheren, ähnlichen Situationen bewährt haben. In ständig wiederkehrenden Situationen können Entscheidungen dann mitunter unterbewusst und routinemäßig herbeigeführt werden, ohne dem Problem aktive Aufmerksamkeit zu schenken. In komplexen, unbekanntem Situationen existieren solche Regeln jedoch nicht. Sie erfordern daher die systematische Erarbeitung und Auswertung verschiedener Vorgehensweisen zur Erreichung des Zielzustands. Diese Ausarbeitung zielt darauf ab, die möglichen Handlungsoptionen auf ihre Zielerreichung sowie ihre Auswirkungen zu bewerten und gegenüberzustellen. I.d.R. erfolgt dies nicht durch physikalische Testung in der Realität

² Rasmussen unterscheidet hierbei drei wesentliche Ebenen des menschlichen Verhaltens: fertigkeitbasiertes, regelbasiertes und wissensbasiertes Verhalten.

(sog. Trial-and-Error), sondern wird gedanklich durchgespielt, um eine Vorstellung davon zu erhalten, wie sich die Ausführung einer Handlung auf die Umwelt auswirken würde. Hierfür ist eine funktionale Analyse der Umgebung sowie ein grundlegendes Verständnis ihrer Wirkungsweise erforderlich. Dies erfordert den expliziten Einsatz kognitiver Wissensrepräsentationen (Mentaler Modelle) über die Eigenschaften und das Verhalten der Umwelt. Dieser Prozess zur systematischen Entwicklung eines Vorgehens wird auch als *Planung* bezeichnet.

Die Planung stellt damit einen Mechanismus dar, um ein Entscheidungsproblem systematisch zu lösen. Analog zum Entscheidungsproblem ist demnach auch das Planungsproblem durch die Abweichung zwischen dem Ist- und dem Soll-Zustand eines Systems gekennzeichnet. Zur Problemlösung muss eine Handlungssequenz identifiziert und durchgeführt werden, die die Soll-Ist-Abweichung und damit das Problem auflöst. Ghallab et al. (2004) definieren *Planung* als den abstrakten, expliziten Denkprozess zur Identifikation dieser Handlungsabfolge, der ihrer Ausführung voransteht. Da diese Sequenz i.d.R. aus mehreren Handlungsschritten besteht, erfordert auch ihre Ermittlung das Treffen mehrerer konsekutiver Entscheidungen, die sich ggf. gegenseitig beeinflussen. Über kombinatorische Überlegungen werden Handlungen ausgewählt und organisiert, um ein vorab definiertes Ziel aus einem ebenfalls vorab definierten Startzustand zu erreichen. Auswahl und Strukturierung erfolgen dabei, indem ihre zu erwartenden Auswirken auf die Umwelt, insbesondere im Hinblick auf die Zielerreichung, prognostiziert werden.

Das Forschungsgebiet der *maschinellen Planung* untersucht dabei Möglichkeiten, diesen Prozess computergestützt ausführen zu lassen und ist dabei von zwei Seiten motiviert. Von einem theoretisch motivierten Standpunkt aus ist die maschinelle Planung, als Nachbildung eines komplexen Denkprozesses, wertvoll im Hinblick auf die Weiterentwicklung von künstlicher Intelligenz. Doch auch aus praktischer Sicht kann sie zur anwendungsnahen Unterstützung in komplexen Planungsvorgängen dienen. Eine maschinelle Plangenerierung kann dabei Vorteile z.B. in der Berücksichtigung von Randbedingungen und Limitierungen, dem Erkennen von Optimierungspotenzial, dem Vorschlag von Lösungen oder der Hervorhebung von Problemen innerhalb eines Plans mit sich bringen.

2.3.1. Das hybride Planungsproblem

Die Lösung eines Planungsproblems definiert sich darin, eine explizite Handlungsabfolge zur Erreichung eines vorgegebenen Ziels zu ermitteln, inkl. eines genauen Zeitplans unter Berücksichtigung von verfügbaren Ressourcen und anderen Randbedingungen. Dies schließt zwei miteinander verknüpfte Unterprobleme ein: Die *logische Planung*, anhand derer ermittelt wird, welche Handlungen durchzuführen sind, und die *Ablauf- und Ressourcenplanung*, dessen Resultat angibt, zu welchem Zeitpunkt und mit welchen Mitteln diese Handlungen

durchzuführen sind (Ghallab et al. 2004). Die Lösungen beider Unterprobleme bedingen sich gegenseitig und können daher in einem Spannungsfeld zueinander stehen.

Die *logische Planung* (engl. *Planning*) umfasst das kausale Problemlösen und steht der Ablauf- und Ressourcenplanung voran. Dabei werden die logisch notwendigen Handlungsschritte identifiziert, die einen gegebenen Startzustand in einen gegebenen Zielzustand überführen. Das Resultat ist i.d.R. eine strukturierte oder partiell sortierte Abfolge von Handlungen, ohne dass die Ressourcennutzung oder ein genauer Zeitplan spezifiziert sind (Ghallab et al. 2004). Zur maschinellen Lösung dieser Aufgabe ist ein vordefiniertes Set aus möglichen Handlungsoptionen notwendig. Dabei muss für jede Handlungsoption aus diesem Set definiert sein, unter welchen Voraussetzungen die Handlung durchführbar ist und welchen Effekt ihre Umsetzung mit sich bringt. Entsprechend können Handlungen ggf. nur unter bestimmten Bedingungen ausgeführt werden oder bewirken als Konsequenz ihrer Durchführung einen Effekt, der von den vorliegenden Vorbedingungen abhängig ist. Da solche Vorbedingungen ggf. vorab über andere Handlungen erreicht werden müssen, können sich Abhängigkeiten, wie z.B. eine logische Reihenfolge der Handlungen ergeben. Zur Verdeutlichung kann ein Problem aus der sog. „Roboter-Welt“ herangezogen werden, die im Bereich der maschinellen Planung eine geläufige Klasse für Beispielprobleme darstellt. Um ein Objekt von Punkt A zu Punkt B zu bringen, stehen einem Roboter die Handlungen „Objekt aufnehmen“, „Objekt ablegen“ und „von einem Ort zu einem anderen fahren“, zur Verfügung. Im Rahmen der logischen Planung kann ermittelt werden, dass alle drei Handlungen notwendig sind, um das Ziel zu erreichen. Weiterhin ergeben sich logische Abfolgen, z.B. dass das Objekt in Raum A aufgenommen werden muss, bevor der Roboter von Raum A nach Raum B fährt, um es schließlich dort abzulegen.

Als Resultat der logischen Planung ist somit bekannt, dass bestimmte Aktionen durchgeführt werden müssen und dass diese Handlungen ggf. partiellen Reihenfolgen unterliegen. Ob diese auch innerhalb einer zeitlich validen Aufgabensequenz und unter Berücksichtigung der verfügbaren Ressourcen umsetzbar sind, ist daraus jedoch noch nicht ersichtlich. Aufgabe der *Ablauf- und Ressourcenplanung* (engl. *Scheduling*) ist die Bestimmung ob und wie eine aus der logischen Planung hervorgegangene Strategie angewendet werden kann. Möglicherweise stehen Randbedingungen an den zeitlichen Ablauf oder die Ressourcenverfügbarkeit einer Durchführung entgegen, sodass ggf. eine alternative Strategie aus der logischen Planung evaluiert werden muss. Bei erfolgreicher Durchführung ist das Resultat eine sortierte Verteilung der Aufgaben auf die ausführende(n) Instanz(en) inkl. Zeitplan und Ressourceneinsatz. Dazu ist insbesondere relevant, wie lange die Ausführung bestimmter Handlungen dauert und welcher Ressourcenverbrauch ihr zukommt. Hierzu können Modelle der Umwelt herangezogen werden, welche die Bestimmung der Dauer einer Handlung sowie resultierende Effekte auf den Verbrauch von Ressourcen (z.B. Treibstoff, Lebenszeit, Geld, etc.) erlauben. Ein klassisches Beispiel hierfür ist das Problem der Pfadplanung. Aus der logischen Planung ging bspw. hervor,

dass sich der Roboter von Ort A zu Ort B bewegen muss. Mit einem entsprechenden physikalischen Modell, welches die Topografie im Bereich zwischen A und B sowie die Dynamik des Roboters enthält, lässt sich ein Bewegungspfad generieren. Daraus kann unter Berücksichtigung von Geschwindigkeit und Treibstoffverbrauch wiederum abgeleitet werden, welche Zeitdauer und wie viel Treibstoff zur Durchführung der Aktion notwendig sind. Ziel der Ablaufplanung ist es an erster Stelle die Durchführbarkeit der geplanten Handlungen zu gewährleisten. Meistens wird darüber hinaus aber auch noch eine möglichst günstige Handlungsabfolge angestrebt, sodass ein vordefiniertes Kriterium optimiert wird. Häufig ist dieses Maß eine möglichst kurze Gesamtdauer zur Erreichung des Ziels. Jedoch können auch andere Parameter, wie der globale Ressourcenverbrauch oder eine Kombination unterschiedlicher Parameter im Vordergrund stehen, die die Güte des resultierenden Plans definieren. Als Beispiel hierfür kann das „Problem des fahrenden Händlers“ (engl. Traveling salesman problem) herangezogen werden. Dabei soll eine möglichst günstige Reihenfolge zum Besuch einer gegebenen Menge an Orten ermittelt werden. Die notwendigen Einzelhandlungen (d.h. die Besuche der einzelnen Orte) können als Resultat einer vorangegangenen logischen Planung betrachtet werden. Unter Berücksichtigung der eintretenden Effekte (hier die zurückgelegte Entfernung oder die benötigte Zeit) ist es nun Aufgabe der Ablauf- und Ressourcenplanung, die günstigste Handlungsabfolge zu bestimmen, unter der die insgesamt zurückgelegte Entfernung oder benötigte Zeit minimiert wird.

2.3.2. Intelligente Planungs-Agenten

Das Themenfeld der *Planungs-Agenten* beschäftigt sich mit der maschinellen Lösung von Planungsproblemen. Da die Lösung eines Planungsproblems eine höhere kognitive Fähigkeit darstellt, sind Planungs-Agenten generell den intelligenten bzw. kognitiven Systemen zuzuordnen. Entsprechend fällt ihre Entwicklung in den Bereich der künstlichen Intelligenz, also der technischen Nachahmung kognitiver Fähigkeiten, die einen gewissen Grad an Intelligenz voraussetzen. Zu diesen Fähigkeiten zählen bspw. die Entscheidungsfindung, die Problemlösung, das logische Denken, das Ziehen von Schlussfolgerungen (logisches Schließen) oder das Wiedererkennen und Identifizieren von Mustern. Ebenso fallen darunter aber auch abstraktere Fähigkeiten, wie Vorstellungskraft, Kreativität oder Emotionen (Hopgood 2000). Mögliche praktische Anwendungsbereiche für Planungsagenten sind bspw. die Vorgehensplanung (Generierung einer logischen Handlungsabfolge), die Pfadplanung (Synthese eines geometrischen Pfades innerhalb eines Raumes von einem Startpunkt zu einem Zielpunkt) oder die Perzeptionsplanung (Planung sensorischer Aktivitäten zur Sammlung von Daten und Informationen).

Systeme künstlicher Intelligenz werden klassifiziert, abhängig davon, wie das Wissen zur Generierung der kognitiven Fähigkeit vorliegt (Hopgood 2000). In symbolischen Systemen

liegt das Wissen explizit in symbolischer Form vor und kann somit von einem Menschen gelesen und verstanden werden. Sie werden auch als *Wissensbasierte Systeme* (orig. Knowledge-based Systems) bezeichnet. Bei subsymbolischen Systemen (orig. Computational Intelligence) liegt das Wissen implizit und nicht menschen-lesbar in Modellen vor, die durch numerische Ableitung aus Trainingsdaten gewonnen wurden (z.B. neuronale Netze). Weiterhin gibt es hybride Systeme, in denen das Wissen als Mischformen aus symbolischem und subsymbolischem Wissen vorliegt. Abbildung 2-5 gibt einen Überblick über die unterschiedlichen Kategorien intelligenter Software.

Während in gewöhnlichen Programmen das Domänen-Wissen und die Methoden zur Anwendung dieses Wissens im Programmcode verflochten sind, sind diese beiden Anteile in einem Wissensbasierten System in zwei Module, die Wissensbasis und die Inferenz-Maschine, aufgetrennt. In der Wissensbasis liegt das Wissen deklarativ und explizit in Form von Fakten (i.d.R. Feststellungen über einen Zustand) und Regeln (Zusammenhang zwischen Ursache und Wirkung) vor. Anhand ihrer Beziehungen untereinander kann mittels Deduktion, Abduktion oder Induktion auch neues Wissen aus dem gegebenen Wissen abgeleitet werden³. Die Inferenz-Maschine hat dabei den Zweck, das Wissen aus der Wissensbasis zu verwenden (sog. Reasoning).

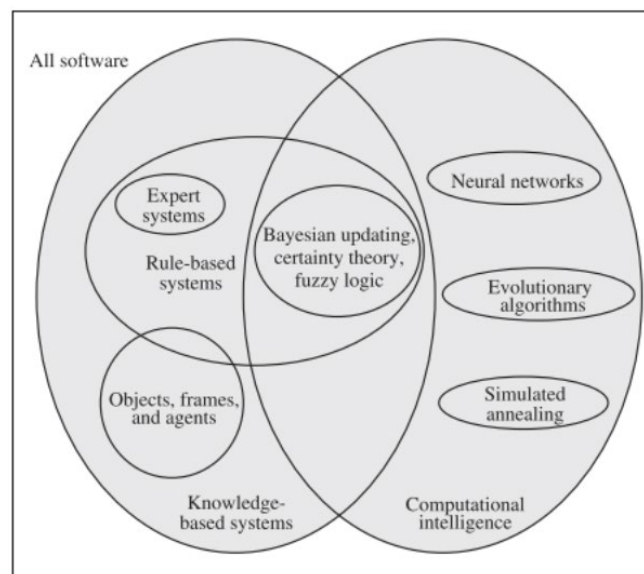


Abbildung 2-5 Kategorien intelligenter Software (Hopgood 2005)

Intelligente Agenten bilden eine Unterkategorie der Wissensbasierten Systeme und beschreiben Software-Module zur Nachbildung intelligenten Verhaltens. Dabei beschreibt der Begriff des Agenten zunächst einmal jede Entität, die innerhalb einer Umgebung situiert ist und mit ihr in

³ Die Deduktion beschreibt die Ableitung einer Wirkung, als Folge einer gegebenen Ursache. Unter Abduktion versteht man die Umkehrung der Deduktion, also die Ableitung einer Ursache aus einer gegebenen Wirkung. Die Ursachenableitung folgt dabei der Annahme über eine geschlossene Welt, d.h. dass davon ausgegangen wird, dass es keine anderen Ursache-Wirkung Zusammenhänge gibt als die bekannten. Als Induktion bzw. logisches Schließen wird die Ableitung einer Regel, d.h. eines Zusammenhangs zwischen Ursache und Wirkung verstanden. Dies erfolgt i.d.R. durch Beobachtung mehrerer Beispielfälle, z.B. durch maschinelles Lernen.

Wechselwirkung steht (Russell und Norvig 2013). Dazu benötigt ein Agent Rezeptoren zur Aufnahme von Stimuli, Aktuatoren zur Interaktion mit seiner Umwelt sowie die Fähigkeit, mittels eines Verarbeitungsprozesses Reaktionen auf die wahrgenommene Umgebung generieren zu können. Dazu muss ein Agent in der Lage sein, den Stimulus aus der Umgebung in eine interne Repräsentation (Zustand) zu übersetzen, über kognitive Prozesse eine neue interne Repräsentation daraus abzuleiten (Folgerung) und diese abschließend in eine Handlung (Reaktion) zurück zu übersetzen (Craik 1943). Nach dieser Definition ist auch der Mensch als Agent aufzufassen, da er über die menschlichen Sinne die physische Umwelt wahrnehmen und z.B. über seine Hände mit ihr interagieren kann. Dabei muss die Umwelt nicht ausschließlich physischer Natur sein. Es kann sich dabei auch um eine virtuelle Umgebung handeln, in denen der Informationsfluss durch digitale Signale stattfindet. Tatsächlich werden Agenten in der Wissenschaft hauptsächlich im Zusammenhang mit technischen Computer-Systemen im Informationsraum (sog. Software-Agenten) betrachtet. Der Grad der „Intelligenz“ eines Agenten bemisst sich dabei hauptsächlich an der Methodik zur Verarbeitung der Stimuli, also wie Reaktionen auf die wahrgenommene Umgebung generiert werden. Besitzt der Agent ein Modell seiner externen Umgebung, ermöglicht ihm dies, verschiedene Handlungsoptionen vorab auszutesten, um die beste Aktion zu identifizieren, vorausschauend zu handeln oder vergangene Erfahrungen einzubeziehen (Craik 1943). Russell und Norvig (2013) unterscheiden dabei in aufsteigender Komplexität zwischen Agenten, die ihre Handlungen ausschließlich als direkte Konsequenz auf einen externen Stimulus wählen (Reflex-Agenten), solche die ihre Handlungen auf die Erreichung eines spezifischen Ziels ausrichten (zielgetriebene Agenten) und solche Agenten, die sich an der Maximierung eines Nutzwertes orientieren (nutzwertgetriebene Agenten).

Ergänzend spezifizieren Wooldridge und Jennings (1995), dass sich ein intelligenter Agent stets in einem Zustand befindet, der (zumindest teilweise) von einem Menschen oder einem anderen Agenten wahrgenommen werden kann. Basierend auf diesem Zustand und seiner Wahrnehmung der Umgebung ist er befähigt, eigenständig Handlungsentscheidungen ohne anderweitige Interaktion zu treffen. Sein Verhalten kann dabei sowohl reaktiv, also basierend auf Änderungen der Umwelt, als auch zielorientiert durch proaktives Handeln geprägt sein. Dazu muss er zur sozialen Interaktion befähigt sein, also mit anderen Agenten oder Menschen kommunizieren können, um die eigenen Ziele zu erreichen oder an gemeinsamen Zielen zu arbeiten.

2.3.3. State-Space- und Plan-Space-Planning

Um ein Planungsproblem maschinell handhabbar zu machen, muss der (ggf. unendlich große) Raum für mögliche Lösungen durch Diskretisierung und Einschränkung begrenzt werden. Dazu betrachten Planungsmodelle die relevanten Aspekte der Umgebung als sog. *Zustand-*

Transitions-Systeme (engl. State-Transition-Systems) bzw. als *Systeme diskreter Ereignisse* (engl. Discrete-Event Systems).

Das *Zustand-Transitions-System* ist eine vereinfachte Darstellung eines Systems und nimmt einige Beschränkungen an (Ghallab et al. 2016). Dabei ist der momentane Zustand des Systems komplett beobachtbar, d.h. zu jedem Zeitpunkt bekannt, und kann auch nur einen von einer endlichen Anzahl bekannter Zustände annehmen. Solange keine Aktion ausgeführt wird, verhält sich das System statisch, verharrt also im selben Zustand. Dementsprechend hat das System keine Eigendynamik und es können auch keine äußeren Ereignisse auftreten, die eine Änderung des Systemzustands bewirken. Wird eine Aktion ausgeführt, so reagiert das System deterministisch, d.h. das System verhält sich unter den gleichen Voraussetzungen immer gleich. Demzufolge ist für jede Kombination aus momentanem Zustand und Aktion der resultierende Zustand immer derselbe⁴. Die Aktionen selbst besitzen dabei keine Dauer, sondern haben eine instantane (diskrete) Änderung des Systemzustands zur Folge. Die möglichen Zustände, die ein solches System annehmen kann, können visuell als gerichteter Graph dargestellt werden. In ihnen repräsentieren die *Knoten* unterschiedliche System-Zustände, welche über die entsprechenden Aktionen miteinander verknüpft werden. In Form sog. *Kanten* überführen sie das System vom Zustand des Startknotens in den Zustand des Endknotens. Die linke Seite von Abbildung 2-6 zeigt den Graphen eines Systems von drei aufeinander stapelbaren Blöcken. Die Anzahl an Knoten und ihrer Verbindungen untereinander ist dabei ein Maß für die Komplexität des betrachteten Systems (Fischer et al. 2012). Während wenig komplexe Systeme mit einer geringeren Menge an Knoten und Verknüpfungen auskommen, steigt die System-Komplexität mit der Anzahl möglicher Zustände und Transitionen.

Unter diesen Einschränkungen definiert sich Planung als Lösung des folgenden Problems:

Sei die Planungs-Domäne (Menge aller Systemzustände \mathcal{S} , Menge aller Aktionen \mathcal{A} sowie die Menge aller Transitionen \mathcal{T} in denen definiert ist, welche Zustände aus \mathcal{S} durch welche Aktionen aus \mathcal{A} jeweils ineinander übergehen) sowie das Planungsproblem (Initialzustand \mathcal{S}_0 und Zielzustand \mathcal{S}_g des Systems) gegeben, so soll eine linear geordnete, endliche Abfolge (Sequenz) von Aktionen aus \mathcal{A} und eine korrespondierende Sequenz von Zuständen aus \mathcal{S} gefunden werden, die den Initialzustand \mathcal{S}_0 in den Zielzustand \mathcal{S}_g überführt. Diese Aktionsfolge wird auch als Plan bezeichnet (Ghallab et al. 2004).

⁴ Das Zustandsmodell kann auch für partiell deterministische Systeme, für partiell beobachtbare Systeme und auch für das Auftreten äußerer Ereignisse erweitert werden.

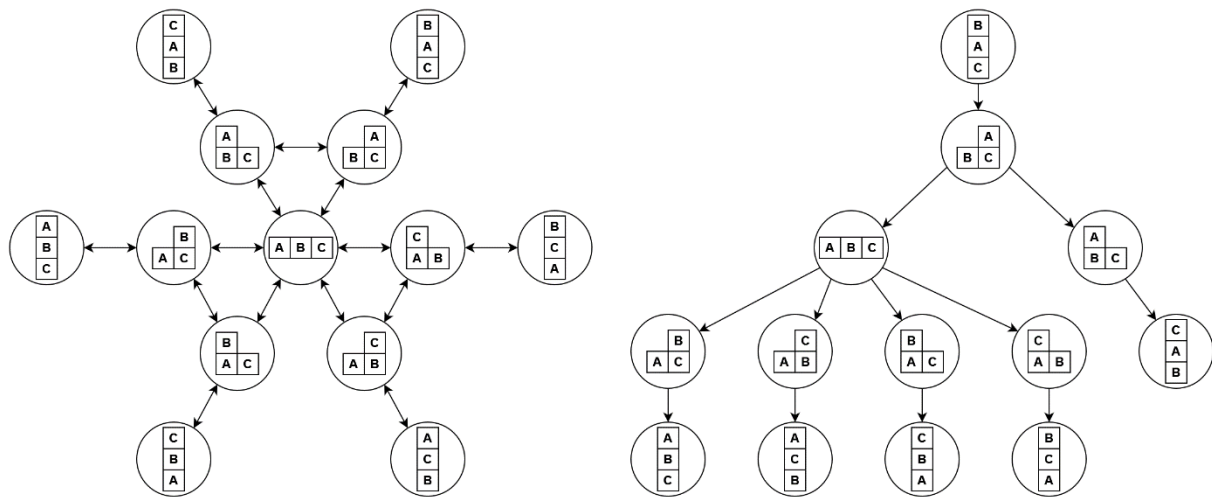


Abbildung 2-6 Zustandsmodell von drei aufeinander stapelbaren Blöcken als Graph (links) und Suchbaum (rechts)

Die Lösung eines Planungsproblems im Zustandsraum stellt einen Pfad dar, der Initial- und Zielzustand verbindet und ggf. über mehrere Knoten und Kanten verlaufen kann. Ihre Ermittlung erfolgt i.d.R. durch eine sog. Graphensuche, bei der der Graph über einen Suchalgorithmus erforscht wird (Hopgood 2000). Dabei kann entweder eine Aktionsfolge gesucht werden, die ausgehend vom Initialzustand im Zielzustand (Vorwärtssuche) oder ausgehend vom Zielzustand im Initialzustand mündet (Rückwärtssuche). Bei einer kombinierten Suche werden sowohl Elemente der Vorwärtssuche als auch Elemente der Rückwärtssuche eingesetzt.

Hierfür bietet es sich an, den Graphen als Suchbaum darzustellen. Dieser ist ein kreisloser, gerichteter Graph, der sich ausgehend vom Knoten mit Eingangsvalenz⁵ 0 (dem sog. Wurzelknoten) über mehrere Ebenen verzweigt (Bühlmann et al. 2013). Außer dem Wurzelknoten haben alle anderen Knoten Eingangsvalenz 1. Knoten ohne Kindknoten, d.h. mit Ausgangsvalenz 0, werden als Blatt bezeichnet. Sie repräsentieren Zustände, aus denen das System nicht mehr in einen noch nicht betrachteten Zustand überführt werden kann. Die rechte Seite der Abbildung 2-6 zeigt einen Suchbaum für das bereits erwähnte System dreier Blöcke. Der Suchvorgang startet i.d.R. im Wurzelknoten des Suchbaums und versucht dann durch die Erkundung von Kindknoten den Ziel-Knoten zu finden (sog. Expandierung im Suchraum). Da diese Suche mitunter sehr zeitaufwändig sein kann, verfolgen Suchalgorithmen unterschiedliche Vorgehensstrategien bei der Wahl des zu untersuchenden Knotens.

Uninformierte Algorithmen, wie die Breiten- und Tiefensuche, besitzen abseits der Definition keine Informationen über das Problem und suchen demnach blind im Suchraum. Ausgehend vom Startknoten werden bei der *Breitensuche* (engl. Breadth-First) zunächst alle Kindknoten durchlaufen, bevor tiefer liegende Knoten erforscht werden. Der Baum wird somit Ebene für Ebene durchsucht. Die *Tiefensuche* (engl. Depth-First) startet hingegen beim ersten Kindknoten

⁵ Die Eingangsvalenz gibt an, wie viele (gerichtete) Kanten in diesem Knoten enden. Entsprechend gibt die Ausgangsvalenz an, wie viele Kanten von dem Knoten starten.

und läuft zunächst alle Ebenen des Suchbaums bis zum Erreichen eines Blatts hinab, bevor der nächste Kindknoten angelaufen wird (Nils Johan Nilsson 1998).

Informierte Suchalgorithmen nutzen Heuristiken, also Annahmen über die Umwelt, um vielversprechende Knoten bei der Expansion zu bevorzugen und erreichen das Ziel damit i.d.R. deutlich effizienter als uninformierte Algorithmen. Typische Vertreter für informierte Suchverfahren sind die *Bestensuche* (engl. Best-First), die *Gierige Bestensuche* (Greedy Best-First), der A* oder der Minimax-Algorithmus.

Eine Lösung im Zustandsraum ist stets eine vollständig geordnete Abfolge von Aktionen. Dabei benötigen viele Planungsprobleme nur eine partiell geordnete Abfolge von Aktionen, da Teilprobleme häufig unabhängig voneinander gelöst werden können. Um die Flexibilität in der Problemlösung zu erhöhen und die Suche auf partiell geordnete Pläne (engl. Partially Ordered Plans) anzupassen, kann sie daher im Plan-Raum (Plan-Space Planning) erfolgen (Ghallab et al. 2004). Dabei verläuft sie prinzipiell analog zur Suche im Zustandsraum, nur dass die Knoten partiell spezifizierte Pläne statt Systemzustände darstellen. Eine Kante stellt eine Ausweitung des Ausgangsplans (repräsentiert durch den Startknoten) dar, die in einem veränderten Plan (dem Endknoten) resultiert. Solch eine Ausweitung kann bspw. das Hinzufügen einer Aktion oder einer Randbedingung umfassen. Die Suche startet hierbei im Wurzelknoten, der i.d.R. einen leeren Plan repräsentiert und zielt darauf ab, den Knoten zu finden, der den (ggf. partiell geordneten) Lösungsplan zur Erfüllung des Ziels enthält. Da ein partiell geordneter Plan nun mehrere Möglichkeiten zu dessen Umsetzung zulässt, kann über eine anschließende Optimierung (z.B. Lineare Optimierung) diejenige Möglichkeit identifiziert werden, die spezifische Kriterien optimiert.

2.4. Multi-Agenten Planung

In der Praxis tauchen Probleme häufig auch innerhalb von Systemen auf, in denen mehrere intelligente Agenten individuelle Ziele verfolgen bzw. unabhängig voneinander handeln können. Zur Lösung von Planungsproblemen innerhalb solcher sog. *Multi-Agenten Systeme* (Hopgood 2000) reicht die Betrachtung eines einzelnen Agenten entsprechender Weise nicht mehr aus. Die *Multi-Agenten Planung* (MAP) betrachtet daher die Planung für und/oder durch eine Mehrzahl von Agenten (Weerdts und Clement 2009).

Diese Erweiterung der Einzelagenten-Planung ist vornehmlich dadurch motiviert, dass die Fähigkeiten eines einzelnen Agenten nicht ausreichen, um das Gesamtproblem alleine zu bewältigen. Dieses Problem kann dabei sowohl auf Ebene der Plan-Generierung als auch auf Ebene der Plan-Ausführung vorherrschen. Probleme können bspw. zu komplex sein, als dass sie durch einen einzelnen Agenten mit seiner verfügbaren Rechenleistung hinreichend schnell gelöst werden können. Doch durch eine Verteilung und Parallelisierung des Planungsaufwands

kann der Lösungsprozess beschleunigt werden. Außerdem kann es in der verteilten Natur eines Problems liegen, dass dessen Lösung die Zusammenarbeit oder Koordinierung mehrerer Agenten erfordert. Mögliche Treiber sind z.B., weil die Expertise bzw. die Fähigkeiten zur Lösung unter mehreren Agenten verteilt sind, weil das Planungsproblem aus räumlich verteilten Einzelproblemen besteht oder weil Informationen, die zur Plansynthese benötigt werden, verteilt vorliegen und ihre Auswertung vor Ort zu einer Reduktion des Datenverkehrs beiträgt (Durfee 2001). Doch auch ohne, dass die Notwendigkeit für eine MAP vorliegt, kann eine Verteilung des Lösungsprozesses auf mehrere Agenten Vorteile, z.B. hinsichtlich der Planungsgeschwindigkeit, Effizienz, Robustheit und Skalierbarkeit mit sich bringen (Hopgood 2000).

2.4.1. Klassifizierung

Um die Grundlagen der Multi-Agenten Planung als solches und ihre unterschiedlichen Ausprägungen besser verstehen zu können, sollen im Folgenden drei Aspekte beleuchtet werden. Zuerst soll betrachtet werden, wie viele Agenten und in welcher Funktion sie am Planungsproblem beteiligt sind, wie die maschinelle Lösung von MAP-Problemen gestaltet werden kann und welche Ausprägungen die Zielorientierung der am Problem beteiligten Agenten annehmen kann.

2.4.1.1. Klassifizierung anhand der Agenten-Funktion

Die Agenten, die an einer Multi-Agenten Planung beteiligt sind, können prinzipiell zwei verschiedene Funktionen wahrnehmen. Sie können entweder einen Beitrag zur Plansynthese leisten (planender Agent) oder sie repräsentieren Entitäten, die ausschließlich für die Durchführung einer im Vorfeld geplanten Aktivität (ausführender Agent) zuständig ist (Torreño et al. 2017). Ziel der MAP ist dabei die Ermittlung einer Handlungsabfolge entweder für mehrere ausführende Agenten oder von mehreren planenden Agenten. Auch eine Kombination aus beidem ist möglich, wenn ein Plan für mehrere ausführende Agenten von mehreren planenden Agenten generiert wird. Abbildung 2-7 zeigt die Kategorisierung der MAP im Hinblick auf die Funktion und Anzahl mehrerer Agenten:

- **Einzelagentenplanung** (engl. Single-agent planning): Dies ist die simpelste Form, in der ein einzelner planender Agent eine Lösung für einen einzelnen ausführenden Agenten entwickelt. Hierbei sei darauf verwiesen, dass es sich bei planendem und ausführendem Agenten nicht zwangsläufig um den gleichen Agenten handeln muss.
- **Planung von einem für mehrere Agenten** (engl. Planning for multiple agents): Hierbei werden die Handlungen für mehrere ausführende Agenten durch einen einzelnen planenden Agenten ermittelt.

- **Faktorierte Planung** (engl. Factorized planning): Hierbei wird die Planungsaktivität für einen einzelnen Agenten unter mehreren planenden Agenten aufgeteilt.
- **Planung von mehreren für mehrere Agenten** (engl. Planning by multiple agents): Hierbei ist die Planung der Handlungen für mehrere ausführende Agenten unter mehreren planenden Agenten aufgeteilt. Dabei wird üblicherweise ein eins-zu-eins Verhältnis zwischen planenden und ausführenden Agenten verfolgt, sodass jeder planende Agent die Aktionen ermittelt, die später durch einen zugehörigen ausführenden Agenten durchgeführt werden.

		Planning agents $ \mathcal{AG} $	
		1	n
Execution agents	1	Single-agent planning	Factored planning
	n	Planning <i>for</i> multiple agents	Planning <i>by</i> multiple agents

Abbildung 2-7 Kategorisierung MAP (Torreño et al. 2017)

2.4.1.2. Klassifizierung anhand des Lösungsprozesses

Die weitere Klassifizierung konzentriert sich auf die Planungsaktivität durch mehrere Planungsagenten, und die Frage, ob diese räumlich verteilt vorliegen. Die Verwendung mehrerer Planungsinstanzen kann dabei sowohl von der absichtlichen Aufteilung (Lastverteilung) aufgrund begrenzter Ressourcen (wie z.B. Rechenleistung, Speicherplatz, etc.) als auch durch eine natürliche Verteilung der Planungsfähigkeit (z.B. aufgrund einer dezentralen Problemumgebung) motiviert sein. Dabei kann der Lösungsprozess von MAP Problemen entweder zentralisiert oder dezentralisiert gestaltet sein (DesJardins et al, 1999; Torreño et al, 2017). In Abbildung 2-8 sind beide Lösungsprozesse schematisch dargestellt.

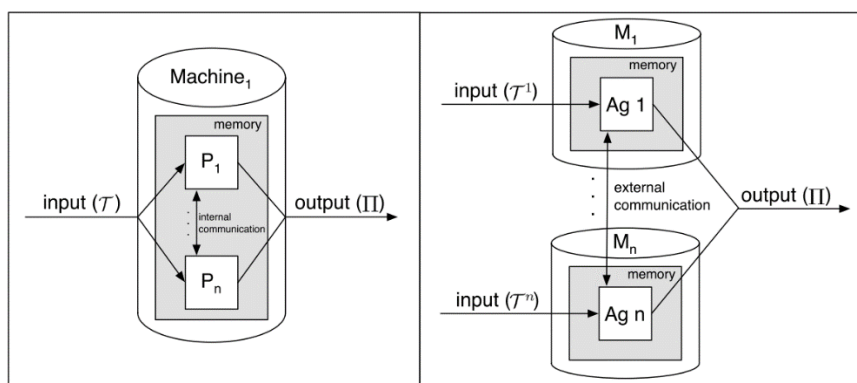


Abbildung 2-8 Zentralisierte (links) und Dezentralisierte MAP (rechts) (Torreño et al. 2017)

Beim *zentralisierten Lösungsprozess* für MAP-Probleme werden die individuellen Planungsaktivitäten in einem zentralen Prozess, sprich auf einer Maschine gebündelt. Unabhängig davon, wie viele planende Agenten an der Plansynthese beteiligt sind, wird hierbei

ein globaler Lösungsplan durch einen zentralen Prozess generiert. Dieser Ansatz besitzt zwei wesentliche Vorteile: Erstens ist keine externe Kommunikation zwischen räumlich getrennten planenden Agenten notwendig, welche i.d.R. zu starken Verzögerungen im Planungsprozess führen kann. Zweitens können zur Lösung Planungstechnologien aus der Einzelagentenplanung angewendet werden, die sich bereits durch Robustheit und Effizienz bewährt haben.

Im *dezentralisierten Lösungsprozess* ist die Planungsaktivität auf mehrere Prozesse und unterschiedliche Maschinen verteilt. Schwerpunkt ist hierbei die Koordinierung der Planungsaktivitäten der räumlich verteilten Agenten, wofür eine geeignete und verlässliche Kommunikationsinfrastruktur entscheidend ist.

In der Praxis sind die meisten MAP-Probleme motiviert durch die Koordinierung von Aktionen mehrerer verteilter selbst-planender Agenten. Dabei befindet sich ein planender Agent an Bord eines ausführenden Agenten (z.B. ein Roboter, der seine eigenen Handlungen plant). Somit sind die beiden Funktionen der Plangenerierung und der Planausführung, welche bisher als getrennte Module betrachtet wurden, kollokiert. Sie befinden sich also auf dem gleichen System und können als kombinierter Agent zusammengefasst werden. Entsprechend besitzt jeder Agent innerhalb eines dezentralen Systems ein individuell zu lösendes Planungsproblem zur Ermittlung der Handlungen, unter denen er sein eigenes Ziel erreicht (Weerdts und Clement 2009). Diese Sonderform der Planung für mehrere Agenten durch mehrere Agenten wird in der Wissenschaft unter dem Teilgebiet der *verteilten Planung* (engl. Distributed Planning) untersucht (DesJardins et al. 1999).

2.4.1.3. Klassifizierung anhand der Zielverhältnisse

Zur weiteren Klassifizierung ist das Verhältnis der Agenten untereinander relevant, welches davon geprägt ist, ob Agenten ein gemeinsames Ziel oder individuelle Einzelziele verfolgen. Dies ist insbesondere ausschlaggebend für das Zusammenwirken und die Koordinierung zwischen den Agenten. Unterschieden wird hierbei, ob die Agenten kooperativ an der Erreichung eines gemeinsamen Ziels arbeiten, ob sie vermittelnd agieren, um ihre jeweiligen Einzelziele zu erreichen oder ob sie antagonistische, also entgegengesetzte Ziele verfolgen.

Die *kontradiktorische MAP* (engl. adversarial MAP) betrachtet Anwendungsfälle, in denen Agenten kompetitive Ziele verfolgen. Dabei ist der Erfolg des einen Agenten proportional zum Misserfolg des rivalisierenden Agenten. Die Betrachtung solcher MAP-Probleme dient vornehmlich zur Entwicklung von Strategien, um einem Rivalen in einer Wettbewerbssituation zu begegnen. Die Spieltheorie (engl. Game Theory) nach Neumann und Morgenstern (2007) untersucht hierzu bspw. Strategien, um den im optimistischen Fall maximal erzielbaren Gewinn zu maximieren (Maximax-Strategie) oder im pessimistischen Fall den maximalen Verlust zu minimieren (Minimax-Regel nach Wald (1939)). Typische Beispiele finden sich in sog. Null-

Summen-Spielen, wie z.B. Schach, Go oder Tic-Tac-Toe. Da die Forschungsfrage dieser Arbeit jedoch nicht auf die Ressourcen-Planung in kompetitiven Situationen ausgerichtet ist, soll die kontradiktorische MAP an dieser Stelle nicht weiter betrachtet, sondern ausschließlich der Vollständigkeit halber aufgeführt werden.

Die *kooperative MAP* (engl. Cooperative Distributed Planning) ist nach Durfee (2001) definiert als die kollektive Anstrengung mehrerer planender Agenten, um gemeinsam Problemlösungen zu erarbeiten, die ihre individuelle Expertise übersteigen oder um Probleme effizienter lösen zu können. Eine kooperative MAP-Aufgabe ist demzufolge definiert als das kollektive Bestreben mehrerer nicht selbst-interessierter Agenten, ein gemeinsames Ziel zu erreichen. Dazu kombinieren sie ihr Wissen, ihre Informationen und ihre Fähigkeiten, unabhängig davon, wie diese in der Anwendungsdomäne verteilt sind. Nach DesJardins et al. (1999) hat die kooperative MAP zusätzlich die Erstellung eines möglichst guten (evtl. sogar optimalen) Gesamtplans zum Ziel. Die Koordinierung zwischen den Agenten untereinander verfolgt also den Zweck, die Teilpläne der Einzelagenten möglichst gut aufeinander abzustimmen. Die Einzelagenten streben hierbei i.d.R. ein gemeinsames Ziel an, dessen Erreichung möglichst effizient gestaltet werden soll. Dazu tauschen sie stetig Informationen über ihre jeweiligen Einzelpläne untereinander aus, damit diese iterativ verfeinert werden können, bis sie gut zusammenpassen.

Unterscheidend dazu wird laut DesJardins et al. (1999) bei der *MAP auf Verhandlungsbasis* (engl. Negotiated Distributed Planning) das Ziel verfolgt, dass die beteiligten Agenten ihre jeweiligen Einzelziele erfüllen können. Im Gegensatz zur kooperativen MAP verfolgen die Einzelagenten hierbei i.d.R. unterschiedliche Ziele. Die Koordinierung mit anderen Agenten erfüllt demnach vor allem einen Selbstzweck, nämlich die Sicherstellung, dass das eigene Ziel durch den entwickelten Gesamtplan erreicht wird. Dies geschieht i.d.R. jedoch nicht auf Kosten anderer Agenten, wie z.B. in Null-Summen-Spielen. Hauptsächlich dient der Informationsaustausch dazu, dass andere Agenten die eigenen Handlungen berücksichtigen können und um Konflikte oder die Störung der eigenen Zielerfüllung zu vermeiden (sog. nicht-kooperative MAP). Aber auch bei einer teilweisen Überschneidung der Einzelziele (wie z.B. in Win-Win-Situationen) können Agenten in einer Koalition zusammenarbeiten, um das gemeinsame Teilziel zusammen zu erreichen (sog. koalitionäre MAP) (Jordán et al. 2019; Brafman et al. 2009; Dunne et al. 2010).

Eine harte Abgrenzung zwischen kooperativer MAP und MAP auf Verhandlungsbasis gestaltet sich in der Praxis jedoch häufig als schwierig. Ist eine effiziente Zusammenarbeit trotz unterschiedlicher Einzelziele bspw. im Eigeninteresse aller beteiligten Agenten, so treffen beide Ansätze gleichermaßen zu. In der Praxis lassen sich Probleme also nicht ganz einfach anhand dieser beiden Ansätze klassifizieren. Weerdt und Clement (2009) schlagen daher eine erweiterte Klassifizierung von MAP-Problemen anhand von drei unabhängigen Achsen vor, welche den jeweiligen Grad der Abhängigkeit, der Kooperation und der Kommunikation zwischen den Agenten angeben.

Der *Grad der gegenseitigen Abhängigkeit* der Agenten kann von Unabhängigkeit bis zu starker Abhängigkeit reichen. Liegt keine Abhängigkeit zwischen den Agenten vor, sind ihre Aktionen vollständig unabhängig voneinander. Entsprechend werden auch keine gemeinsamen Ressourcen genutzt. Bei einer starken Abhängigkeit hingegen werden die Aktionen eines Agenten von den Aktionen anderer Agenten intensiv beeinflusst. Dabei können Aufgaben ggf. nur gemeinsam durchgeführt werden oder die Agenten müssen sich Ressourcen teilen.

Der *Grad der Kooperation* zwischen den Agenten reicht von reinem Selbstinteresse bis zu starker Kooperation und spiegelt die Klassifikation von DesJardins et al. (1999) und Durfee (2001) wider. Selbstinteressierte Agenten streben ausschließlich die Erreichung ihres eigenen Ziels an. Hierbei findet trotzdem noch eine Interaktion zwischen den Agenten statt. Diese hat jedoch keinen kooperativen Charakter, sondern liegt ausschließlich im Eigeninteresse. Bei stark kooperierenden Agenten hingegen liegt die Erreichung der individuellen Ziele im gegenseitigen Interesse. Folglich können die Einzelziele als zentrales Gesamtziel der Agentengemeinschaft zusammengefasst werden.

Der *Grad der Kommunikation* zwischen den Agenten während der Plan-Ausführung kann von keiner bis durchgängige Kommunikation reichen. Dies hat insbesondere einen Einfluss darauf, wann und wie sich die Agenten koordinieren, wenn sie miteinander interagieren müssen. Ist während der Plan-Ausführung keine Kommunikation möglich, muss sämtliche Koordinierung im Vorfeld der Ausführung erfolgen. Auf Planänderungen anderer Agenten während der Ausführung kann folglich nicht reagiert werden. Liegt hingegen eine durchgängige Kommunikation vor, können die Agenten jederzeit während der Plan-Ausführung miteinander kommunizieren. Daher kann eine Koordinierung auch noch im Laufe der Ausführung erfolgen.

2.4.2. Koordinierung in Multi-Agenten Planung

Der Prozess zur Lösung eines dezentralisierten MAP-Problems gliedert sich in vier Phasen auf (Weerdts und Clement 2009). Allem voran steht dabei die *Zielzuweisung*, bei der die Agenten ihre jeweiligen Einzelziele erhalten. Sie kann zentralisiert gesteuert werden, d.h. die Verteilung erfolgt durch eine zentrale Instanz, z.B. auf Basis von Auktionen. Bei einer dezentralen Zielzuweisung suchen sich die Agenten ihre jeweiligen Ziele selbst, ggf. nachdem sie diese bilateral mit anderen Agenten verhandelt haben. Die Phase der *Planung* umfasst die individuelle Synthese von Handlungssequenzen zur Erreichung der jeweiligen Ziele, unter Berücksichtigung der gegebenen Ressourcen und zeitlichen Abhängigkeiten. Sie hängt zusammen mit der Phase der *Koordinierung*, bei der die relevanten geplanten Aufgaben mit den anderen Agenten kommuniziert werden, um die unterschiedlichen Handlungssequenzen zu synchronisieren und potenzielle Konflikte aufzulösen. Die *Durchführungs*-Phase schließt den Prozess mit der Ausführung der geplanten Aufgaben ab. Zwar unterliegen diese Phasen einer generellen logischen Abfolge, jedoch können sie z.T. auch miteinander kombiniert werden. In

der *Kontinuierlichen Planung* (DesJardins et al. 1999) findet bspw. eine Durchführung parallel zum Planungsprozess statt. Bedeutsamer ist jedoch, dass die Phasen der Planung und Koordinierung i.d.R. stark miteinander verkoppelt sind.

MAP-Probleme sind für gewöhnlich dadurch gekennzeichnet, dass kein Agent in der Lage ist das Gesamtproblem eigenständig und unabhängig von anderen Agenten zu lösen. Stattdessen herrschen Abhängigkeiten zwischen den Agenten, weil z.B. gemeinsame Anstrengungen erforderlich sind, um ein Ziel zu erreichen, oder weil sie sich Ressourcen teilen müssen. Während die Aktivitäten innerhalb eines zentralisierten Planungsprozesses direkt aufeinander abgestimmt werden können, ergibt sich in der verteilten Planung die Notwendigkeit einer separaten Synchronisation. Durch externe Kommunikation müssen sie ihre Aktivitäten untereinander harmonisieren, um auf organisierte Weise zusammenzuarbeiten und das Gesamtproblem lösen zu können (Torreño et al. 2017). Koordinierung ist somit der Prozess, durch den Agenten in der verteilten Planung ihre Fähigkeiten, Informationen und Ressourcen effektiv kombinieren können. Darunter fällt z.B. die Verteilung von Einzelzielen auf die Agenten, das Treffen gemeinsamer Entscheidungen sowie die Kombination der individuellen Einzel-Pläne der Agenten bei der Suche nach einem globalen Plan, der das MAP-Problem löst. Koordinierung zwischen kooperativen Agenten verfolgt das Ziel zur Bildung eines kompetenten Gesamtplans zur Erreichung des übergeordneten, agentenübergreifenden Ziels. Koordinierung zwischen nicht-kooperativen Agenten hat zum Ziel, Konflikte (z.B. Ressourcen-Konflikte) zu vermeiden, sodass die Agenten ihre individuellen Ziele erreichen können, ohne sich gegenseitig zu beeinträchtigen. Zwischen rivalisierenden Agenten gibt es keine Koordinierung, da diese nicht daran interessiert sind, dem gegnerischen Agenten bei der Zielerreichung behilflich zu sein.

Analog zum Planungsprozess von MAP-Problemen kann auch der Koordinierungsprozess zentral oder dezentral erfolgen. Ein zentralisierter Koordinierungsansatz sieht vor, dass sich Agenten nach der Detektion des Koordinierungsbedarfes an eine zentrale Koordinierungsstelle wenden, welche die Koordinierungsmaßnahmen ermittelt und an die Agenten zurückmeldet (analog z.B. zur Flugverkehrskontrolle im Luftverkehr). In einem dezentralen Ansatz verhandeln die betroffenen Agenten untereinander über die zu treffenden Koordinierungsmaßnahmen (analog z.B. zu Fußgängern in einer belebten Fußgängerzone).

Im Folgenden sollen zwei unterschiedliche Koordinierungsstrategien erörtert werden, in denen Koordinierungs- und Planungsprozess entweder getrennt voneinander erfolgen oder in direkter Wechselwirkung miteinander stehen.

2.4.2.1. Sequenzielle Planung und Koordinierung

Bei der *sequenziellen Planung und Koordinierung* (engl. sequential planning and coordination) werden der Planungs- und der Koordinierungsprozess als separate Aktivitäten aufgefasst und getrennt voneinander ausgeführt (siehe Abbildung 2-9). Dabei spielt der Zeitpunkt, wann sich die einzelnen Agenten koordinieren, eine wichtige Rolle.

Bei der *Prä-Koordinierung* erfolgt eine Koordinierung im Vorfeld des Planungsprozesses. Hierbei werden vorab Randbedingungen definiert, die bei der anschließenden Planung durch die einzelnen Agenten eingehalten werden müssen und die später dafür sorgen sollen, dass sich die lokalen Einzelpläne konfliktfrei zu einem konsistenten Gesamtplan kombinieren lassen. Dadurch wird eine nachträgliche Umplanung in der Plan-Zusammenführung vermieden und damit verbundener Rechen- und Zeitaufwand gespart. Solche Festlegungen können u.a. basierend auf sozialen Regeln oder Geboten getroffen werden (Shoham und Tennenholtz 1995). In einer Multi-Vehikel Routenplanung könnte z.B. die Rechts-vor-Links Regel eine Randbedingung darstellen, unter der klar geregelt ist, welches Vehikel gegenüber einem anderen Vorrang hat.

Bei einer *Post-Koordinierung* werden die Einzelpläne nach der Planungsphase aufeinander abgestimmt. Das Ziel ist hierbei, die lokal entwickelten Einzelpläne in einem separaten Prozess unter der Anwendung von Plan-Zusammenführungs-Techniken zu einem global gültigen Plan zu vereinen (sog. Plan-Merging). Hierbei sind ggf. Umplanungen der Einzelpläne erforderlich, um Konflikte oder Inkonsistenzen aufzulösen.

Bei der *iterativen Koordinierung* findet keine parallele Planungsphase für alle Agenten statt. Stattdessen erfolgen Plansynthese und Koordinierung inkrementell für die einzelnen Agenten. Der erste Agent kann, abgesehen von eventuellen Prä-Planungs-Randbedingungen, im Wesentlichen einen Plan ohne die Berücksichtigung von Randbedingungen anderer Agenten generieren. Jeder darauffolgende Agent erhält den lokalen Plan des vorhergehenden Agenten sowie sich daraus ergebende Randbedingungen, die er in seiner Plangenerierung berücksichtigen muss. Dadurch wird garantiert, dass ein lokaler Einzelplan immer kompatibel ist mit den vorher geplanten Aktivitäten ist. Infolgedessen wird durch die iterative Abfolge von Planungs- und Koordinierungsphasen sukzessive ein konsistenter Gesamtplan generiert.

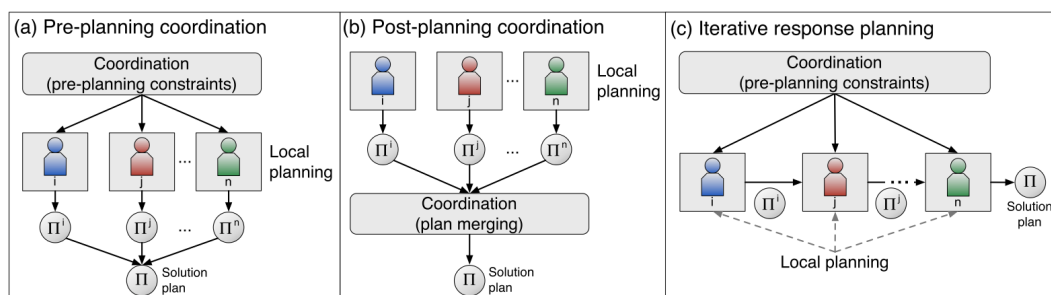


Abbildung 2-9 Arten Sequenzieller Planungs- und Koordinierung (Torreño et al. 2017)

Diese Formen der sequenziellen Planung und Koordinierung erfordern keine Kommunikation der Agenten während des Planungsprozesses und sind daher besonders geeignet für MAP-Probleme mit niedrigem Koordinationsaufwand. Muss ein komplexes Ziel erreicht werden, lässt sich der Koordinierungsbedarf i.d.R. schlecht vorher abschätzen. Entsprechend lassen sich auch Festlegungen zur Prä-Koordinierung schlecht im Vorhinein konkretisieren und müssen daher eher allgemein gehalten werden, anstatt auf die spezifischen Anforderungen der Koordinierung abgestimmt zu werden. Auch die Techniken zur Plan-Zusammenführung sind hauptsächlich darauf ausgelegt, Konflikte aufzulösen, anstatt kompetente Interaktion zwischen Agenten zu erzeugen.

2.4.2.2. Verschachtelte Planung und Koordinierung

Die *verschachtelte Planung und Koordinierung* (engl. interleaved planning and coordination) fasst beide Aktivitäten nicht mehr als separat auf, sondern bettet den Koordinierungsprozess inhärent in den Planungsprozess ein (siehe Abbildung 2-10). Währenddessen der Suchraum im Rahmen der Planung erkundet wird, findet ein stetiger Austausch von Ergebnissen dieser Erkundung im Rahmen der Koordination mit den anderen Agenten statt. Dementsprechend stehen die Agenten während der Planungsphase in kontinuierlichem Austausch, um eine gemeinsame Lösung zu finden, anstatt dass jeder Agent einen einzelnen lokalen Plan entwickelt. Die Agenten erkunden den Suchraum also gemeinsam, indem potenziell relevante Planungsfortschritte mit den anderen Agenten ausgetauscht werden. Es entsteht ein gesamtheitlicher Lösungsprozess, in welchem auch extern entwickelte Teilpläne weiter expandiert werden können, bis ein gemeinsamer Gesamtplan gefunden ist. Eine Koordinierung findet hierbei also kontinuierlich statt und ist als essenzieller Teil in den gesamten Planungsprozess integriert und kann nicht getrennt von diesem betrachtet werden. Koordinierungsbedürfnisse können somit bereits während des Planungsprozesses kommuniziert, berücksichtigt und in die Lösung integriert werden. Damit eignet sich dieser Ansatz für komplexe MAP-Probleme mit hohem Koordinationsaufwand. Damit einher geht zwar ein erhöhter Kommunikationsaufwand, aber auch die Fähigkeit, Koordinierungsmaßnahmen im Planungsprozess berücksichtigen zu können.

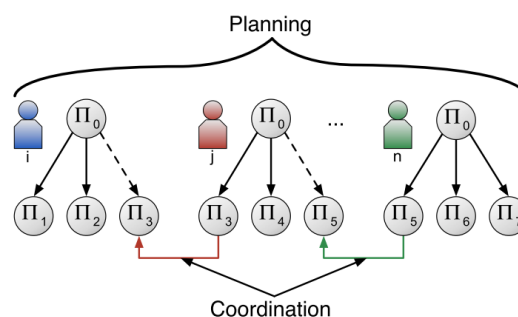


Abbildung 2-10 Verschachtelte Planung- und Koordinierung (Torreño et al. 2017)

2.4.3. Ressourcenverteilung in Multi-Agenten Planung

Neben der Abstimmung von Einzelaktivitäten umfasst die Koordinierung auch den Umgang mit begrenzten Ressourcen in Multi-Agenten Systemen. Dabei ist die *Ressourcen Allokation* definiert als der Prozess, eine Menge von Gütern (die Ressourcen) auf eine Anzahl an Agenten aufzuteilen (Chevaleyre et al. 2006). Da es sich hierbei einerseits um die Frage nach der Auf- bzw. Zuteilung von Ressourcen unter mehreren Agenten handelt und andererseits die einzelnen Agenten möglicherweise Einfluss auf diesen Verteilungsprozess nehmen können, spricht man auch von *Multi-Agenten Ressourcen Allokation*.

2.4.3.1. Arten von Ressourcen

Unter Ressourcen können dabei prinzipiell alle möglichen Arten von Gütern fallen, die zur Durchführung eines Plans eingesetzt werden müssen. Zur besseren Unterscheidung werden Ressourcen deshalb anhand ihrer Abzählbarkeit, Trennbarkeit, gemeinsamen Nutzbarkeit sowie ihrem zeitlichen Verfall differenziert (Chevaleyre et al. 2006).

Die *Abzählbarkeit* repräsentiert eine physikalische Eigenschaft und gibt an, ob eine Ressource kontinuierlich oder diskret ist. Diskrete Ressourcen, wie z.B. Äpfel oder Vehikel können abgezählt, also durch eine Menge mit einer bestimmten Anzahl gleichartiger Ressourcen ausgedrückt werden. Kontinuierliche Ressourcen, wie z.B. Wasser oder Zeit, lassen sich hingegen nicht abzählen, können i.d.R. jedoch diskretisiert werden, um eine Verteilung zu ermöglichen (z.B. Wasser in Liter, Zeit in Minuten, etc.).

Die *Trennbarkeit* einer Ressource gibt an, ob sie sich in kleinere Einheiten teilen lässt, die ggf. separat verteilt werden können. Während die Abzählbarkeit physikalisch vorgegeben ist, kann die Trennbarkeit durch die verteilende Instanz auf der Ebene des Zuteilungsprozesses vorgegeben werden. Beide Eigenschaften sind zwar sinnverwandt, können aber unabhängig voneinander festgelegt werden. So kann sowohl eine Menge diskreter Ressourcen als auch eine kontinuierliche Ressource trotz Diskretisierung als nicht trennbar behandelt werden (wenn z.B. eine gesamte Menge an Wasser als eine Einheit oder wenn Äpfel nur als Bündel mit fester Stückzahl verteilt werden soll). Andererseits kann auch eine einzelne diskrete Ressource ggf. immer noch aufteilbar sein (z.B. lässt sich ein Apfel in mehrere Stücke zerteilen, die dann individuell verteilt werden können).

Eine Ressource wird als *gemeinsam nutzbar* bezeichnet, wenn sie von mehreren Nutzern zur gleichen Zeit verwendet werden kann. Bspw. kann ein Satellitenbild gleichzeitig von mehreren Bedarfsträgern zur Informationsgewinnung für individuelle Planungsprozess begutachtet werden. Ein Werkzeug (wie z.B. ein Hammer) kann zu einem Zeitpunkt hingegen immer nur von einem Nutzer verwendet werden.

Ressourcen können außerdem einem *zeitlichen Verfall* unterliegen. Dieser gibt an, ob sich der Zustand und damit der Wert einer Ressource mit der Zeit verändert. Eine Ressource wird dabei als statisch bezeichnet, wenn ihre Eigenschaften wie z.B. ihr Umfang oder Wert über die gesamte Zeit konstant bleiben. Verbrauchsmittel (z.B. Treibstoff) oder Ressourcen, die über die Zeit an Wert verlieren (z.B. verderbliche Waren oder Abnutzungsgegenstände) sind demnach als nicht statisch anzusehen.

2.4.3.2. Organisation des Allokationsprozesses

Als Teil des Koordinierungsprozesses in Multi-Agenten Systemen kann auch die Ressourcenallokation zentralisiert oder dezentralisiert organisiert werden (Chevaleyre et al. 2006).

In einem zentralisierten Ansatz findet der Allokationsprozess und damit die Entscheidung über die Verteilung der Ressourcen über die Agenten durch eine zentrale Instanz statt. Dies geschieht i.d.R. nachdem die beteiligten Agenten die Möglichkeit hatten, ihre jeweiligen Präferenzen über die Zuteilung (z.B. als Nutzwert in Form von Gewinn oder Kosten) zu kommunizieren. Diese Präferenzen fließen dann in den Entscheidungsprozess ein, auf dessen Basis die finale Verteilung durch die zentrale Instanz entschieden wird. Ein typisches Beispiel für diese Form der Zuteilung sind Auktionen. In multilateralen Auktionen können mehrere Anbieter und mehrere Interessenten miteinander verhandeln. Bei einseitigen Auktionen verhandelt ein Anbieter mit mehreren Interessenten („one-to-many“) oder mehrere Anbieter mit einem Interessenten („many-to-one“) (Blumrosen und Nisan 2007). Dabei können entweder eine (in sog. einrundigen Auktionen) oder mehrere (in sog. progressiven Auktionen) Verhandlungsrunden durchlaufen werden, in denen die Teilnehmer ihre Präferenzen in Form von Geboten auf eine Ressource übermitteln können. Unter Berücksichtigung dieser Gebote wird die Entscheidung dann durch den Auktionator getroffen. Auktionen können dabei sowohl verdeckt (Gebote sind nur dem Auktionator sichtbar) als auch offen sein (alle Teilnehmer können die Gebote der anderen einsehen). Beispiele für einrundige, verdeckte Auktionsformen sind u.a. die Holländische Auktion oder die Vickrey-Clarke-Groves Auktion (Hartline und Karlin 2007). Offene, progressive Auktionen sind z.B. die Englische Auktion oder Auktionen mit iterativer Preisfestsetzung (Araúzo et al. 2018; Song et al. 2016), bei denen sich der Preis für die Ressource entsprechend der Nachfrage während des Versteigerungsprozesses dynamisch ändern kann.

Dezentrale Allokationsformen werden verwendet, wenn die Ressourcen in einem Multi-Agenten System verteilt vorliegen und nicht durch eine einzelne Instanz verteilt werden können. In diesem Fall wird der Allokationsprozess nicht zentral gesteuert, sondern ergibt sich als Resultat einer Reihe von lokalen Verhandlungsschritten zwischen den Agenten untereinander. Insbesondere für multilaterale Ressourcen-Verhandlungen, in denen mehrere

Anbieter und mehrere Interessenten teilnehmen, bieten sich dezentrale Mechanismen wie z.B. das *Contract Net Protocol* (Smith 1980) an. Zentralisierte Ansätze können hier an ihre Grenzen stoßen, da die Verteilungsmöglichkeiten mit steigender Anzahl an Verhandlungsteilnehmern exponentiell anwachsen.

2.4.3.3. Präferenzformulierung

In der Gebotsphase des Allokationsprozesses muss ein Agent übermitteln können, ob bzw. wie sehr eine Ressourcenverteilung gegenüber einer anderen bevorzugt wird. Chevaleyre et al. (2006) schlagen dazu folgende Arten der Präferenzformulierung vor:

Über *ordinale Präferenzen* werden jeweils zwei Verteilungen gegenübergestellt: z.B. „*Verteilung A wäre besser/schlechter/gleich gut wie Verteilung B*“. Da darin jedoch keine Intensität der Bevorzugung formuliert ist, kann damit weder ein Agenten-Interner noch ein Agenten-Übergreifender Vergleich zwischen unterschiedlichen Präferenzen erfolgen.

Qualitative Präferenzen erlauben es, die Präferenzen für Verteilungen nicht nur für einzelne Agenten, sondern auch zwischen verschiedenen Agenten zu vergleichen. Dazu zählen bspw. binäre Präferenzformulierungen mittels Aufteilung in Sets von guten und schlechten Verteilungen: z.B. „*Verteilung A ist gut. Verteilung B ist schlecht.*“. Über einen Fuzzy-Ansatz (Zadeh 1965) kann dabei auch an die ordinale Formulierung angeknüpft werden. Dabei wird, normiert auf einer Skala zwischen 0 und 1 ausgedrückt, wie sehr die eine Verteilung gegenüber der anderen bevorzugt wird. Dabei entspricht 1 einer absoluten Bevorzugung und 0,5 der Gleichheit zweier Verteilungen. Im Gegensatz zur ordinalen Formulierung ergibt sich durch diese Abstufung eine schwache Form von Intensität, die es zwar ermöglicht, eine Rangfolge zwischen mehreren Präferenzen aufzustellen, jedoch keine metrische Nutzung (wie z.B. die Berechnung eines Durchschnitts) erlaubt.

Um eine metrische Nutzung zu ermöglichen, werden *quantitative Präferenzen* benötigt. Sie können z.B. kardinal numerisch formuliert werden, indem jeder potenziellen Verteilung ein spezifischer Nutzwert zugewiesen wird: z.B. „*Verteilung A liefert Nutzwert von 10. Verteilung B liefert Nutzwert von 4.*“. Darüber kann schließlich ein Qualitätsmaß zur agenten-übergreifenden Bewertung der Gesamtverteilung (z.B. über einen Gesamt-Nutzwert) ermittelt werden.

2.4.3.4. Zielsetzung

Sowohl über einen zentralisierten als auch einen dezentralisierten Mechanismus ist der primäre Zweck der Ressourcenverteilung, die Durchführbarkeit aller Einzelpläne zu gewährleisten (Chevaleyre et al. 2006). Die Aufgabe ist demzufolge die Ermittlung einer Verteilung, die das

Zielsystem (ggf. bestehend aus mehreren Zielen), zunächst ungeachtet ihrer Effizienz, erfüllt. Darüber hinaus kann die Verteilung noch möglichst sinnvoll gestaltet werden, sodass sie einen höchstmöglichen Nutzen (Optimalität) erzielt. Die zu optimierende Metrik kann einerseits auf die zentrale Entität bezogen sein, die die Verteilung auswählt. Damit würde eine Ressourcen-Aufteilung favorisiert, die z.B. den dadurch erzielten Gesamtgewinn für den Verteiler maximiert. Andererseits kann die Optimalität auch hinsichtlich einer Zusammensetzung der Präferenzen der einzelnen Bedarfsträger im System bezogen werden. Entsprechend kann dann auch eine Verteilung als optimal gelten, die den erzielten Nutzen für alle Ressourcenempfänger maximiert. Solch eine Metrik kann z.B. anhand einer kollektiven Nutzwertfunktion das sog. *Allgemeinwohl* (engl. social welfare) über die beteiligten Bedarfsträger favorisieren. Kombinationen sind ebenfalls möglich, wenn eine Verteilung z.B. sowohl einen möglichst hohen Gewinn für den Ressourcen-Verteiler als auch einen möglichst hohen Durchschnittsnutzen für alle Ressourcenempfänger erzielt. Dabei schließt die Optimalität aber nicht automatisch eine Durchführbarkeit ein. D.h. es kann Verteilungen geben, die zwar eine gewählte Metrik maximieren würden, unter denen jedoch das Zielsystem nicht erreicht werden kann.

Sollen Ressourcen unter einer Gemeinschaft von Agenten verteilt werden, ermöglicht die Definition einer kollektiven Nutzwertfunktion, dass eine Verteilung nicht nur im Sinne der einzelnen Agenten, sondern im Sinne der Agentengemeinschaft erfolgt. Auch hierbei können unterschiedliche Ansätze verfolgt werden (Ramezani und Endriss 2010).

Bei einem *elitären* Ansatz ermittelt sich das Allgemeinwohl aus dem Nutzwert desjenigen Agenten, der den höchsten Nutzwert erzielt. Eine Maximierung dieses Wertes strebt demnach an, einem einzelnen Agenten einen möglichst hohen Nutzen zu verschaffen, unabhängig davon wie der Nutzen für die restlichen Agenten ausfällt. Dieser Ansatz ist damit keinesfalls fair, bietet sich aber z.B. an, wenn eine Agentengemeinschaft den Auftrag hat, ein bestimmtes Ziel zu erreichen, wobei es ausreicht, dass das Ziel durch einen einzelnen Agenten erfüllt wird.

Ein *egalitärer* Ansatz definiert sich dagegen durch den niedrigsten Nutzwert über alle Agenten. Eine Maximierung dieses Wertes erzielt, dass der Minimalnutzen für jeden Agenten möglichst hoch ausfällt. Dieser Ansatz fördert damit die Fairness der Ressourcenverteilung über die Agentengemeinschaft.

Beim *utilitären* Ansatz wird eine Maximierung des Gesamtnutzens angestrebt, welcher als Summe der einzelnen Nutzwerte über alle Agenten definiert ist.

Ähnlich dazu ist das *Nash-Produkt* als das Produkt aus allen einzelnen Nutzwerten definiert. Analog zum utilitären Ansatz wird hierbei auch ein maximaler Gesamtnutzen angestrebt. Zusätzlich werden jedoch Verteilungen bevorzugt, in denen keine starken Unterschiede in den Nutzwerten der einzelnen Agenten vorherrschen. Der Ansatz ist in dieser Form nur anwendbar, wenn alle Nutzwerte auf das gleiche Vorzeichen normiert sind. Es können also nicht Vorteil

und Nachteil aus einer Verteilung gleichzeitig berücksichtigt werden. Im Unterschied zum utilitären Ansatz ist dieser außerdem anfällig gegenüber Verteilungen, bei denen ein Agent gar keinen Nutzen erzielt.

Unabhängig vom gewählten Ansatz besitzt die kollektive Nutzwertfunktion die Eigenschaft, dass eine Neuskalierung der Nutzwerte (bzw. der Kosten) aller Agenten mit dem gleichen Faktor keinen Einfluss auf die resultierende Verteilung hat. Eine Besonderheit des Nash-Produkts ist, dass auch individuelle Neu-Skalierungen der Nutzwerte eines einzelnen Agenten die Verteilung nicht beeinflusst. Dies ist besonders hilfreich, wenn keine allgemeingültige Skalierung zum Ausdrücken ihrer Präferenzen unter den Agenten existiert. Weiterhin verhindert es, dass ein einzelner Agent bloß durch Änderung der eigenen Skalierung die resultierende Verteilung beeinflussen kann.

2.5. Planungsunterstützung

Während sich die vorangegangenen Abschnitte mit den technischen Grundlagen zur maschinellen Planung beschäftigt haben, ist dieser Abschnitt von der Möglichkeit ihres Einsatzes motiviert, um einen Menschen bei der Planung zu unterstützen. Dazu ist es notwendig, die Interaktion zwischen dem Menschen und dem Agenten sowie ihre kognitions-ergonomischen Auswirkungen zu betrachten.

2.5.1. Planungsautomation

Unter Automation versteht man den Einsatz eines maschinellen Agenten (i.d.R. ein Computer), zur Ausführung von Aufgaben, die bisher alleinig von einem Menschen durchgeführt wurden (Parasuraman und Riley 1997). Für Aufgaben, in denen eine komplette Automatisierung nicht möglich, nicht sinnvoll oder nicht gewollt ist, kann Automation stattdessen auch eingesetzt werden, um einen Menschen bei dieser Arbeit zu unterstützen. Dabei werden nur bestimmte Teilaufgaben automatisiert, um dadurch die übergeordnete Aufgabe zu vereinfachen, den Komfort zu steigern oder die Sicherheit gegenüber menschlichen Fehlern zu erhöhen (Kantowitz und Casper 1988; Hou et al. 2014).

Um zu kategorisieren, wie viel Arbeit eine Automation übernehmen soll, haben Sheridan und Verplank (1978) mehrere *Automationslevel* (engl. Levels of Automation – LOA) definiert:

- 1) Die Automation leistet keine Unterstützung: Der Mensch muss alle Entscheidungen und Handlungen selbst vornehmen.
- 2) Die Automation bietet einen kompletten Satz von Entscheidungs- und Handlungsalternativen an, oder
- 3) schränkt die Auswahl auf einige wenige ein, oder

- 4) schlägt eine einzige Alternative vor;
- 5) führt diesen Vorschlag aus, wenn der Mensch damit einverstanden ist, oder
- 6) lässt dem Menschen eine begrenzte Zeit, um sein Veto einzulegen, bevor dieser automatisch ausgeführt wird, oder
- 7) führt ihn automatisch aus und informiert dann zwingenderweise den Menschen, oder
- 8) informiert den Menschen nur auf Nachfrage, oder
- 9) informiert den Menschen nur, wenn sich die Automation dazu entschließt.
- 10) Die Automation entscheidet alles und handelt autonom, ohne Rücksicht auf den Menschen.

Ähnliche Skalen, insbesondere in Bezug auf Automation zur Unterstützung von Piloten in Luftfahrzeugen wurden durch Billings (1991) sowie Endsley (1987) definiert. Sie lassen sich im Wesentlichen folgendermaßen kategorisieren:

- a) Manuelle Kontrolle: Der Mensch erhält keine Unterstützung;
- b) Informative Entscheidungsunterstützung: Die Automation gibt Empfehlungen ab, die der Mensch umsetzen kann, wenn er sich dafür entscheidet;
- c) Zustimmungspflichtige Automation: Die Automation gibt Empfehlungen ab, die automatisch umgesetzt werden, wenn der Pilot zustimmt;
- d) Einspruchspflichtige Automation: Die Automation gibt Empfehlungen ab, die automatisch umgesetzt werden, wenn der Mensch kein Veto einlegt; oder
- e) Vollautomation: Die Automation handelt automatisch, ohne dass der Mensch eingreifen kann.

Unter den meisten Voraussetzungen sind die Extrema der Manuellen Kontrolle oder der Vollautomation nicht das richtige Mittel der Wahl (Endsley und Kiris 1995; Endsley 1987). Vielmehr bietet sich häufig ein mittleres Level der Unterstützung an, welches je nach Anwendungsfall im Detail kalibriert werden muss.

Eine Planungsautomation hat die Aufgabe, den Menschen bei der Planung zu unterstützen, und kann dabei auf folgenden Ebenen beitragen (Schmitt 2021):

- initialer Aufbau bzw. Erweiterung eines Plans (Vorwärtsplanung),
- Anpassung des bisherigen Plans, weil sich äußere Randbedingungen geändert haben (Umplanung),
- Anpassung des bisherigen Plans, weil ein besserer Plan gefunden wurde (Optimierung).

Der Umfang der Unterstützung kann dabei vom Vorschlag einzelner Aktionen, über den Vorschlag von Teilplänen (Aktionsfolgen zur Erreichung von Zwischenzielen) bis hin zum Vorschlag eines vollumfänglichen Plans (Aktionsfolge, unter der das Ziel erreicht wird) reichen.

2.5.2. Kognitions-Ergonomischer Einfluss von Automation

Zweck des Einsatzes von Automation ist die Übertragung von Aufgaben vom Menschen an eine Maschine, um die Menge an Aufgaben bzw. die Aufgabenkomplexität (auch Arbeitsbelastung) und daraus folgend die kognitiven Anstrengungen des Menschen, diese Aufgaben zu bewältigen (auch mentale Beanspruchung), zu senken. Dabei hängt die Arbeitsbelastung ausschließlich vom Typ und Umfang der zu erledigenden Aufgaben ab und kann durch eine Aufgabenanalyse objektiv von außen bewertet werden. Demgegenüber ist die mentale Beanspruchung ein Resultat der internen, mentalen Arbeitsabläufe der bearbeitenden Personen und kann schlecht von außen eindeutig bemessen werden. Sie entsteht als Folge der Arbeitsbelastung und hängt stark von den Fähigkeiten, der Verfassung und der Erfahrung der bearbeitenden Person ab. Bei gleichem Umfang an Aufgaben, d.h. bei gleicher Arbeitsbelastung, wird ein Novize z.B. deutlich eher an seine mentalen Leistungs-Grenzen stoßen als ein erfahrener Experte.

Der Einsatz von Automation trägt demnach dazu bei, dass diese Grenze später erreicht wird und dass entweder das Aufgabenspektrum oder die Aufgabenkomplexität erhöht werden können. Automation kann in diesem Zusammenhang jedoch auch zu unerwünschten Einflüssen auf andere kognitions-ergonomische Faktoren führen. Unter dem Begriff *Human Factors* werden Probleme erforscht, die als Folge übermäßiger Automation auftreten können. Darunter fallen bspw. Bequemlichkeit (engl. Complacency), Misstrauen, eine starke Abhängigkeit von der Automation, Verlust von Wissen und Fertigkeiten sowie ein vermindertes Situationsbewusstsein (Parasuraman et al. 2007; Sarter et al. 1997; Wiener und Nagel 1988; Sheridan 2002).

Das Situationsbewusstsein gliedert sich nach Endsley (1995) in drei Ebenen: die *Wahrnehmung* von Elementen der Umwelt im Raum-Zeit Gefüge, das *Verständnis* über ihre Bedeutung und die *Projektion* ihres Zustands in die nahe Zukunft. Zwar betrachten die einzelnen Ebenen voneinander getrennte Aspekte des Bewusstseins über die Situation, bauen dabei aber aufeinander auf. Demnach kann Situationsbewusstsein in einer höheren Ebene nur dann erlangt werden, wenn bereits ausreichend Situationsbewusstsein auf der darunterliegenden Ebene vorhanden ist. Die erste Ebene des Situationsbewusstseins umfasst die *Wahrnehmung* der Situation, also die Kenntnisnahme des Zustands, der Eigenschaften und des dynamischen Verhaltens relevanter Umweltelemente. Auf dieser Ebene aufbauend, geht das *Verständnis* weit über die bloße Kenntnis der Umweltelemente hinaus. Sie umfasst das Erkennen der Beziehungen zwischen den wahrgenommenen Elementen und das Ableiten von Auswirkungen als Folge dieser Abhängigkeiten. Erst durch das Knüpfen dieser Zusammenhänge kann den Elementen ihre jeweilige Bedeutung im Hinblick auf die eigenen Ziele zugeordnet werden. Die dritte und höchste Ebene des Situationsbewusstseins betrifft die Fähigkeit, auf die zukünftige Situation schließen zu können, indem Auswirkungen auf die Zustände der Umweltelemente

projiziert werden. Dies erfordert Kenntnis über die Situation einerseits, aber auch das notwendige Verständnis über die Verknüpfungen und Abhängigkeiten innerhalb der Situation andererseits. Entsprechend muss das Situationsbewusstsein auf beiden dieser Ebenen ausgeprägt sein. Erst das Situationsbewusstsein auf der Projektions-Ebene ermöglicht es, die Situation systematisch auf die eigene Zielerreichung hin zu lenken.

Da die relevanten Umweltelemente zur Bemessung des Situationsbewusstseins extrem kontextabhängig sind, ist es nicht möglich, diese einheitlich festzulegen. Stattdessen müssen die Faktoren durch Analyse des betrachteten Systems und dessen Umwelt individuell bestimmt werden. Endsley (1995) führt in Bezug auf einen Luftkampf z.B. folgende Elemente an:

- Ebene 1: Position von Bedrohungen und Hindernissen; Standort, Höhe und Kurs des eigenen und der anderen Flugzeuge; aktuelles Ziel
- Ebene 2: Missionsfortschritt; Auswirkungen von Systembeeinträchtigungen; taktischer Zustand anderer Flugzeuge
- Ebene 3: voraussichtliche Taktik und Manöver anderer Flugzeuge; Position und Zeitpunkt der erwarteten Feuereröffnung

2.5.3. Planung im Arbeitsprozess

Jede Form von Arbeit kann schematisch als dynamischer Prozess, dem sog. *Arbeitsprozess* beschrieben werden. Der Zweck, den ein solcher Arbeitsprozess verfolgt, wird als Arbeitsziel bezeichnet, und kann entweder als Anweisung von extern vorgegeben oder selbst gewählt sein. Abbildung 2-11 zeigt den allgemeinen Arbeitsprozess nach Onken und Schulte (2010). Er wird beeinflusst durch Interaktionen mit der Umwelt, wie z.B. mit der physischen Umgebung oder in Form von Informationen, die auf den Arbeitsvorgang (respektive den Arbeitsprozess) einwirken (z.B., weil sie einen Einfluss auf die Erreichung des Arbeitsziels haben). Die Arbeit bewirkt stets ein Resultat, i.d.R. die Veränderung des Zustands eines Objekts.

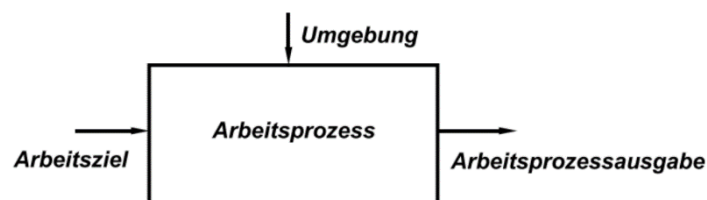


Abbildung 2-11 Arbeitsprozess nach Onken und Schulte (2010)

Das sog. *Arbeitssystem* repräsentiert die Instanziierung der Elemente innerhalb des Arbeitsprozesses, die auf die Erreichung des Ziels hinwirken (z.B., weil sie das Arbeitsziel verfolgen oder die zu ihrer Erreichung durchzuführende Arbeit verrichten). Dabei wird das Ziel verfolgt, ein bestimmtes Arbeitsobjekt von einem Ausgangszustand in einen Zielzustand (End-Produkt) zu überführen, d.h. eine Änderung daran zu verrichten. Sowohl das Arbeitsobjekt als

auch die angestrebte Änderung daran sind durch das Arbeitsziel definiert. Entsprechend bildet das Arbeitsobjekt einen Bestandteil des Arbeitssystems.

Die Elemente des Arbeitssystems sind in Abbildung 2-12 visualisiert und können in operierende Kräfte (sog. Arbeiter) und Arbeitsmittel (sog. Werkzeuge) unterteilt werden. Unter einem *Arbeiter* versteht man einen Entscheidungsträger, der den Arbeitsprozess überwacht und bestimmt, welche Werkzeuge wann und wie eingesetzt werden. Ein Arbeiter ist damit die höchste autoritäre Instanz innerhalb des Arbeitssystems, kennt das gesamte Arbeitsziel und besitzt das notwendige Wissen, um es zu verstehen und verfolgen zu können. Die Fähigkeit eines Arbeiters, das Arbeitsziel selbst zu definieren oder zu verändern, macht das Arbeitssystem zu einem autonomen System. *Arbeitsmittel* hingegen sind Hilfsmittel, die vom Arbeiter eingesetzt werden können, um das Arbeitsziel zu erreichen. Darunter fallen nicht-angetriebene Arbeitsmittel (z.B. eine Karte zur Navigation) und angetriebene Maschinen, die auf eine Stromzufuhr angewiesen sind. Hierzu zählen wiederum simple motorisierte Geräte (z.B. eine Bohrmaschine oder ein Auto) aber auch komplexere technische Systeme, die automatisierte Funktionen bereitstellen (z.B. ein ABS-System, ein Tempomat oder ein Navigationssystem).

Die Elemente des Arbeitssystems, die miteinander interagieren können, sind durch Beziehungen miteinander verknüpft. Dabei kennzeichnen hierarchische Beziehungen ein *Delegationsverhältnis* (in Abbildung 2-12 dargestellt durch den grünen Pfeil), wie es generell zwischen Arbeitern und ihren Arbeitsmitteln vorherrscht. Dieses Verhältnis verdeutlicht, dass ein Arbeiter stets in der Lage ist, delegierend auf ein Arbeitsmittel zuzugreifen, d.h. es unterstützt den Arbeiter auf dessen Veranlassung. Eine heterarchische Beziehung hingegen kennzeichnet ein *kooperatives Verhältnis* und kann nur zwischen Arbeitern vorherrschen, die gemeinsam an der Erreichung des Arbeitsziels arbeiten. Hierbei erfolgt die gegenseitige Unterstützung nicht als Folge einer Delegation, sondern z.B. eigeninitiativ durch eine der Parteien.

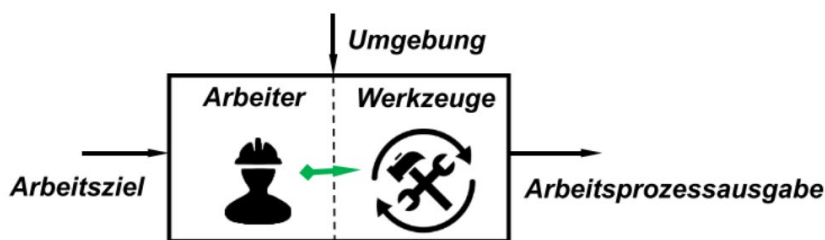


Abbildung 2-12 Arbeitssystem (Schulte et al. 2016)

Um als Mensch-Maschine System deklariert zu werden, muss ein Arbeitssystem mindestens einen menschlichen Arbeiter und ein angetriebenes Arbeitsmittel enthalten. Per Definition werden Menschen stets den Arbeitern und nie den Arbeitsmitteln zugeordnet, da sie andernfalls zu Mitteln der reinen Zweckerfüllung ohne Möglichkeit des selbstbestimmten Handelns degradiert werden. Innerhalb desselben Arbeitssystems können auch mehrere Personen als Arbeiter zusammenwirken und in Form eines Teams gemeinsam das Arbeitsziel verfolgen.

Jedoch müssen nicht alle Arbeiter zwangsläufig menschlich sein. Mit den Fortschritten im Bereich der künstlichen Intelligenz und den wachsenden Entwicklungen in der kognitiven Automation treten auch zunehmend Teams aus Menschen und Agenten in den Fokus. Dabei werden Konstellationen betrachtet, in denen ein Mensch durch ein künstliches Teammitglied in der Verfolgung des Arbeitsziels unterstützt wird. Dieses kann dabei sowohl in einem hierarchisch untergeordneten als auch in einem kooperativen Verhältnis zum Menschen stehen. Im Gegensatz zu einem menschlichen Arbeiter wird aus ethischen und pragmatischen Gründen dabei jedoch eingeschränkt, dass das Arbeitsziel nicht durch das künstliche Teammitglied verändert oder selbst gewählt werden kann. Um zu gewährleisten, dass ein autonomes System stets im Sinne eines durch einen Menschen vorgegebenen Interesses handelt, wird somit gefordert, dass mindestens ein Mensch als Arbeiter im Arbeitssystem enthalten ist.

Der Planungsprozess stellt einen Teil zur Bewältigung des Arbeitsprozesses dar, anhand dessen die zur Erreichung des Arbeitsziels notwendigen Handlungen (unter Zuhilfenahme der entsprechenden Werkzeuge) identifiziert und geordnet werden. Dies entspricht i.d.R. der Entwicklung einer Handlungssequenz, durch die das Arbeitsobjekt von seinem Ausgangszustand in den Zielzustand überführt wird. Dabei sind u.U. die Umwelteinflüsse, die auf diesen Prozess einwirken zu berücksichtigen, da diese Randbedingungen darstellen können, welche im Planungsprozess berücksichtigt werden müssen (wie Umgebungsbedingungen, andere Arbeitsprozesse, etc.). Änderungen des Arbeitsziels oder der Umgebungsbedingungen können im Laufe des Arbeitsprozesses zur Neu- oder Umplanung führen. Der planende Mensch ist hierbei als Arbeiter im Arbeitssystem klassifiziert, welchem optionaler Weise Hilfsmittel zur Verfügung stehen, um den Planungsprozess durchzuführen. Ein Planungs-Tool, welches ausschließlich bei der Erfüllung spezifischer Teilaufgaben behilflich ist (z.B. zur Pfadplanung) wird dabei den Werkzeugen zugeordnet, da es das übergeordnete Arbeitsziel nicht kennt. Ein Planungsagent hingegen, der Kenntnis über das Arbeitsziel besitzt und kooperativ zur Planung beiträgt (dargestellt durch die blaue Verbindung in Abbildung 2-13) kann entsprechend den Arbeitern zugeordnet werden. Dabei kann ein Planungsagent ggf. selbst auf Planungs-Tools zugreifen. Unter dem Konzept der *Dual-Mode Cognitive Automation* schlagen Onken und Schulte (2010) den hybriden Einsatz von kognitiver Automation sowohl per Delegation als auch durch kooperative Aufgabenunterstützung vor.

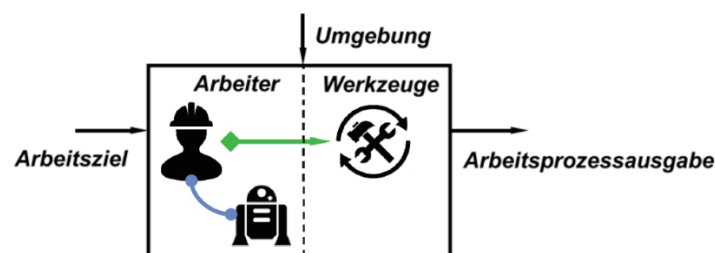


Abbildung 2-13 Arbeitssystem mit (Planungs-)Agent in heterarchischer Beziehung nach (Schulte et al. 2016)

2.5.4. Assistenz

Das partnerschaftliche Zusammenwirken von Menschen und Agenten wird unter dem Forschungsfeld des *Human-Agent Teaming* (HAT) untersucht. Für den erfolgreichen Einsatz sollten Mensch und Agent derart zusammenwirken, dass sie ihre jeweiligen Stärken kombinieren und ihre Schwächen gegenseitig kompensieren können (Dekker und Woods 2002). Für komplexe Multitasking-Aufgaben ergibt sich daraus die Möglichkeit, die Aufgabenverteilung unter Berücksichtigung der individuellen Stärken zu gestalten und Aufgaben primär demjenigen Teammitglied zuzuordnen, welches jeweils besser dafür geeignet ist. Fitts (1951) hat diesbezüglich Stärken und Schwächen sowohl von Menschen als auch von Maschinen identifiziert. Die daraus abgeleitete *MABA-MABA* Klassifizierung („Men-Are-Better-At/Machines-Are-Better-At“) gibt Aufschluss darüber, welche Aufgabentypen besser für Agenten und welche besser für Menschen geeignet sind. Aufgrund ihrer Fähigkeiten zur algorithmischen Berechnung bieten sich Agenten typischerweise zur Erfüllung spezifischer Funktionen, wie z.B. Berechnungen oder Optimierungen an. Dem Menschen obliegen hingegen i.d.R. die höheren kognitiven Aufgaben, wie das Problemlösen, die Entscheidungsfindung oder die Planung. Die Fortschritte im Bereich der künstlichen Intelligenz erlauben jedoch auch zunehmend die Ausführung kognitiver Aufgaben durch intelligente Agenten. Dennoch wird es stets Aufgaben geben, die weiterhin unter menschlicher Verantwortung verbleiben, sei es aufgrund der Fähigkeit Absichten, Implikationen oder Verhaltensmuster anderer zu erkennen und zu verstehen, oder aus ethischen Gründen. Entsprechender Weise wird der Mensch gegenüber dem Agenten innerhalb eines Teams immer eine übergeordnete Rolle einnehmen. Diesem Paradigma folgend, sind dem Menschen und dem Agenten bei der gemeinschaftlichen Erfüllung einer komplexen Aufgabe unterschiedliche Rollen zugewiesen. Im Sinne eines partnerschaftlichen Ansatzes soll diese Rollenverteilung jedoch der Anpassung an die Lage unterliegen. Entsprechend können Aufgaben, die normalerweise dem menschlichen Teammitglied zufallen würden, in bestimmten Situationen (wie z.B. zur präventiven Senkung der Arbeitslast oder in Notfällen) an einen kognitiven Agenten übertragen werden.

Hierfür wird durch Onken und Schulte (2010) das Konzept der adaptiven Mensch-Maschine-Kooperation durch Nutzerbeobachtung vorgeschlagen. Dabei beobachtet der kognitive Agent kontinuierlich die vorliegende Situation sowie den Zustand des menschlichen Nutzers, um im Bedarfsfall unterstützend einzugreifen. Zur Auslegung von Systemen, die diese Form der Assistenz leisten, (sog. Assistenzsysteme) haben die Autoren mehrere Grundforderungen definiert. Sie verfolgen aus system-ergonomischer Sicht zwei Ziele. Zum einen, dass die Arbeitslast des Menschen auf einem moderaten Level gehalten wird und zum anderen, dass das Systemdesign zur Aufrechterhaltung des Situationsbewusstseins beiträgt.

Allem voran steht dabei der Grundsatz, dass dem Menschen die entsprechenden Arbeitsmittel bereitgestellt werden sollen, die geeignet und ausreichend sind, um das Arbeitsziel erfüllen zu

können. Entsprechend muss das Arbeitssystem derart gestaltet sein, dass der menschliche Operateur in regulären Arbeitssituationen nicht überfordert wird. Außerhalb solcher Situationen soll das Assistenzsystem anhand der folgenden Grundforderungen intervenieren:

1. Aufmerksamkeitslenkung
2. Aufgabenvereinfachung
3. Aufgabenübernahme

Im Rahmen der *Aufmerksamkeitslenkung* verfolgt das System eigeninitiativ, dass die Aufmerksamkeit des menschlichen Teammitglieds mit Priorität auf die aus objektiver Sicht dringendste Aufgabe gerichtet ist. Dazu muss das Assistenzsystem in der Lage sein, die derzeitige Arbeitssituation aus der eigenen Perspektive darzustellen und im Bedarfsfall informativ auf Missstände hinzuweisen. Identifiziert das Assistenzsystem mit Sicherheit, dass der Mensch die objektiv dringendste Aufgabe aufgrund einer Überforderung nicht erfüllen kann, soll es eigeninitiativ über die *Aufgabenvereinfachung* die Situation derart simplifizieren, dass sie durch den Operateur bewältigt werden kann. Erst wenn die dringendste kognitive Aufgabe nicht durch den Operateur durchgeführt werden kann, dies eine zu große Gefahr darstellt oder zu hohe Kosten verursachen würde, soll das System diese Aufgabe im Rahmen der *Aufgabenübernahme* selbstständig ausführen, um größeren Schaden abzuwenden.

3. Konzept

Dieses Kapitel leitet die Forschungsfrage ein und führt eine Arbeitsprozessanalyse durch. Anschließend folgt das Arbeitssystemdesign, das als Grundlage für das Konzept dient. Das Konzept befasst sich maßgeblich damit, wie mehreren Nutzern ein koordinierter Zugriff auf gemeinsame Ressourcen ermöglicht werden kann. Zum besseren Verständnis fokussiert sich ihre Beschreibung dabei hauptsächlich auf die Konstellation aus zwei Nutzern und einer einzelnen Ressource. Es ist jedoch darauf ausgelegt, dass es auf komplexere Konstellationen mit mehreren Ressourcen und Nutzern ausgeweitet werden kann. Darauf aufbauend, wird ein Planungsagent konzeptioniert, der die Koordinierung des nutzerübergreifenden Ressourceneinsatzes unterstützen soll.

3.1. Forschungsgegenstand

Die verallgemeinerte Forschungsfragestellung, die im Rahmen dieser Arbeit untersucht werden soll, lautet:

Wie kann eine Planung für mehrere verteilte Nutzer in einem Verbund mit limitierten gemeinsam genutzten Hochwert-Systemressourcen (im speziellen mit Unbemannten Systemen) ermöglicht und unterstützt werden?

Dabei kann die Frage auf die beiden Teilaspekte der Ermöglichung und der Unterstützung einer verteilten Planung aufgegliedert werden. Entsprechend muss initial die Voraussetzung geschaffen werden, dass eine koordinierte, geteilte Nutzung von Ressourcen überhaupt möglich ist. Darauf aufbauend können in einem weiteren Schritt die Planung und Koordinierung eines geteilten Ressourceneinsatzes unterstützt werden. Es ergeben sich demnach zwei wesentliche Ziele, die innerhalb dieser Arbeit verfolgt werden sollen:

1. Entwicklung eines Nutzungskonzepts, welches einen koordinierten Einsatz von gemeinsam genutzten Ressourcen durch mehrere Anwender ermöglicht, und
2. Entwicklung einer Funktionalität zur planerischen Unterstützung und zur Entlastung im Koordinierungsaufwand.

3.2. Anforderungsanalyse

Entsprechend der identifizierten Ziele können Anforderungen einerseits an das Nutzungskonzept und andererseits an die planerische Unterstützung gestellt werden.

Die Anforderungen an ein Nutzungs-Konzept umfassen:

- **Kontinuierliche Verantwortlichkeit:** Trotz Nutzung durch mehrere Anwender soll zu jedem Zeitpunkt festgelegt sein, wem die Verantwortung über die Ressource obliegt.
- **Nutzungsintervalle:** Um eine sinnvolle und koordinierte Nutzbarkeit zu gewährleisten, soll das Konzept auf eine intervallbasierte Nutzung ausgelegt werden.
- **Erweiterbarkeit:** Das Konzept soll sich zunächst auf die Betrachtung zweier Nutzer beschränken, aber die theoretische Anwendbarkeit auf eine höhere Anzahl an Nutzern soll gewährleistet sein.

Die Anforderungen an eine Planungsunterstützung sind:

- **Ressourcenbedarf:** Der Planer soll eine Abschätzung des Ressourcenbedarfs ermitteln können.
- **Konfliktlösung:** Der Planer soll Lösungspläne zur Auflösung von Konflikten im Ressourcenbedarf erbringen.
- **Effiziente Ressourcenauslastung:** Das System soll eine möglichst effiziente Ressourcenauslastung fördern.
- **Kosten-Nutzen Abwägung:** Bei der Ermittlung einer Lösung sollen sowohl vorteilige als auch nachteilige Effekte auf die damit verknüpften Arbeitsprozesse gegeneinander abgewogen werden.

3.3. Arbeitsprozessanalyse und Systemdesign

Operieren mehrere Akteure in einem gemeinsamen Umfeld, ist es möglich, dass sich ihre jeweiligen Arbeitsprozesse gegenseitig beeinflussen. Diese Beeinflussung kann z.B. davon geprägt sein, wie sich ihre Arbeitsziele zueinander verhalten. Arbeitsziele können einerseits kooperativ zusammenhängen, wenn die Erreichung des einen Arbeitsziels die Erreichung des anderen Arbeitsziels voraussetzt. Andererseits können sich Arbeitsziele aber auch rivalisierend verhalten. Hierbei steht die Erreichung des einen Arbeitsziels im Widerspruch zur Erreichung des anderen Arbeitsziels. Lediglich bei unabhängigen Arbeitszielen beeinflussen sich die Ziele nicht, d.h. die Erreichung oder die Nicht-Erreichung des einen Ziels hat keinen Effekt auf die Erreichbarkeit des anderen Ziels.

Neben den jeweiligen Arbeitszielen können sich auch die individuellen Prozesse der Zielerreichung gegenseitig beeinflussen. Erfordern beide Arbeitsprozesse bspw. die Durchführung derselben Handlung, so muss diese ggf. nur innerhalb eines der beiden Prozesse durchgeführt werden. Hierdurch würde sich ein positiver Einfluss auf den anderen Arbeitsprozess ergeben, weil dieser Handlungsschritt kein zweites Mal durchgeführt werden muss. Sind zwei Arbeitsprozesse hingegen auf die Nutzung derselben Ressource angewiesen, können sich negative Effekte ergeben.

Nur wenn sowohl die Arbeitsziele als auch die Prozesse der Zielerreichung voneinander unabhängig sind, kann man von entkoppelten Arbeitsprozessen sprechen. Andernfalls liegen gekoppelte Arbeitsprozesse vor. Insbesondere zur Vermeidung negativer und zur Förderung positiver Effekte in gekoppelten Arbeitsprozessen kann eine Koordinierung der Handlungen und der Ressourcennutzung beitragen. Dabei kann die Koordinierung zwischen räumlich verteilten Akteuren aufgrund von Latenzen sowie der fernmündlichen Informationsübertragung z.T. erschwert sein.

Zum besseren Verständnis soll das Konzept zunächst anhand von zwei Nutzern und einer einzelnen geteilten Ressource beschrieben und im späteren Verlauf auf mehrere Nutzer und mehrere Ressourcen ausgeweitet werden. Beide Nutzer verfolgen dabei individuelle Arbeitsziele. In einem militärischen Kontext werden diese i.d.R. durch eine übergeordnete Führung festgelegt. Zusätzlich zu ihrem jeweiligen Hauptziel soll als Nebenziel verfolgt werden, dass sich die Nutzer über eine Teilung von Ressourcen gegenseitig in ihrer Zielerreichung unterstützen. Da die individuelle Zielerreichung von diesen Ressourcen abhängig ist, können sich die Arbeitsprozesse also auch trotz unabhängiger Ziele gegenseitig beeinflussen. Dabei können sich sowohl Konflikte als auch symbiotische Effekte auf die Zielerreichungsprozesse ergeben.

Entsprechend ergeben sich zwei getrennte Arbeitsprozesse zur Erfüllung der beiden Arbeitsziele, die durch die Interaktionen zur gemeinsamen Ressourcennutzung miteinander in Wechselwirkung stehen. Auf diese Arbeitsprozesse wirken individuelle Umwelteinflüsse ein, abhängig davon in welcher Umgebung sie situiert sind. Abbildung 3-1 zeigt ein generalisiertes Modell.

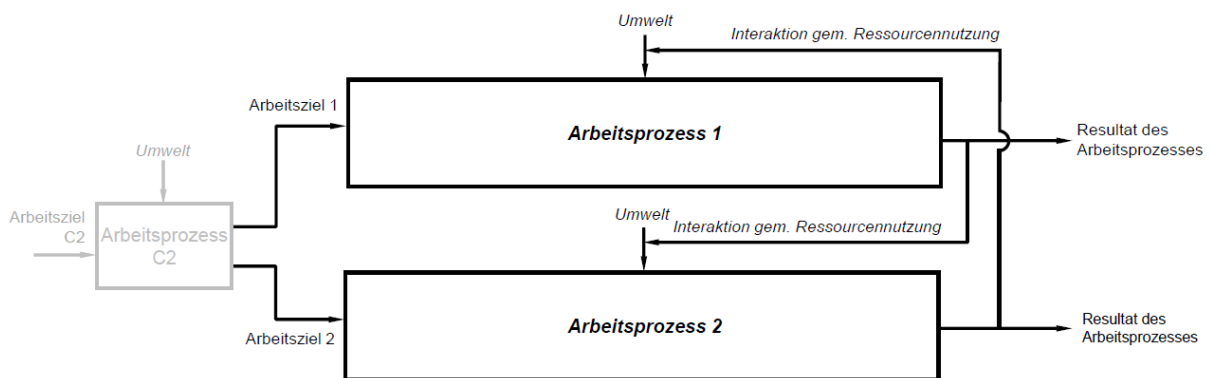


Abbildung 3-1 Generalisiertes Modell zweier durch Ressourcennutzung gekoppelter Arbeitsprozesse

In jedem Arbeitsprozess fungiert der jeweilige Nutzer als Arbeiter, dem bestimmte Arbeitsmittel bzw. Ressourcen zur Erfüllung des eigenen Ziels zur Verfügung stehen. Eine Ressource, klassifiziert als Werkzeug, ist dabei fester Bestandteil des spezifischen Arbeitssystems, innerhalb dessen sie momentan eingesetzt wird und kann zu diesem Zeitpunkt nicht Teil eines anderen Arbeitssystems sein. D.h. sie kann nicht gleichzeitig in unterschiedlichen Arbeitssystemen auftauchen. Jedoch sind beide Arbeitssysteme über die

gemeinsame Nutzung der geteilten Ressource miteinander verkoppelt. Zur besseren Differenzierung soll der Arbeitsprozess, dem die geteilte Ressource zugeordnet ist, als Arbeitsprozess des Bereitstellenden und der andere als Arbeitsprozess des Bedarfsträgers bezeichnet werden. Gemäß Abbildung 3-2 beeinflussen sie sich gegenseitig, da ihre Interaktionen als Umwelteinflüsse in den jeweils anderen Arbeitsprozess eingehen. Um seinen Bedarf an der Ressource zu äußern, die Bestandteil des bereitstellenden Arbeitsprozesses ist, muss der Bedarfsträger z.B. mit dem Bereitsteller in Verbindung treten. Diese Interaktion entsteht als Konsequenz des eigenen Arbeitsprozesses und wirkt als Umwelteinfluss auf den Arbeitsprozess des bereitstellenden Nutzers ein. Die Reaktion des Bereitstellenden ist wiederum ein Resultat des eigenen Arbeitsprozesses, und wirkt als Umweltereignis auf den Arbeitsprozess des Bedarfsträgers ein.

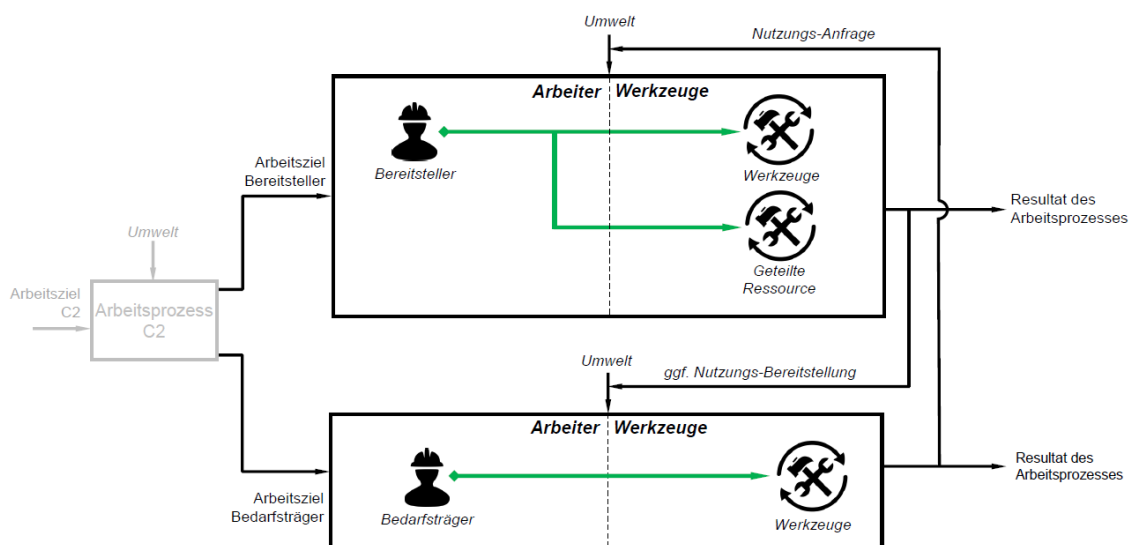


Abbildung 3-2 Arbeitssystemansicht auf zwei durch Ressourcennutzung gekoppelte Arbeitsprozesse

3.4. Kognitives Arbeitssystemdesign

Die Interaktion durch den Bedarfsträger initiiert ein Entscheidungsproblem für den potenziellen Bereitsteller, ob bzw. wie der Bedarf bedient werden kann. Da die Lösung dieses Entscheidungsproblems einen mehr oder weniger komplexen Planungsprozess erforderlich machen kann, soll der geteilte Ressourceneinsatz durch einen Agenten unterstützt werden. Insbesondere, da dieses Problem als zusätzliche Belastung auf den Arbeitsprozess einwirkt. Die Entscheidungsunterstützung soll sich dabei am Entscheidungsprozess nach Grünig und Kühn (2013) orientieren. D.h. eine Verarbeitung des Problems wird durch die Erarbeitung möglicher Lösungen unterstützt, wie der Fremdbedarf bewältigt werden kann. Dazu muss der Agent das Missionsziel sowohl kennen als auch verstehen, um Lösungen zu entwickeln, die sich daran orientieren. Da hierfür eine Planungsfähigkeit erforderlich ist, handelt es sich um einen kognitiven Agenten, der auf die Erreichung des Arbeitsziels hinwirkt. Um mögliche Lösungen zu erzeugen, hat der Agent analog zum Bereitsteller Zugriff auf das Wissen über den Zustand

und die Fähigkeiten der Werkzeuge sowie der geteilten Ressource. Die Interaktion mit dem Bereitsteller soll dabei kooperativ erfolgen, sodass der Agent befähigt wird, eigeninitiativ nach Lösungen zu suchen, sobald ein Ressourcenproblem auftritt. Demzufolge ergibt sich das in Abbildung 3-3 skizzierte Arbeitssystem.

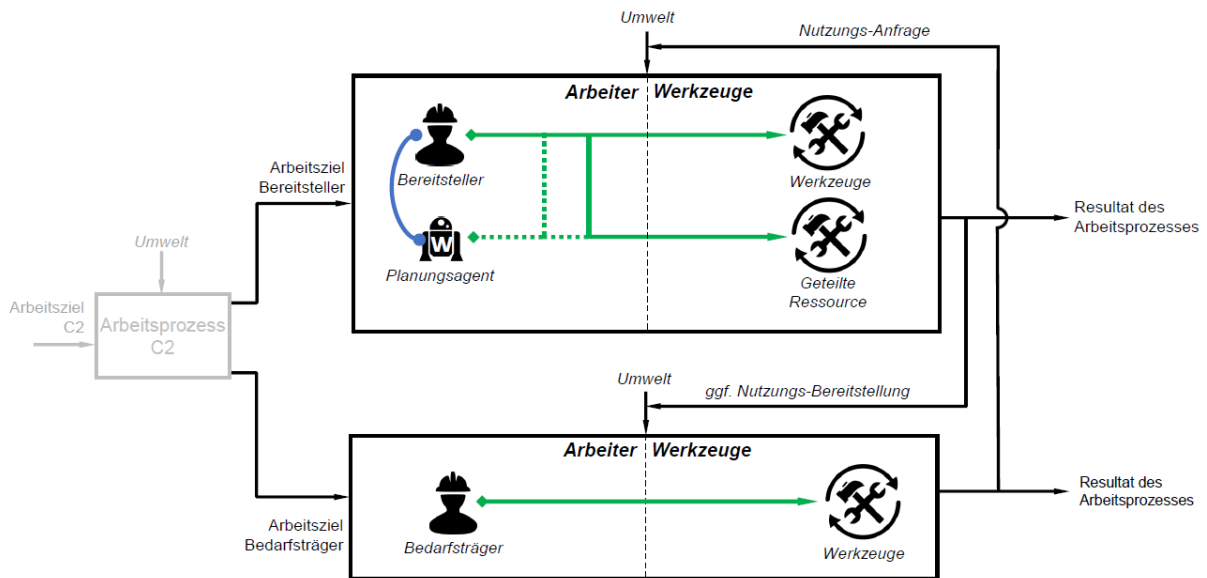


Abbildung 3-3 Arbeitssystem mit Planungsagent als Lösungsansatz zur Unterstützung der gemeinsamen Ressourcennutzung

3.5. Spezifische Einschränkungen

Die nachfolgende Konzeptionierung erfolgt dabei z.T. unter vereinfachten Betrachtungen. Zum einen sollen Aspekte, die für eine technische Realisierung notwendig wären, als gegeben angenommen werden. Sich daraus ergebende zusätzliche Fragestellungen wie z.B. technische Aspekte der Sicherheit, der Datenverbindung oder Verschlüsselung werden in dieser Arbeit folglich nicht betrachtet. Weiterhin dient die spätere prototypische Implementierung rein der Untersuchung des entwickelten Konzepts und stellt weder die Entwicklung eines Produkts noch eine Designempfehlung dar.

3.6. Konzept zum nutzerübergreifenden Ressourceneinsatz

Das Nutzungskonzept soll in erster Linie zur Vermeidung von Konflikten beitragen, die aus der gemeinsamen Nutzung einer oder mehrerer Ressourcen resultieren könnten. Für die koordinierte Planbarkeit und Durchführung des Arbeitsprozesses und den damit verbundenen Ressourceneinsatz ist es wichtig zu wissen, ab wann und wie lange über eine Ressource verfügt werden kann. Innerhalb dieses Zeitraums sollte dem Nutzer das alleinige Nutzungsrecht zustehen, um zu vermeiden, dass ein anderer Nutzer in die Ressourcennutzung eingreift und damit den Arbeitsprozess stört.

Soll eine Ressource also von mehreren Nutzern mit unterschiedlichen Arbeitszielen genutzt werden, die nicht kooperativ an der Erreichung eines gemeinsamen Ziels arbeiten, ist eine Koordinierung der Ressourcennutzung notwendig. Durch eine Aufteilung der Nutzungszeit in nutzergebundene Intervalle wird reguliert, wer zu welchem Zeitpunkt wie lange Zugriff auf die Ressource erhält. Dennoch ist es möglich, dass sich Überschneidungen im Bedarf ergeben, weil die Nutzer die Ressource zur gleichen Zeit benötigen. Konflikte im Bedarf sollen durch eine sorgfältige Ressourcenplanung minimiert werden.

3.6.1. Nutzerverhältnis

Für den ersten Schritt zur Entwicklung eines Nutzungskonzepts ist es relevant, in welchem Verhältnis die Nutzer stehen und welche Rechte und Pflichten ihnen im Zusammenhang mit einer geteilten Ressource zukommen. Hierfür ist besonders relevant, welcher Nutzer über die Entscheidungshoheit, die sog. *Autorität*, zur Nutzung der besagten Ressource im Falle eines Interessenskonflikts verfügt. Denn parallel zur Entscheidungshoheit trägt dieser Nutzer auch gleichzeitig die Verantwortung über die Ressource. Darauf basierend sollen den Nutzern Rollen zugewiesen werden, die mit diesen Rechten und Pflichten verknüpft sind. Dazu werden im Folgenden zwei verschiedene Verhältnisse zwischen den Nutzern betrachtet. Eine heterarchische Beziehung setzt gleichberechtigten Anspruch zur Nutzung der Ressource voraus. Demgegenüber besitzt in einer hierarchischen Beziehung einer der Nutzer die Hoheit über die Ressource.

3.6.1.1. Heterarchisches Nutzerverhältnis

Sind die Nutzer gleichgestellt, hat keiner von ihnen per se einen höheren Anspruch auf die Nutzung der Ressource als ein anderer. Demnach kann auch keiner das Recht besitzen, über den Beginn, das Ende oder die Dauer der Ressourcennutzung eines anderen zu bestimmen. Auch, damit der Zugriff auf die Ressource zu jedem Zeitpunkt klar geregelt ist, müssen die jeweiligen Nutzer in ihren Nutzungsintervallen für den alleinigen Zugriff berechtigt sein. Ein anderer Nutzer kann die Ressource in diesem Zeitraum weder selbst nutzen noch das Nutzungsintervall zu seinen Gunsten beenden. Derartige Anpassungen müssten stets bilateral verhandelt werden. Unter der Maßgabe, dass beide Nutzer gleichwertiges Anrecht besitzen, ließe sich eine Aufteilung der Nutzungsintervalle bspw. durch folgende Mechanismen realisieren:

- **Feste Aufteilung von Nutzungsintervallen:** Nach einem nachvollziehbaren Schema, wie z.B. nach festgelegten Zeitintervallen, wechselt das Nutzungsrecht über die Ressource zwischen den Nutzern.

- **First Come First Served:** Derjenige Nutzer, der seinen Bedarf zuerst anmeldet, erhält das gewünschte Nutzungsintervall, insofern es nicht mit einem bereits angemeldeten Nutzungsintervall kollidiert.
- **Entscheidung durch eine unabhängige Instanz:** Hierbei wird die Entscheidung über das Nutzungsprivileg nach möglichst objektiven Kriterien durch eine unabhängige Instanz getroffen, die nicht selbst Nutzer ist. In marktbasierenden Ansätzen werden Diskrepanzen zwischen Angebot und Nachfrage i.d.R. zugunsten des besten Kosten-Nutzen-Verhältnisses reguliert. Typische Beispiele sind Auktionen oder Preissetzungsmethoden. Dabei wird die Nutzung einer Ressource mit Kosten beaufschlagt. In Phasen, in denen mehrere Nutzer die Ressource zur gleichen Zeit für sich beanspruchen wollen, erhöhen sich die Nutzungsgebühren so lange, bis ein Nachgeben zu einer Auflösung des Konflikts führt.

3.6.1.2. Hierarchisches Nutzerverhältnis

In einem hierarchischen Ansatz zur Rollenverteilung besitzt einer der beiden Nutzer einen höheren Anspruch auf die Ressource und hat demnach die Entscheidungshoheit, wie und durch wen die Ressource genutzt werden darf. Dazu sollen im Folgenden zwei verschiedene Rollen mit zugehörigen Rechten eingeführt werden, die den individuellen Nutzern zugewiesen werden können. Dazu werden die in der Informatik etablierten Begriffe „Host“ und „Client“ verwendet.

Der *Host* als bereitstellender Nutzer besitzt die Entscheidungshoheit und trägt damit auch die Verantwortung über die Ressource. Demnach hat er ein priorisiertes Recht zu dessen Nutzung, muss sie im Rahmen der geteilten Ressourcennutzung aber auch für andere Nutzer verfügbar machen und ihre Gesamtnutzung über alle hinweg koordinieren. Dabei ist es zunächst nicht relevant, ob der Host die Ressource auch für seine eigenen Zwecke nutzt oder ob er ausschließlich eine koordinierende Funktion wahrnimmt.

Der *Client* repräsentiert einen Bedarfsträger, der ebenfalls einen Nutzen aus der Ressource des Hosts ziehen möchte. Im Gegensatz zum Host muss der Client nicht zwangsläufig über die Kompetenz zum Umgang bzw. zur Bedienung der Ressource verfügen. Dies ist abhängig davon, ob der Host die Ressource zur Eigennutzung freigibt oder ob er einen Service unter Nutzung dieser Ressource bereitstellt. Während eine Selbstnutzung die Kompetenz auch für den Client voraussetzt, ist diese bei der Nutzung eines Service nicht unbedingt erforderlich, da die Durchführung in diesem Fall weiterhin dem Host obliegt. In beiden Fällen muss der Bedarf vom Client spezifiziert und entsprechend beim Host angefragt werden. Basierend auf verschiedenen Faktoren, wie z.B. der Verfügbarkeit der Ressource oder der Dringlichkeit der Anfrage entscheidet der Host, ob und in welchem Rahmen er der Anfrage stattgibt. Trotz Fremdnutzung durch einen Client verbleibt die Verantwortung über die Ressource stets beim Host. Um diese Verantwortung ausüben zu können, muss dieser die notwendige Autorität

besitzen, auch einen bereits genehmigten Zugriff auf die Ressource im Nachhinein zu beschränken oder komplett zu revidieren. Einer Ressource muss und kann demnach nur genau ein einziger Host zugewiesen sein. Jedoch können mehrere Nutzer in der Rolle eines Clients die Nutzung der Ressource anfragen. Mehrere Clients können untereinander wiederum hierarchisch gleichgestellt sein.

Sowohl das Militär als auch die zivile Luft- und Seefahrt sind von hierarchischen Strukturen geprägt. Wenn es keinen designierten Entscheidungsträger gibt, führt dies i.d.R. zu Konflikten, die sich nur schwierig lösen lassen. Eine damit verbundene Verzögerung oder gar Verhinderung der Entscheidungsfindung kann insbesondere in zeitkritischen Situationen erhebliche Nachteile mit sich bringen. Ein weiterer Grundsatz, der hier zur Anwendung kommen soll, ist, dass Verantwortung nicht teilbar ist. Gibt es mehrere gleichberechtigte Verantwortliche über eine gemeinsame Ressource, kann dies ggf. zu Kompetenzstreitigkeiten führen. Auf der anderen Seite könnte sich aber auch keiner von ihnen verpflichtet fühlen, im Bedarfsfall einzugreifen, weil die Verantwortlichkeit beim jeweils anderen gesehen wird. Noch kritischer sind Zeiträume gänzlich ohne Verantwortlichen. In einer hierarchischen Struktur sind diese Punkte klar geregelt, denn es gibt einen Entscheidungsträger, der unabhängig von hierarchisch untergeordneten Instanzen eine Entscheidung treffen kann. Dadurch können Konflikte i.d.R. schneller aufgelöst werden. Aus diesen Gründen konzentriert sich der Rest der Arbeit auf ein hierarchisches Nutzerverhältnis und ein heterarchisches wird im Folgenden nicht weiter betrachtet.

3.6.2. Interoperabilität

Eine intuitive Möglichkeit der gemeinsamen Ressourcennutzung stellt die wechselseitige Übergabe der Ressource unter den Nutzern dar. Dies ist jedoch nicht immer möglich oder gewollt, weil damit z.B. ein komplizierter Übergabeprozess einhergeht oder weil die Ressource nur temporär entbehrlich ist. Daher soll sich der nachfolgende Teil auf die Möglichkeit der Teilung von Ressourcen konzentrieren, ohne dass sie aus dem eigenen Zugriffsbereich abgegeben werden.

3.6.2.1. Skalierung

Basierend auf der hierarchischen Rollenverteilung wurden mehrere Ebenen der geteilten Nutzung definiert, die den Zugriff auf die Ressource in aufsteigendem Maße vom Host an den Client übertragen (siehe auch (Roth und Schulte 2020)). Ausgehend von einer exklusiven Nutzung durch den Host wird diese anhand mehrerer Stufen bis hin zu einer exklusiven Nutzung durch den Client überführt. Abhängig von der jeweiligen Stufe wird die Nutzbarkeit

der Ressource dabei für den Client erhöht und für den Host in entsprechendem Maße reduziert. Abbildung 3-4 gibt einen Überblick über die verschiedenen Level.

Level 0. Dieses Level dient als Referenzlevel, wenn dem Client keine Rechte zur Nutzung der Ressource zugestanden werden. Da in diesem Fall der Host die exklusive Nutzung über die Ressource hat und der Client gar keinen Nutzen daraus ziehen kann, kann man hierbei nicht von einer geteilten Ressourcennutzung sprechen.

Level 1. Innerhalb dieses Levels wird dem Client die passive Nutzung der Ressource gewährt. D.h. der Client darf einen Nutzen aus der Ressource ziehen, solange sie dafür nicht nach Bedarf des Clients betrieben werden muss. Folglich besitzt der Client keine Möglichkeit, aktiv auf den erbrachten Nutzen einzuwirken und die Ressource damit entsprechend dem eigenen Bedarf einzusetzen. Dennoch bietet dieses Level eine Möglichkeit, den Nutzen der Ressource, der aus der Bedienung durch den Host entsteht, mit dem Client zu teilen, ohne damit ihren Betrieb zu beeinträchtigen.

Level 2. Dieses Level ermächtigt den Client, Anfragen zur Ausführung einer ressourcen-spezifischen Aufgabe an den Host zu stellen und erlaubt ihm damit einen indirekten Zugriff auf die Ressource. Dieser Zugriff unterliegt jedoch der Genehmigung und Ausführung durch den Host. Dieser muss entscheiden, ob er die Anfrage (ggf. eingeschränkt) ausführen kann oder ob er sie ablehnen muss. Entsprechend muss der Host evaluieren, ob die Anfrage prinzipiell bedient werden kann, ob sie mit der eigenen Ressourcenplanung vereinbar ist und ob der Host genügend mentale Kapazitäten zu ihrer Bearbeitung frei hat. Obwohl dieses Level einen koordinativen Mehraufwand für den Host mit sich bringt, besteht dafür ein maximaler Handlungsspielraum, die Fremdnutzung günstig in den eigenen Ressourcenbedarf einzugliedern.

Level 3. Während in den vorangegangenen Leveln der Host die aktive Kontrolle über die Ressource ausübt, wird die Kontrolle in diesem Level an den Client übertragen. Mit Übergang der Kontrolle an den Client kann dieser die Ressource also selbstständig kontrollieren und weitestgehend nach eigenem Ermessen einsetzen. Folglich ist hier erstmalig erforderlich, dass der Client über die notwendige Kompetenz zum Betrieb der Ressource verfügt. Damit ist der Client nicht mehr auf die unmittelbare Genehmigung und Ausführung von Einzelaufgaben durch den Host angewiesen. Trotzdem muss die Kontrolle vom Client angefragt und durch den Host genehmigt werden. Sowohl die Autorität als auch die Verantwortung über die Ressource verbleiben dabei jedoch beim Host. D.h. zum einen obliegt dem Host weiterhin die Pflicht zur Kontrolle, dass die Ressource entsprechend ihrer Fähigkeiten und Limitierungen korrekt eingesetzt wird. Zum anderen ist er befähigt, dem Client bei Bedarf die Nutzungsrechte wieder zu entziehen und die Kontrolle über die Ressource wiederzuerlangen, bspw. zu ihrem Schutz oder aufgrund von Eigenbedarf. Im Vergleich zu Level 2 sollte die geteilte Ressourcennutzung in diesem Level weniger Koordinationsaufwand für den Host erfordern, da der Client während

der Fremdkontrolle mehrere Einzelaufgaben abarbeiten kann. Dafür steht dem Host die Ressource innerhalb dieses Zeitraums jedoch nicht unmittelbar zur Verfügung.

Handover. Die Level 1 bis 3 repräsentieren unterschiedliche Möglichkeiten der geteilten Ressourcennutzung, bei denen die aktive Kontrolle über die Ressource kontinuierlich vom Host an den Client übergeht. Verantwortlichkeit und Autorität über die Ressource sind davon jedoch unberührt und verbleiben stets beim Host. Über einen *Handover* können schließlich auch diese an den Client übertragen werden. Dies initiiert eine Änderung der Rollenverteilung, sodass der ehemalige Client zum neuen Host über die Ressource wird. Da der ehemalige Host sämtliche Rechte abgegeben hat, kann er die Ressourcennutzung nur in der Rolle eines Clients erneut anfragen.

	Client	Host
Level 0	No Use No ability to control the resource No reception of asset related outcomes	Active Use Exclusive direct control of the resource Asset related outcomes are exclusive to the host
Level 1	Passive Use No ability to control the resource Resource related outcomes are shared	Active Use Exclusive direct control of the resource Resource related outcomes are shared
Level 2	Active Use Indirect control of the resource by task-requests Task related outcomes are shared	Active Use Direct control of the resource (considering requests) Task related outcomes are shared
Level 3	Active Use Direct control of the resource Resource related outcomes are shared	Passive Use Control of the resource is transferred to the client Resource related outcomes are shared

Swap of roles

	Host	Client
Level 0	Active Use	No Use
⋮		

Transfer of outcomes
↓
Transfer of control
↓
Transfer of responsibility

Abbildung 3-4 Interoperabilitätsskala

3.6.2.2. Abgeleitete Nutzungsstrategien

Ausgehend von den Leveln 2 und 3 der gemeinsamen Ressourcennutzung ergeben sich verschiedene Strategien zur Strukturierung eines Netzwerks mit mehreren Nutzern und mehreren Ressourcen. Die Beispiele (a)-(c) in Abbildung 3-5 veranschaulichen die Aufteilung mehrerer Ressourcen auf zwei Nutzer, wobei einer von ihnen alle Ressourcen hostet. Beispiel (d) zeigt eine Konfiguration mit mehreren Clients und verteilt gehosteten Ressourcen.

Verteilte Nutzung. Die Ressourcen in Beispiel (a) sind so verteilt, dass sie jeweils von ausschließlich einem Nutzer eingesetzt werden. Dementsprechend hat der Client entweder gar keinen Zugriff (Level 0) oder die aktive Kontrolle (Level 3). Da sie jeweils exklusiv genutzt werden, ergibt sich kein Koordinierungsbedarf in der individuellen Ressourcennutzung. Lediglich ihre Zuordnung zu den jeweiligen Nutzern muss koordiniert werden. Abgesehen von

einer Änderung der verfügbaren Ressourcen wird der Host somit nicht weiter vom Client beeinflusst. Es ist außerdem nicht notwendig, dass der Host eine der Ressourcen selbst aktiv nutzt. Ebenso wäre es denkbar, dass alle Ressourcen fremdgenutzt werden.

Gemischte Nutzung. In Beispiel (b) werden einige der Ressourcen exklusiv (Level 3) und einige gemeinsam genutzt (Level 2). Die Nutzung der gemeinsam genutzten Ressourcen muss dementsprechend koordiniert werden. Gleichzeitig können die zur exklusiven Nutzung reservierten Ressourcen aber herangezogen werden, um Konflikte bei der gemeinsamen Nutzung abzufedern. Neben der Zuordnung der Nutzer wird der Aufwand zur Koordinierung der gemeinsamen Nutzung entsprechend erhöht.

Kollektive Nutzung. In dieser Konfiguration werden keine der Ressourcen exklusiv von einem einzelnen Nutzer eingesetzt. Stattdessen werden alle Ressourcen gemeinsam genutzt. Dies erfordert einen sehr hohen Koordinierungsaufwand bei der Nutzung, bietet aber das Potenzial, freie Kapazitäten maximal auszunutzen.

Mehrere Clients und Hosts. Bisher wurde die Verteilung von Ressourcen nur zwischen zwei Nutzern beschrieben, wobei einer als Host und der andere als Client fungierte. Die Verantwortung für mehrere Ressourcen und deren Nutzung ist jedoch nicht auf zwei Parteien beschränkt. Beispiel (d) zeigt eine Konfiguration, bei der die Verantwortlichkeit für mehrere Ressourcen auf zwei Nutzer verteilt ist. Ein dritter Nutzer agiert als reiner Client. Es besteht eine gemeinschaftliche Ressourcennutzung zwischen Host A und Client A. Host A tritt dabei einerseits als Bereitsteller der eigenen Ressource und andererseits als Bedarfsträger einer fremden Ressource auf. Host B nutzt die eigens gehostete Ressource nicht selbst, sondern hat eine rein bereitstellende Funktion. Diese steht dabei nicht nur einem einzelnen Client zur Verfügung, sondern wird von zwei Clients gemeinsam genutzt.

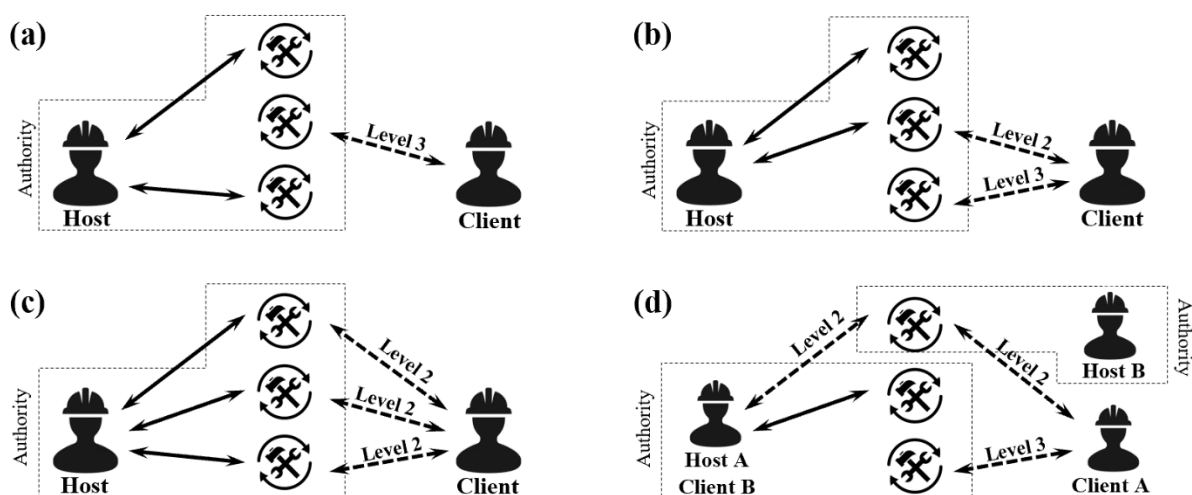


Abbildung 3-5 Beispiele abgeleiteter Nutzungsstrategien

3.7. Konzept zur Planungsunterstützung

Ziel dieses Abschnitts ist die Konzeptionierung einer Assistenzfunktion, die den Einsatz von gemeinsam genutzten Ressourcen durch Ausplanung unterstützen kann. Dazu sollen Ressourcenkonflikte erkannt, mögliche Lösungen identifiziert und die Auswirkungen der geteilten Ressourcennutzung auf die jeweiligen Planungsprozesse abgeschätzt werden.

3.7.1. Verbindungsarchitektur

In den bisherigen konzeptionellen Überlegungen wurde vorausgesetzt, dass eine Kommunikationsstruktur zwischen den Nutzern existiert, um Daten untereinander auszutauschen. An dieser Stelle soll der Informationsfluss innerhalb eines dezentralen Multi-Agenten Systems erörtert werden. Dabei wird zunächst das Verbindungsproblem an sich betrachtet und anschließend ein möglicher Lösungsansatz dafür aufgezeigt.

Das *Verbindungsproblem* adressiert das Zustandekommen und Aufrechterhalten eines Informationsflusses zwischen einem Bereitsteller und einem Bedarfsträger von Daten, wenn vorher noch keine Verbindung zwischen ihnen bestand. Einem Bedarfsträger ist möglicherweise nicht bekannt, ob es einen Bereitsteller benötigter Informationen gibt bzw. wer zum Erhalt dieser Daten adressiert werden muss. Umgekehrt kann es sein, dass es auch einem potenziellen Bereitsteller von Informationen nicht bekannt ist, ob und mit wem die eigenen Informationen geteilt werden können.

Da das Verbindungsproblem hauptsächlich in der Informationsübertragung zwischen technischen Systemen auftaucht, orientieren sich die folgenden Formulierungen vermehrt an dem Begriff des Agenten. Das Problem kann aber ebenso im Hinblick auf eine Kommunikationsstruktur zwischen Menschen verstanden werden. Entsprechend bezieht sich der Agentenbegriff hierbei auf die technische Realisierung einer digitalen Kommunikationsstruktur, hinter der menschliche Akteure stehen.

Als Ansatz zur Lösung des Verbindungsproblems beschreibt die Literatur einen Agenten, der zwischen dem Bedarfsträger und dem Bereitsteller von Informationen lokalisiert ist (Wiederhold et al. 1990; Genesereth und Ketchpel 1994; Decker et al. 1997). Unter den Bezeichnungen „Mediator“, „Facilitator“ oder „Middle-Agent“ nimmt ein vermittelnder Agent somit einen Knotenpunkt in der Kommunikationsstruktur zwischen mehreren anderen Agenten ein und stellt damit einen zentralen Ansprechpartner dar, der das Zustandekommen einer Verbindung koordiniert. Eine technische Realisierung wird üblicherweise über drei verteilte Agenten modelliert: einem anfragenden Agenten (engl. *Requesting Agent* bzw. R-Agent), einem bereitstellenden Agenten (engl. *Providing Agent* bzw. P-Agent) und einem vermittelnden Agenten (Middle-Agent). Insbesondere innerhalb eines Multi-Agenten Systems kann dieser

Middle-Agent durch Zentralisierung von Wissen und Reduktion von Kommunikationsaufwand den Informationsaustausch zwischen mehreren Parteien erleichtern. Indem nur noch er Kenntnis über alle beteiligten Agenten besitzt und weiß, welcher Agent welche Informationen benötigt oder bereitstellen kann, müssen diese Informationen nicht mehr durch die anderen Agenten vorgehalten werden. Entsprechend erübrigt es sich, dass jeder Kenntnis von jedem hat und dass ein Agent zum Informationsaustausch alle anderen ihm bekannten Agenten kontaktieren muss, da der Middle-Agent die Vermittlung zwischen ihnen übernehmen kann. Neben dem initialen Verbinden zweier Parteien ordnet ein solcher Middle-Agent durch die Bündelung des Informationsflusses auch die Kommunikationsstruktur innerhalb von Netzwerken mit mehreren Bedarfsträgern und Bereitstellern.

Decker et al. (1996) untersuchten Middle-Agents unter Berücksichtigung des Datenschutzes und der Privatsphäre zwischen Bedarfsträger und Bereitsteller. Hierbei kommt der Aspekt zum Tragen, dass Bereitsteller und Bedarfsträger zwar am Zustandekommen eines Informationsflusses interessiert sind, aber ggf. keine zusätzlichen Informationen wie z.B. die eigene Identität preisgeben möchten. Dabei wurden insbesondere die Begriffe „*Matchmaking*“- und „*Brokering*“-Verhalten⁶ geprägt. Dabei handelt es sich um verschiedene Verfahren, wie der Informationsaustausch zwischen dem R-Agent und dem P-Agent zustande kommt (Klusch und Sycara 2001; Kuokka und Harada 1995).

Das Verbindungsproblem und dessen Lösung ist für das vorliegende Forschungsfeld relevant, da die Kommunikation zwischen mehreren Nutzern, die sich eine gemeinsame Ressource teilen ggf. auch initial hergestellt werden muss. Außerdem gibt der Lösungsansatz Aufschluss darüber, wie der Informationsfluss in Strukturen mit (ggf. mehreren) Bedarfsträgern und Bereitstellern strukturiert werden kann. Auch wenn sich der Großteil der Arbeit hauptsächlich auf die Betrachtung zweier Nutzer bezieht, ist dies besonders für die Skalierbarkeit auf größere Strukturen von Bedeutung. Der Middle-Agent Ansatz basiert zwar im Wesentlichen auf einer Zentralisierung des Wissens und des Informationsflusses innerhalb eines Multi-Agenten Netzwerks. Jedoch soll sich das Konzept an einem möglichst dezentralen Aufbau orientieren, um die Skalierbarkeit für größere Strukturen zu gewährleisten. Der Gedanke eines Brokers im Sinne einer „dritten“ Partei bietet sich hierbei aber trotzdem an, um zwischen zwei Agenten zu vermitteln, die ein individuelles Interesse an einer gemeinsam genutzten Ressource besitzen. Der Middle-Agent kann insbesondere dazu dienen, die Funktionalität zur Verhandlung über die Ressourcennutzung von den übrigen Funktionen (insbesondere der Planungsfunktion) des Bereitstellers sowie des Bedarfsträgers zu trennen.

⁶ Ein *Matchmaker* führt eine Übersicht darüber, welcher P-Agent welche Informationen bereitstellen kann. Werden spezifische Informationen durch einen R-Agenten angefragt, kann er anhand dieser Übersicht Auskunft darüber geben, durch welchen P-Agenten sie bereitgestellt werden können. Anschließend kann der R-Agent den P-Agent unmittelbar kontaktieren. Im Unterschied dazu holt ein *Broker* die angefragten Informationen vom P-Agenten selbst ein und leitet sie an den R-Agenten weiter. Er fungiert damit als Mittelsmann, ohne dass R- und P-Agent direkt miteinander kommunizieren.

Der konzeptionelle Ansatz orientiert sich demnach an der Verwendung eines Brokers als Middle-Agent, um Anfragen des Clients über eine Ressourcennutzung bilateral mit dem Host zu verhandeln. Um eine möglichst dezentrale Struktur beizubehalten, wird dieser jedoch nicht zentral eingesetzt, um mehrere Hosts und mehrere Clients zu verbinden, sondern dient ausschließlich zur bilateralen Verhandlung zwischen einem Client und einem Host. Um das Verbindungsproblem in Multi-Agenten Systemen mit mehreren Hosts und mehreren Clients zu lösen, würde sich ein zentraler Matchmaking-Agent anbieten, bei dem alle potenziellen Hosts registriert sind. Dieser könnte dann durch einen Client angefragt werden, um eine initiale Prüfung durchzuführen, welcher Host für eine Ressourcenanfrage adressiert werden sollte. Auf diesem Wege kann dann die Verbindung zu einem expliziten Host, respektive dem verantwortlichen Broker hergestellt werden.

3.7.2. Planungsfähigkeit

Bei der manuellen Planung legt der Nutzer unter Berücksichtigung der verfügbaren Ressourcen Aufgaben fest, die im Rahmen seines Arbeitsprozesses durchgeführt werden sollen und die auf die Erreichung des eigenen Arbeitsziels hinwirken. Der resultierende Plan beinhaltet demnach Aufgabensequenzen, die die Verfügbarkeit einer eingeplanten Ressource voraussetzen (explizit formulierter Ressourcenbedarf). Solange der durch den Nutzer erstellte Plan das Arbeitsziel noch nicht erreicht, kann darüber hinaus jedoch zusätzlicher Bedarf (impliziter Ressourcenbedarf) entstehen. Gleichzeitig kann durch einen anderen Nutzer ebenfalls Bedarf an der Ressource (externer Ressourcenbedarf) entstehen und zu Überschneidungen im Ressourcenbedarf mehrerer Nutzer führen. Zweck der Planung ist demnach:

1. Ermittlung des impliziten Ressourcenbedarfs
2. Entwicklung von Lösungen zur Kombination von explizitem, implizitem und externen Ressourcenbedarf

Die Ermittlung des Ressourcenbedarfs mehrerer Nutzer und die Koordinierung ihrer Pläne erfordert eine Multi-Agenten Planung, bei der für jeden Nutzer ein eigenes Planungsproblem vorliegt. Diese einzelnen Planungsprobleme sind durch die gemeinsame Ressourcennutzung miteinander gekoppelt, d.h. die Lösung jedes Planungsproblems ist abhängig von der Lösung der anderen Planungsprobleme. Diese verkoppelten Planungsprobleme können wiederum als ein Gesamt-Planungsproblem für die Menge aller beteiligten Nutzer aufgefasst werden, zu dessen Lösung zwei Ansätze existieren. Der zentralisierte Ansatz löst das globale Gesamt-Planungsproblem durch einen einzelnen, zentralen Prozess. Im dezentralisierten Ansatz werden die lokalen Einzel-Planungsprobleme separat gelöst und durch eine agentenübergreifende Koordinierung wird gewährleistet, dass die einzelnen Lösungen kompatibel zueinander sind. Ggf. muss dazu der Prozess aus Planung und Koordinierung wiederholt durchgeführt werden,

bis die Einzelpläne kompatibel zueinander sind und damit das Gesamt-Planungsproblem gelöst ist.

3.7.2.1. Zentralisierte Multi-Agenten Planung

Beim zentralisierten Ansatz (siehe Abbildung 3-6) wird die Planung für alle Nutzer über einen zentralen Prozess durchgeführt, der die Teil-Planungsprobleme zu einem Gesamt-Planungsproblem fusioniert. Dies hat den Vorteil, dass gemeinsam genutzte Ressourcen, die in den Planungsprozess einbezogen werden müssen, in einem Schritt berücksichtigt werden können. Dadurch kann das Multi-Agenten Planungsproblem ähnlich zu einem Einzel-Agenten-Planungsproblem behandelt werden und reduziert sich damit sowohl in der Komplexität als auch der notwendigen Koordinierung und Kommunikation.

Da dieses Planungsproblem die gesamte Wissensrepräsentation über beide Planungsprobleme besitzt, besteht die Möglichkeit, Ressourcenkonflikte unmittelbar zu identifizieren und aufzulösen. Somit lässt sich ein global gültiger Gesamtplan durch einen einzelnen Planungsprozess ermitteln. Der Gesamtplan kann anschließend in die lokalen Einzelpläne der Nutzer separiert werden, die jeweils das ursprüngliche Teil-Planungsproblem lösen.



Abbildung 3-6 Zentralisierter MAP-Ansatz

Insbesondere in einer dezentralen Umgebung, in der die Nutzer räumlich verteilt sind, müssen die einzelnen Teil-Planungsprobleme an den Planer und die Teilpläne zurück an die einzelnen Nutzer kommuniziert werden. Dafür muss dieser Planer an einer zentralen Stelle lokalisiert sein, um die Datenkommunikation zu allen Beteiligten zu gewährleisten. Nach diesem Ansatz ist die Planungsfähigkeit aller Nutzer stark von der Verfügbarkeit und Erreichbarkeit dieses zentralen Planers abhängig. Er wird damit zu einem äußerst vulnerablen Punkt und einer potenziellen Schwachstelle (sog. Single-Point-of-Failure) für die Planungsfähigkeit des gesamten Multi-Agenten Systems. Eine unabhängige Nutzerplanung ist mit diesem Ansatz demzufolge nicht ohne weiteres möglich.

3.7.2.2. Dezentralisierte Multi-Agenten Planung

Beim dezentralisierten Planungsansatz (siehe Abbildung 3-7) wird die jeweilige Planung über verteilte Planungsagenten durchgeführt, die lokal bei jedem Nutzer angesiedelt sind. Dies schließt die Planung von geteilten Ressourcen ein, über die nicht alleinig verfügt wird. Da die Einzel-Planungsprobleme in diesem Fall jeweils für sich gelöst werden, ergeben sich lokale

Einzelpläne mit lokaler Gültigkeit, d.h. ohne Berücksichtigung der anderen Pläne. Im globalen Kontext können sich jedoch Überschneidungen im Bedarf der gemeinsam genutzten Ressource ergeben, die den globalen Plan, der die lokalen Pläne zu einem Gesamtplan vereint, ungültig machen. Dadurch verlieren die lokalen Pläne, die am Ressourcenkonflikt beteiligt sind, ebenfalls ihre Gültigkeit. Um diese Konflikte in der Ressourcennutzung aufzulösen und globale Gültigkeit zu erhalten, ist eine Koordinierung der jeweiligen Planer untereinander notwendig. Aus der Koordinierung können sich Randbedingungen ergeben, die in eine erneute Einzelplanung zurückgeführt werden, um die Einzel-Planungsprobleme im Hinblick auf die Auflösung des Konfliktes erneut zu lösen. Anschließend muss wieder geprüft werden, ob es neue Überschneidungen in der Ressourcennutzung gibt. Dies wird so lange durchgeführt, bis alle Ressourcenkonflikte iterativ aufgelöst werden konnten und sich damit ein valider Gesamt-Plan ergibt.

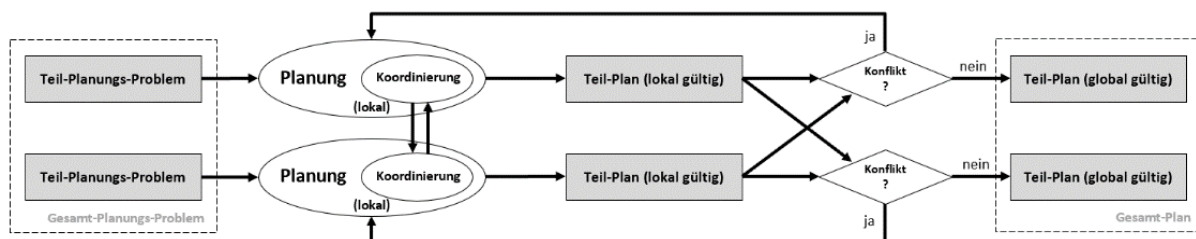


Abbildung 3-7 Dezentralisierter MAP-Ansatz

Im Vergleich zum zentralisierten Ansatz erfordert dieser Ansatz einen erhöhten Koordinierungsaufwand und dementsprechend auch mehr Zeit, bis ein gültiger Gesamtplan gefunden werden kann. Andererseits bietet dieser Ansatz auch die Möglichkeit, dass eine Planung individuell und lokal durchführbar ist, wenn z.B. keine Verbindung zwischen den Nutzern vorliegt. In diesem Fall werden nur die jeweils lokal gültigen Pläne entwickelt, die ohne den Koordinierungsprozess zwischen den dezentralen Planungsprozessen nicht auf globale Gültigkeit überprüft werden können. Dennoch ist die prinzipielle Planungsfähigkeit für beide Nutzer auch ohne Verbindung gegeben und der Koordinierungsprozess kann zu einem späteren Zeitpunkt nachgeholt werden. Ein weiterer Aspekt des dezentralisierten Ansatzes ist eine erhöhte Privatsphäre. Auf diese Weise muss weder das eigene Planungsziel noch der komplette Missionsplan zwischen den Nutzern kommuniziert werden, sondern nur diejenigen Planelemente, die die geteilte Ressource betreffen.

3.7.3. Lösungsgenerierung

Über die beiden Ansätze der zentralisierten und dezentralisierten MAP kann somit der theoretische Ressourcenbedarf zur Erreichung der jeweiligen Arbeitsziele ermittelt werden. Wird der Agent darüber hinaus befähigt, bereits getätigte Planungsaktivitäten und deren Fortschritt zu beobachten, können bereits durchgeführte und bereits durch den Nutzer geplante

Aufgaben in diesen Prozess mit einbezogen werden. Dieses Wissen kann z.B. erlangt werden, indem der Agent die Planungsaktivitäten des Nutzers anhand eines Planungsinterfaces beobachtet und speichert. Aus einem solchen Nutzer-Plan kann der Planungsagent ableiten, wann der Nutzer eine spezifische Ressource in Anspruch nehmen möchte, und dies als zusätzliche Randbedingungen bei der automatisierten Planung berücksichtigen. Das Resultat ist ein kombinierter Plan, der über eine Komplettierung (Strenzke und Schulte 2011) einen bestehenden Plan um all jene Aufgaben erweitert, die noch nicht explizit durch den Nutzer geplant wurden, welche aber zur Erreichung des Arbeitsziels ausstehen. Entsprechend kann dadurch auch der *implizite Ressourcenbedarf* ermittelt werden, der über den *explizit formulierten Bedarf* hinaus geht. Eine Anfrage zur Ressourcennutzung stellt schließlich einen *externen Ressourcenbedarf* dar. Anschließend kann ein Abgleich des kombinierten Ressourcenbedarfs mit der *Ressourcenverfügbarkeit* stattfinden, um mögliche Konflikte zu identifizieren. Auf solche Konflikte kann per Aufmerksamkeitslenkung hingewiesen werden. Weiterhin kann der Agent durch einen Koordinierungs- und Neuplanungsprozess Lösungen zur präventiven Vermeidung oder zur Behebung von Ressourcenkonflikten ermitteln und an den Nutzer herantragen. Hierdurch ergibt sich eine Funktionalität, die Konflikten vorbeugen kann und die Konfliktbeseitigung in der Ressourcenplanung unterstützt.

3.7.3.1. Generierung von Optionen

Prinzipiell gibt es verschiedene Möglichkeiten, eine angefragte Nutzung (d.h. den externen Ressourcenbedarf) in einen Referenzplan (als Kombination aus explizitem und ggf. implizitem Ressourcenbedarf) zu integrieren. Zum Auflösen von Konflikten soll der Planer neben dem reinen Einfügen angefragter Planelemente befähigt werden, potenzielle Optimierungen im expliziten Teil des Referenzplans zugunsten der Anfrage auszunutzen. Grundsätzlich sollte die resultierende Lösung diesen dabei jedoch möglichst wenig modifizieren, um Problemen in der Transparenz und der Nachvollziehbarkeit vorzubeugen. Aus diesen Überlegungen wurden die folgenden Integrationsmodi abgeleitet, die dem Planungsagenten unterschiedliche Freiheitsgrade bei der Generierung von Lösungen gewähren.

Mittels eines **konventionellen Integrationsmodus** kann die Anfrage in den expliziten Teil des zugrundeliegenden Plans eingefügt bzw. angehängt werden, ohne dass die Aufgabenreihenfolge verändert wird (siehe Abbildung 3-8 a)). Dennoch kann die damit verbundene zeitliche Umplanung Auswirkungen auf die Zielerreichung oder die Effizienz der Ressourcennutzung haben, die berücksichtigt werden müssen.

Ein **impliziter Integrationsmodus** sucht nach Lösungen, um die Anfrage in den impliziten Teil des Referenzplans zu integrieren (siehe Abbildung 3-8 b)). Dies ist insbesondere dann sinnvoll, wenn es (z.B. aus zeitlichen oder pfadbezogenen Gründen) vorteilhaft wäre, eine noch nicht geplante Aufgabe der angefragten Ressourcennutzung voranzustellen.

Ein **optimierender Integrationsmodus** evaluiert, ob es vorteilhaft ist, den zugrundeliegenden Referenzplan in Kombination mit der Anfrage umzustrukturieren. Dabei wird geprüft, ob es vorteilhaft wäre, die Aufgabensequenz der Ressource neu anzuordnen (siehe Abbildung 3-8 c)). Für den Fall, dass über mehrere Ressourcen verfügt wird, kann außerdem evaluiert werden, ob es möglich und sinnvoll wäre eine bereits geplante Aufgabe auf eine andere Ressource zu transferieren, die freie Kapazitäten dafür besitzt (siehe Abbildung 3-8 d)). Die Betrachtung solcher Lösungen ist insbesondere dann relevant, wenn die anderen Integrationsansätze keine geeignete Lösung finden oder wenn sich dadurch der Plan erheblich optimieren lässt.

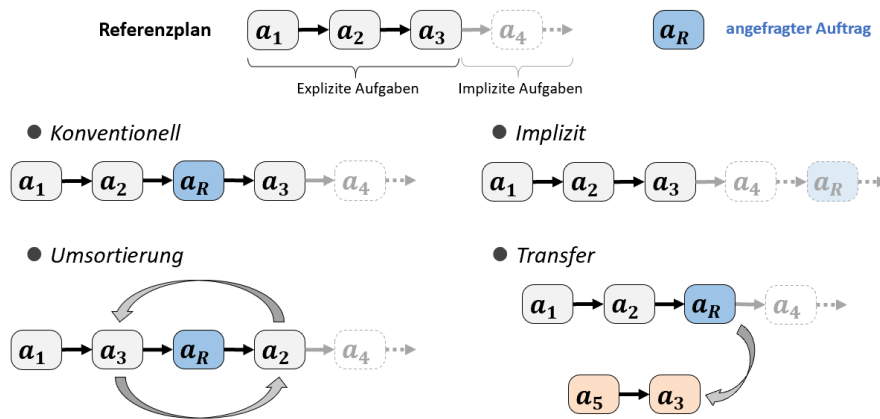


Abbildung 3-8 Integrationsmodi

3.7.3.2. Bewertung der Optionen

Um die jeweiligen Interessen von Client und Host zu berücksichtigen, wurde ein Lösungsansatz verfolgt, der auf individuellen Nutzwerten basiert. Analog zu den Präferenzformulierungen in einem Auktionsprozess sollen damit die Vor- und Nachteile für Host und Client berücksichtigt werden, um verschiedene Lösungen gegeneinander abzuwägen. Zur Berücksichtigung in der maschinellen Planung muss dazu jeder Anfrage eine Präferenzformulierung durch den Client zugewiesen werden. Hierbei wurden zwei Ansätze konzeptioniert:

1. Angabe einer Priorität
2. Angabe eines Zeitpunktes und eines Flexibilitätsbereichs

Die *Priorität* beschreibt die Dringlichkeit der Anfrage und ihre Bedeutung für den Auftrag des Clients. Ihre Angabe zielt darauf ab, die Anfrage entsprechend ihrer Kritikalität einzubinden. Dazu wurden folgende Prioritäten definiert:

- **Niedrig:** Die Anfrage ist nicht kritisch, trägt aber zur Effizienz der Auftragserfüllung bei. Da die Anfrage nicht kritisch ist, sollte ihre Integration abhängig von freien Kapazitäten erfolgen und nur, wenn der Plan des Hosts dadurch keine Einschränkungen erfährt.

- **Mittel:** Die Anfrage ist kritisch, aber nicht zeitkritisch. Im Hinblick auf die Einbindung der Anfrage in den Plan des Hosts sollte eine möglichst optimierte Integration erfolgen
- **Hoch:** Die Anfrage ist aufgrund ihrer Zeitkritikalität (z.B. aufgrund einer Bedrohung des Clients) vorrangig zu behandeln. Eine Integration sollte daher möglichst unmittelbar und weitestgehend unabhängig von eventuellen Einschränkungen des Hosts erfolgen.

Die Angabe eines *Zeitpunkts* und eines *Flexibilitätsbereichs* ermöglicht die Konvertierung in eine Nutzwertfunktion⁷. Es ist plausibel, dass bestimmte Aktionen einen besonders hohen Nutzen erzielen, wenn ihre Ausführung zeitlich gut in den Arbeitsablauf integriert ist. Dieselbe Aktion kann jedoch zu einem suboptimalen Zeitpunkt einen deutlich niedrigeren Nutzwert haben. Entsprechend soll die Präferenz des Clients und damit der Nutzen einer Anfrage ausschließlich auf den Zeitpunkt ihrer Ausführung reduziert werden. Um eine solche zeitabhängige Nutzenfunktion manuell zu definieren, kann der Client einen bevorzugten Zeitpunkt angeben, an dem die Ausführung der Anfrage einen maximalen Nutzen erzielt. Mit zunehmender Zeitabweichung reduziert sich der Nutzwert, dessen Rückgang auf unterschiedliche Weise (z.B. linear) modelliert werden kann. Der Nutzen kann außerdem durch die Angabe einer Deadline eingeschränkt werden, außerhalb derer die Umsetzung der Anfrage keinen Nutzen mehr erzielt. Die Übermittlung dieser Funktion⁸ ermöglicht die Verhandlung zur Umsetzung der Anfrage, ohne wiederholt mit dem Client kommunizieren zu müssen.

Für den Host ist eine Anfrage zur Ressourcennutzung i.d.R. mit einem Zusatzaufwand verbunden, ohne dass im Gegenzug dafür ein unmittelbarer Mehrwert erzielt wird. Ihre Bearbeitung entspricht der Lösung eines nicht-eigenen Ressourcenbedarfs, der möglicherweise weder dem eigenen Auftrag zuträglich ist noch zu dessen Erfüllung beiträgt. Stattdessen induziert die Teilung die Notwendigkeit zur Anpassung an die vorübergehende Nicht-Verfügbarkeit der Ressource und kann sogar zu Störungen, Verzögerungen oder Ineffizienzen des eigenen Arbeitsprozesses führen. Im ungünstigsten Fall kann sich die Teilung auch negativ auf die Zielerreichung des Hosts auswirken. Dementsprechend ist eine gründliche Evaluierung ihrer Auswirkungen erforderlich, bevor festgelegt wird ob, wann und wie einer Anfrage stattgegeben wird.

Eine Entscheidungsunterstützung soll sich demzufolge auch daran orientieren, negative Effekte für den Host möglichst niedrig zu halten und sich ggf. sogar symbiotische Effekte zunutze zu machen. Dazu sollen bestimmte Aspekte in der Lösungsfindung berücksichtigt werden, die die Präferenzen bzw. den Nutzwert des Hosts widerspiegeln. Zum einen sollte ein Lösungsplan die Ressource möglichst effizient zur Fähigkeitserbringung einsetzen. Dies schließt auch ein, dass die entstehenden Kosten (z.B. in Form von zurückgelegten Strecken, Dauer etc.) nicht

⁷ Anstelle einer manuellen Definition wäre auch eine automatisierte Ermittlung einer solchen Nutzwertfunktion (z.B. anhand einer Missionskostenmetrik oder eines Planungsprozesses) denkbar

⁸ Alternativ wäre es auch möglich, die Nutzwerte während des Verhandlungsprozesses inkrementell abzufragen. Dies wäre jedoch mit zusätzlichem Kommunikationsaufwand verbunden.

unnötigerweise erhöht werden. Zum anderen sollte der Entscheidungsprozess möglichst wenig zusätzlichen mentalen Aufwand für den Host verursachen. Eine weitere Überlegung ist daher, die Anfrage so zu integrieren, dass der resultierende Plan möglichst wenig vom ursprünglichen Referenzplan abweicht. Auf diese Weise soll der Lösungsvorschlag schnell nachvollziehbar bleiben und eine zügige Entscheidungsfindung bei geringer mentaler Zusatzlast ermöglichen.

Entsprechend wurden folgende Bewertungskriterien identifiziert:

- **Vorbereitungsaufwand:** Je schneller eine Aufgabe, welche die Nutzung einer Ressource erfordert, abgeschlossen werden kann, desto schneller steht diese Ressource für eine andere Aufgabe wieder zur Verfügung. Dies schließt auch eine Vorbereitungszeit ein, denn unter Umständen muss die Ressource erst in einen bestimmten Zustand überführt werden, bevor sie zur effektiven Nutzung bereit ist. Erst im Anschluss kann die eigentliche Nutzung der Ressource im Hinblick auf die Erreichung des gewünschten Ergebnisses erfolgen. Durch eine geschickte Verteilung der Aufgaben sowohl im Hinblick auf eine einzelne Ressource als auch über mehrere Ressourcen, können insbesondere diese Vorbereitungszeiten reduziert werden.
- **Verzögerung:** Sowohl infolge der angefragten Ressourcennutzung als auch aufgrund zeitlicher Abhängigkeiten können Verzögerungen nachfolgender Aufgaben entstehen, die den Abschluss des Arbeitsprozesses zeitlich nach hinten schieben. Insbesondere in zeitkritischen Situationen kann dies Kosten erhöhen oder sogar die Zielerreichung selbst gefährden. Entsprechend sollte eine Anfrage derart eingebunden werden, dass sie die Gesamtdauer möglichst wenig negativ beeinträchtigt.
- **Lastverteilung:** Stehen mehrere Ressourcen zur Verfügung, so sollte nicht nur die einzelne Ressource effizient genutzt werden, sondern das insgesamt verfügbare Ressourcen-Portfolio. Damit soll eine gleichmäßige Auslastung aller Ressourcen gefördert werden und insbesondere vermieden werden, dass einzelne Ressourcen ungenutzt bleiben, während andere stark ausgelastet sind.
- **Umstrukturierungsaufwand:** Eine Aufgabenumstrukturierung besitzt das Potenzial, die Integration einer Anfrage entweder überhaupt erst zu ermöglichen oder die Ressourcennutzung erheblich zu optimieren. Obwohl sich damit i.d.R. Vorteile in anderen Charakteristiken, wie z.B. dem Vorbereitungsaufwand ergeben können, bringt eine Umstrukturierung auch einen nicht zu vernachlässigenden Nachteil mit sich. Denn je stärker die Lösung den ursprünglichen Plan modifiziert, desto höher ist auch das Risiko für Probleme bei ihrer Nachvollziehbarkeit. Der Nutzer muss nun nicht nur die Anfrage selbst und ihre mögliche Positionierung im Plan verstehen, sondern zusätzlich auch noch die Optimierungen. Außerdem können sich solche Umstrukturierungen auch noch im späteren Verlauf negativ auf das Situationsbewusstsein auswirken, da sie nicht vom Nutzer selbst erarbeitet wurden. Ziel soll daher sein, Aufgabenumstrukturierungen zu vermeiden, wenn sie keinen entsprechenden Mehrwert liefern.

3.7.3.3. Vergleich der Optionen

Um die Pläne hinsichtlich dieser Kriterien miteinander vergleichen zu können, wird ein entsprechendes Vergleichsverfahren benötigt. Ein Plan ist dabei eindeutig besser, wenn er einen anderen Plan in allen Kriterien überwiegt. Schwieriger wird es, wenn ein Plan in einem Kriterium besser, dafür aber in einem anderen schlechter ist. Eine weitere Herausforderung ergibt sich, wenn diese Kriterien im Allgemeinen nicht vergleichbar sind, weil sie z.B. unterschiedliche Dimensionen haben, die nicht ineinander transformiert werden können. In diesem Fall bedarf es entweder einer hierarchischen Entscheidung, welches dieser Kriterien die anderen überwiegt und primär für einen Vergleich herangezogen werden soll, oder es bedarf einer Methode, um mehrere Kriterien gleichermaßen zu berücksichtigen. Die *Multikriterielle Entscheidungsanalyse* (engl. Multi Criteria Decision Analysis – MCDA) untersucht Entscheidungsprobleme, bei denen mehrerer Kriterien Berücksichtigung finden sollen, die nicht unbedingt miteinander vergleichbar sind (Geldermann und Lerche 2014). Bekannte Methoden sind z.B. *VIKOR* (Opricovic und Tzeng 2004), *PROMETHEE* (Vincke und Brans 1985) oder *TOPSIS* (Tzeng und Huang 2011).

Die TOPSIS-Methode (engl. *Technique for Order of Preference by Similarity to Ideal Solution*) (Tzeng und Huang 2011) ermöglicht den Vergleich von Optionen anhand mehrerer Kriterien über einen graphischen Ansatz. Bei n zu bewertenden Kriterien wird jede Alternative als ein Punkt in einem n -dimensionalen Raum dargestellt, der durch die jeweiligen Werte in diesen Kriterien definiert ist (siehe Abbildung 3-9). Durch die Bestimmung des besten und des schlechtesten Wertes, der in allen Kriterien und über alle Alternativen hinweg erreicht werden kann, lassen sich ein positives (engl. *Positive Ideal Solution*) und ein negatives Optimum (engl. *Negative Ideal Solution*) ableiten. Diese können ggf. nur hypothetische Extrema sein und müssen nicht unbedingt eine tatsächlich vorhandene Option aus dem Auswertepool repräsentieren. Sie können wie die zu bewertenden Optionen im n -dimensionalen Kriterienraum dargestellt werden und bilden damit die graphische Grenze, die das Set von Alternativen umschließt. Der TOPSIS-Wert jeder Alternative ergibt sich aus der Ähnlichkeit zur schlechtesten Lösung $s_{w,i}$. Er wird über ein Verhältnis der geometrischen Abstände zum positiven $d_{p,i}$ und negativen Optimum $d_{n,i}$ berechnet und liegt zwischen null und eins.

$$s_{w,i} = \frac{d_{n,i}}{d_{n,i} + d_{p,i}}$$

Ein Wert von eins ist genau dann erreicht, wenn diese Alternative in allen Kriterien den besten Wert erreicht ($d_{p,i} = 0$) und somit mit dem positiven Optimum zusammenfällt. Umgekehrt bedeutet ein Wert von Null, dass diese Alternative das negative Optimum darstellt ($d_{n,i} = 0$). D.h. je höherer der Wert ausfällt, desto besser schneiden die jeweiligen Alternativen im Vergleich zu den anderen ab. Hierbei ist zu beachten, dass der ermittelte TOPSIS-Wert einer Alternative stets in Relation zu allen anderen im Auswertepool befindlichen Alternativen

betrachtet werden muss und kein absolutes Qualitätsmaß darstellt. So kann eine Alternative trotz eines guten TOPSIS-Werts auch objektiv schlecht sein, weil es einfach keine vorzuziehenden Alternativen gibt.

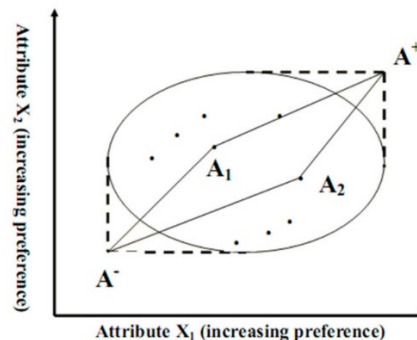


Abbildung 3-9 Graphische Visualisierung der TOPSIS Methode (Tzeng und Huang 2011)

3.7.4. Mensch-Agent Interaktion

Während in den vorangegangenen Abschnitten die Ansätze zur technischen Lösungsgenerierung präsentiert wurden, setzt sich der nachfolgende Abschnitt mit der Interaktion zwischen dem Menschen und dem Planungsagenten auseinander. Da der Planungsagent hinsichtlich einer Unterstützung zur Lösung des Problems der gemeinsamen Ressourcennutzung eingesetzt werden soll, ist ein zentraler Aspekt die Präsentation des Lösungsplans auf eine Anfrage.

3.7.4.1. Mixed-Initiative Intervention

Der Mensch verfügt über ein mentales Modell, mit dem er seinen Arbeitsprozess plant und über das er sich die Auswirkungen einer Ressourcennutzung ermittelt. Zu den Schwächen der menschlichen Planung zählen nach der MABA-MABA-Liste eine ungenaue Berechnung und eine lange Planungsdauer. Insbesondere unter Zeitdruck kann dies auf Planungsungenauigkeiten hinauslaufen, die sich wiederum schädlich auf die Plan-Qualität auswirken. Eine Stärke von Automation liegt darin, in deutlich kürzerer Zeit einen Plan zu entwickeln, der im Rahmen des genutzten Modells in sich konsistent und genau ist. Mit einem guten Modell kann man mit maschineller Planung also in relativ kurzer Zeit einen brauchbaren Plan entwickeln. Doch auch ein gutes Modell ist für gewöhnlich nie vollständig. Ein Nachteil von automatisierter Planung ist die starre Berücksichtigung der immer gleichen Parameter. Was einer Automation i.d.R. fehlt ist der Überblick auf das Gesamtbild, das auch der Mensch in seinem mentalen Modell bei der Planung einbezieht.

Da sich ein *Mixed-Initiative* Gedanke bereits in ähnlichen Applikationen bewährt hat (Finzi und Orlandini 2005; Ferguson et al. 1996; Strenzke und Schulte 2011; Schmitt et al. 2017) soll auch

hier ein Ansatz zur bidirektionalen Verhandlung der Lösung verfolgt werden, in der jedem Partner, also sowohl dem Nutzer als auch dem Agenten die Möglichkeit gegeben wird, seine individuellen Stärken in den Planungsprozess einzubringen. Dabei erfolgt eine Initiierung des Dialogs zur Beantwortung einer Anfrage durch den Planungsagenten. Der Mensch kann das Problem, respektive dessen Lösung, dann mit dem Agenten verhandeln und entsprechend seinen Vorstellungen lenken. Dazu kann er die Planung entsprechend des Gesamtüberblicks koordinieren und intervenieren, wenn Faktoren nicht berücksichtigt oder unterrepräsentiert sind.

3.7.4.2. Interventionsstufen

Die Mixed-Initiative Intervention ist entsprechend der von Onken und Schulte (2010) formulierten Regeln für Assistenzsysteme skaliert. Im Folgenden sollen daher Überlegungen zu den verschiedenen Formen der Unterstützung diskutiert werden.

- **Aufmerksamkeitslenkung:** Da das Ressourcenproblem in der vorliegenden Problemstellung erst durch den Bedarf eines anderen Nutzers eingeleitet wird, ist auch das zugrundeliegende Problem fremdinitiiert. Es liegt also kein Problem vor, welches schleichend entstehen und unbemerkt bleiben kann oder ohne jeglichen Hinweis identifiziert und behoben werden kann. Stattdessen entsteht das Problem durch das Herantragen einer Anfrage zur Ressourcennutzung an den Host. Damit ergibt sich die Notwendigkeit des Hinweisens auf das Problem, da es anderweitig nicht erkannt werden kann⁹. Da die Ressourcennutzung durch den Planungsagenten geplant und überwacht wird, kann dieser das potenzielle Zustandekommen eines Problems, also der überschneidenden Ressourcennutzung im Zusammenhang mit der Anfrage bereits vor einer Bearbeitung der Anfrage erkennen und darauf aufmerksam machen.
- **Aufgabenvereinfachung:** Eine Unterstützung der Entscheidungsfindung soll hierbei auf zwei Stufen erfolgen:
 1. *Aufzeigen direkter und indirekter Auswirkungen:* Direkte Auswirkungen beziehen sich dabei auf die unmittelbaren Folgen in Bezug auf die Ressourcennutzung, wie bspw. der Zeitraum, in dem eine Ressource aufgrund der Fremdnutzung nicht verfügbar ist, oder Effekte auf den Status der Ressource. Unter indirekten Auswirkungen sollen dagegen mittelbare Auswirkungen auf eine bereits geplante Ressourcennutzung verstanden werden, die nicht als direkte Folge ersichtlich sind, sondern die erst mit einer gewissen zeitlichen Verzögerung eintreten. Dazu können z.B. Verzögerungen oder Einschränkungen der nachfolgenden Ressourcennutzung

⁹ Ebenso besteht die Möglichkeit, das Problem zurückzuhalten, wenn der Zeitpunkt unpassend ist und so lange keine unmittelbare Bearbeitung erforderlich ist. So kann das Problem ggf. zu einem günstigeren Zeitpunkt eingesteuert werden.

sowie Effekte auf einen späteren Status der Ressource zählen. Hierbei ist die Planungsfähigkeit eines Systems essenzielle Voraussetzung, um in der Zukunft liegende Probleme vorab erkennen und lösen zu können.

2. *Vorschlag geeigneter Lösungen:* Um den Entscheidungsprozess besonders in stark beanspruchenden Situationen zu beschleunigen bzw. zu unterstützen, sollen dem Nutzer mögliche Lösungen bereitgestellt werden. Erstens sollen dem Nutzer dadurch günstige Handlungsoptionen gegeben werden, aus denen er im besten Fall nur noch auswählen muss. Dadurch reduziert sich ggf. der Lösungsraum, den der Nutzer für sich evaluieren muss. Voraussetzung hierfür ist jedoch einerseits, dass der Planungsagent in der Lage ist, alternative Lösungen gegeneinander vergleichen zu können, um günstige Lösungen zu selektieren. Andererseits soll dieser Auswahlprozess dem des Nutzers bestmöglich nahekommen, damit dieser von den vorgeschlagenen Handlungsoptionen nicht irritiert wird. Zweitens soll damit der Implementierungsaufwand reduziert werden. Wenn eine passende Lösung lediglich bestätigt werden muss und anschließend automatisiert umgesetzt wird, erspart dies den Aufwand ihrer manuellen Umsetzung.
- **Aufgabenübernahme:** Die automatische Übernahme einer Aufgabe ist in vielen Bereichen, insbesondere in sicherheitsrelevanten Systemen und zur Abwehr schwerwiegender Folgen sinnvoll. Dennoch eignet sich eine automatisierte Übernahme nicht pauschal für alle Aufgaben, die maschinell unterstützt werden können. Eine Aufgabenübernahme sollte stets das letzte der zu ergreifenden Mittel eines Assistenzsystems sein. Der Fakt des Eintretens schließt daher auf eine wiederholte Vernachlässigung des Problems, z.B. aufgrund einer starken mentalen Beanspruchung. Eine Aufgabenübernahme kann jedoch insbesondere bei unzureichender Transparenz einen negativen Einfluss auf das Situationsbewusstsein haben und die mentale Beanspruchung des Nutzers abermals erhöhen. Es sollte daher stets zwischen der Kritikalität der Situation und möglichen Effekten auf das Situationsbewusstsein sowie die Beanspruchung des Nutzers abgewogen werden. Im Zuge dieser Arbeit wurde auf eine Übernahme der Aufgabe und damit eine automatisierte Einbindung einer angefragten Ressourcennutzung verzichtet, da die Kritikalität nicht als ausreichend hoch bewertet wurde, um mögliche Nachteile zu rechtfertigen. Auch da sich das Konzept auf eine hierarchische Struktur stützt, soll der Host Entscheidungsträger über jede Fremdnutzung einer Ressource bleiben. Demnach soll diese Entscheidung auch nicht durch die Assistenzfunktion getroffen werden. Da nicht nur festgelegt wird, ob eine Fremdnutzung der Ressource gewährt wird, sondern vor Allem wann und wie diese durchgeführt wird, könnte es sich auch im späteren Verlauf noch als störend auf die Missionserfüllung erweisen. Daher ist eine automatisierte Entscheidung über eine Anfrage ggf. nicht im unmittelbaren Interesse des Hosts.

4. Prototypische Implementierung

Der folgende Abschnitt beschreibt einen Ausschnitt zur Implementierung des beschriebenen Konzepts zur Anwendung auf die gemeinsame Nutzung und Ausplanung unbemannter Systeme. Es werden verschiedene Herangehensweisen zur Umsetzung beschrieben, die sowohl auf einem zentralisierten als auch auf einem dezentralisierten Multi-Agenten Planungsansatz beruhen. Ausführlichere Beschreibungen der prototypischen Implementierung finden sich in (Roth und Schulte 2021, 2022a; Carsten Meyer et al. 06.12.2019, 09.12.2020, 30.12.2021; Carsten Meyer et al. 14.09.2022).

4.1. Zentralisierte Multi-Agenten Planung

Im zentralisierten Ansatz erfolgt die Ermittlung des impliziten Ressourcenbedarfs aller Nutzer durch einen zentralen Planungsagenten. Dazu benötigt dieser die jeweiligen Missionsziele als Vorgabe für die logische Planung sowie individuell getätigte Planungsvorgaben. Sie gehen als Randbedingungen in den Schedulingprozess ein. Zur Entwicklung eines Plans für die Integration einer Anfrage wird diese als zusätzliche Randbedingung berücksichtigt. Entsprechend muss keine separate Koordinierung durchgeführt werden. Da hierbei maßgeblich die logische Planung den Beitrag zur MAP liefert (vgl. Planung von einem für mehrere Agenten aus Abschnitt 2.4.1.1), soll diese an dieser Stelle vertiefend betrachtet werden.

Zur Formulierung und Lösung des Multi-Agenten Planungsproblems wird die Planungssprache PDDL (Planning Domain Definition Language) (Ghallab et al. 1998) genutzt. Hierfür werden eine Domänen- und eine Problemdefinition, jeweils in einer separaten PDDL-Datei benötigt. Während die Domänendefinition ihre Gültigkeit behält solange sich die allgemeine Beschreibung der Umgebung nicht ändert, ist die Definition des Problems insbesondere bei der Beschreibung von dynamischen Situationen eher kurzlebig. Da sich der Zustand der beteiligten Elemente ändern kann, muss auch die Problemdefinition bei Änderung der Ausgangslage zyklisch aktualisiert werden.

4.1.1. Domänendefinition

Die Domäne definiert dabei eine Umgebung als Zustands-Transitions-System mitsamt aller Objekte, Eigenschaften, Aktionen und Funktionen, die innerhalb dessen auftreten können. Anhand der `:requirements` werden Bedingungen an den Solver gestellt, um zu gewährleisten, dass das formulierte Problem und der entsprechende Löser zueinander kompatibel sind. Hierbei ermöglicht bspw. `:typing` das Typisieren von Objekten, analog zur

Klassendefinition in der objektorientierten Programmierung und `:negative-preconditions` die Verwendung eines Nicht-Operators.

```
(define (domain map)
  (:requirements :typing :negative-preconditions ...))
```

Zur Beschreibung eines Multi-Agenten Systems werden Objekte angelegt, um die unbemannten Systeme als Ressourcen und ihre potenziellen Nutzer im Planungsprozess zu modellieren.

```
(:types
  agent - object
  user resource - agent
  aircraft vehicle - user
  uav ugv - resource
  location
  area
)
```

Für die unterschiedlichen Objekte werden Eigenschaften entsprechend ihres Wahrheitsgehalts (`true/false`) definiert, die z.T. auch mehrere Objekte miteinander verknüpfen.

```
(:predicates
  (is_corridor_from_to ?l - location ?f - area ?t - area)
  (is_in_area ?r - area ?l - location)
  (ac_airborne ?ac - aircraft)
  (ac_onground ?ac - aircraft)
  (ac_at ?ac - aircraft ?l - location)
  (ac_in_area ?ac - aircraft ?r - area)
  (is_landingpoint ?l - location)
  (is_reconnoitered ?f - location ?t - location)
  ...
)
```

Funktionen ermöglichen die Verwendung numerischer Werte innerhalb des Lösungsprozesses. Um das Problem entsprechend einer definierten Kostenfunktion zu lösen, wird bspw. die Funktion `total-cost` definiert, die später dynamisch befüllt wird. Andererseits können sie zur Definition einer numerischen Eigenschaft dienen, um bspw. auf die Distanz zwischen zwei Punkten zuzugreifen.

```
(:functions
  (total-cost)
  (dist ?f - location ?t - location)
)
```

Anschließend werden alle möglichen Aktionen definiert. Hierzu zählen bspw. vehikel-spezifische Aktionen, wie der Abflug- (`takeOff`) und Landevorgang (`land`), sowie der Transitflug (`flyTo`) für Luftfahrzeuge oder die Fahrt (`driveTo`) zu einem Zielpunkt für ein Bodenfahrzeug. Entsprechend der Fähigkeiten der unbemannten Systeme werden auch diese als Aktionen (z.B. die Aufklärung einer Route – `recon`) modelliert. Weiter sind missionsspezifische Aktionen, wie das Be- und Entladen eines Vehikels oder das Ein- und Ausfliegen von Missionsgebieten zu definieren. Dabei bestimmen die `:parameters` und `:preconditions`, ob eine Aktion anwendbar ist, welche Objekte dafür vorliegen müssen

und welche Eigenschaften diese ggf. aufweisen müssen. Die Auswirkungen der Durchführung einer entsprechenden Aktion werden in den `:effects` definiert. Sie können bspw. die Änderung von Eigenschaften hervorrufen oder den Wert einer Funktion verändern.

```
(:action flyto
  :parameters (
    ?ac - aircraft
    ?f - location
    ?t - location
    ?r - area)
  :precondition
  (and
    (ac_at ?ac ?f)
    (ac_airborne ?ac)
    (ac_in_area ?ac ?r)
    (is_in_area ?r ?t)
    (is_reconnoitered ?f ?t)
  )
  :effect
  (and
    (increase (total-cost) (dist ?f ?t))
    (ac_at ?ac ?t)
    (not (ac_at ?ac ?f))
  )
)
```

4.1.2. Problemdefinition

Mit der Problemdefinition wird das explizite Problem innerhalb der vorig definierten Domäne instanziiert.

```
(define problem map-mission)
(:domain map)
```

Dabei werden die Objekte, welche innerhalb des Planungsproblems existieren, der Initial- und der Zielzustand konkretisiert. Im Folgenden wird dies für eine exemplarische Multi-Agenten Mission gezeigt, bei der ein Hubschrauber und eine Patrouille eine Landezone erreichen und ihre individuellen Anfahrts- bzw. Anflugrouten durch ein UAV aufgeklärt werden sollen. Entsprechend werden die Objekte des spezifisch zu lösenden Planungsproblems definiert und den Typen aus der Domänendefinition zugewiesen.

```
(:objects
  HC_Position Patrol_Position UAV_Position Corridor Landingpoint ... - location
  HC - aircraft
  Patrol - vehicle
  UAV - uav
  noarea HOA - area
)
```

Mit der Initialisierung `:init` wird der Ausgangszustand des Planungsproblems definiert. Dabei werden die initialen Eigenschaften der am Problem beteiligten Objekte vorgegeben und die Funktionen mit numerischen Werten befüllt. Dabei wird die Kostenfunktion zunächst auf null gesetzt und die Distanzfunktion entsprechend der Start- und Endpunkte befüllt.

```

(:init
  (= (total-cost) 0)
  (= (dist HC_Position Corridor) 2323)
  (= (dist Corridor Landingpoint) 15734)
  (= (dist Patrol_Position Landingpoint) 9366)
  (= (dist UAV_Position Corridor) 1274)

  ...
  (is_in_area noarea Corridor)
  (is_in_area HOA Corridor)
  (is_corridor_from_to Corridor noarea HOA)
  (is_landingpoint Landingpoint)
  (ac_in_area HC noarea)
  (ac_in_area UAV HOA)
  (ac_at HC HC_Position)
  (ac_at UAV UAV_Position)
  (ac_airborne HC)
  (ac_airborne UAV)
)

```

Nachdem der Ausgangszustand festgelegt wurde, wird über `:goal` der Zielzustand in Form der zu erreichenden Eigenschaften definiert, die durch das Missionsziel oder ein Zwischenziel vorgegeben werden.

```

(:goal
  (and
    (ac_at HC Landingpoint)
    (ac_onground HC)
    (v_at Patrol Landingpoint)
  )
)

```

Über die Vorgabe einer entsprechenden Metrik orientiert sich der Löser daran, eine Lösung zu ermitteln, die die vorgegebene Kostenfunktion `total-cost` minimiert.

```

(:metric minimize (total-cost))

```

4.1.3. Lösung

Anhand dieser beiden Definitionen kann mittels eines PDDL-Solvers eine Lösung ermittelt werden, die alle zur Zielerreichung notwendigen Aufgaben umfasst und beide Missionsziele berücksichtigt. Da durch die standardisierte Formulierung der Lösungsprozess vom Planungsproblem unabhängig ist, können prinzipiell unterschiedliche Löser herangezogen werden. Jedoch unterscheiden sie sich i.d.R. maßgeblich in ihrer Lösungsgeschwindigkeit, der Ressourcennutzung oder der Anwendbarkeit auf unterschiedliche Problemarten. Beispiele sind u.a. *MAPlan* (Fišer et al. 2015), *LPG-TD* (Gerevini et al. 2004) oder *SMTPlan+* (Cashmore et al. 2016). Für das hier vorliegende Problem hat sich *LDP-TD* als am geeignetsten herausgestellt, da er alle Voraussetzungen unterstützt und eine zügige Lösungsgeschwindigkeit vorweisen kann, die für eine Echtzeit-Planungsfähigkeit notwendig ist. Die Lösung stellt dann eine geordnete Abfolge der Aktionen inkl. der betreffenden Objekte dar.

```
0: (FLYTO HC HC_POSITION CORRIDOR NOAREA)
1: (FLYTO UAV UAV_POSITION CORRIDOR NOAREA)
2: (RECONROUTE UAV CORRIDOR LANDINGPOINT HOA)
3: (FLYTO UAV LANDINGPOINT PATROL_POSITION NOAREA)
4: (CROSSCORRIDOR HC CORRIDOR NOAREA HOA)
5: (FLYTO HC CORRIDOR AP_ORANGE HOA)
6: (RECONROUTE UAV PATROL_POSITION LANDINGPOINT HOA)
7: (DRIVETO PATROL PATROL_POSITION LANDINGPOINT)
8: (LAND HC LANDINGPOINT)
```

4.2. Dezentralisierte Multi-Agenten Planung

Im dezentralisierten Ansatz erfolgt eine unabhängige Ermittlung des jeweiligen Ressourcenbedarfs der Nutzer durch individuelle Planungsagenten. Entsprechend benötigt jeder dieser Planer zunächst nur das eigene Planungsproblem zur logischen Planung, welche analog zur zentralisierten Planung über ein PDDL-Planungsproblem erfolgt. Aufgrund der detaillierten Beschreibung im vorangegangenen Abschnitt, soll die dezentrale logische Planung an dieser Stelle nicht wiederholt werden. Planungsvorgaben, die nur den eigenen Planungsprozess betreffen, werden als interne Randbedingungen beim Scheduling berücksichtigt und müssen nicht untereinander kommuniziert werden. Im Unterschied zum zentralisierten Ansatz wird hierbei das fremde Planungsproblem nicht geteilt. Entsprechend berücksichtigt auch eine Lösung den impliziten Ressourcenbedarf des anderen Planungsprozesses nicht.

Erst Planungsvorgaben, die aus einem anderen Planungsprozess stammen und den eigenen betreffen (hier formuliert durch Anfragen zur Nutzung gemeinsamer Ressourcen) initiieren einen Koordinierungsprozess. Analog zum zentralisierten Ansatz wird die Anfrage dabei als Randbedingung in einem erneuten Schedulingprozess berücksichtigt, um Lösungen zu ihrer Integration zu ermitteln. Da hierbei maßgeblich der Koordinierungsprozess zur MAP beiträgt (vgl. Planung von mehreren für mehrere Agenten bzw. verteilte Planung aus Abschnitt 2.4.1.1), soll der zugehörige Schedulingprozess näher erläutert werden.

Hierfür wird der CPLEX-Scheduler (IBM 1987) und die zugehörige C++ Schnittstelle verwendet. Dabei handelt es sich um ein Tool zur Lösung linearer Optimierungsprobleme über das Simplex-Verfahren. Der folgende Abschnitt beschreibt die Modellierung des Scheduling-Prozesses zur Verteilung der Aufgaben auf mehrere UAVs sowie die Integration von Aufgaben, die aus einem externen Planungsprozess angefragt werden. Indem der Agent befähigt wird, die für eine Ressource getätigten Planungsaktivitäten sowie ihren Ausführungsstand (d.h. den Planfortschritt) zu beobachten, kann dieser einen Referenzplan zur aktuellen Ausplanung der unbemannten Systeme führen, der als Basis zur Erzeugung von Lösungen dient. Entsprechend muss unterschieden werden, ob es sich bei einer Aufgabe um eine Planungsaufgabe handelt, die durch einen Nutzer vorgegeben wurde (explizit), oder ob sie sich aus dem vorangegangenen

Planungsprozess als zukünftiger Ressourcenbedarf (implizit) ergeben hat. Zur einfacheren Beschreibung soll die Unterscheidung im Folgenden jedoch größtenteils vernachlässigt werden.

4.2.1. Aufsetzen des Schedulers

Aufgaben werden durch *IloIntervalvariablen* (`IloIntervalVar`) repräsentiert, die für jedes UAV einer *Sequenz* (`IloIntervalVarSequenceVar`) zugeordnet werden. Prinzipiell wird somit jedem UAV jeder Task zugeordnet, den es potenziell ausführen könnte. Im Rahmen des CPLEX-Lösungsprozesses werden diese zur Suche der besten Lösung dann unter Berücksichtigung vorgegebener Randbedingungen entweder auf `present` oder `absent` gesetzt. Weiterhin wird mit einem zweidimensionalen *Array* (`IloIntervalVarArray2`) eine Übersicht für alle Aufgaben und alle UAVs geführt.

```
IloIntervalVar task;
// for each uav add each task to:
IloIntervalSequenceVar uavSequence[taskIndex];

IloIntervalVarArray2 allTasks[uavIndex][taskIndex];
```

Sämtliche Randbedingungen werden im `IloModel` hinterlegt und beim Lösungsprozess berücksichtigt. Folgender Abschnitt garantiert z.B., dass ein Auftrag innerhalb einer Lösung nicht mehrfach bei unterschiedlichen UAVs auftaucht.

```
IloEnv env;
IloModel model(env);

IloIntExpr limit(env, 0);
limit += IloPresenceOf(env, task);
model.add(limit <= 1);
```

Weitere Randbedingungen können über `IloConstraints` definiert werden. Dazu zählen z.B. Reihenfolgebedingungen, damit eine bestimmte Intervallvariable innerhalb einer Sequenz als erstes (`IloFirst`), vor einer anderen (`IloBefore`) oder unmittelbar vor einer anderen (`IloPrev`) Intervallvariable eingeordnet wird. Der folgende Abschnitt zeigt, wie die Randbedingungen formuliert wurden, um eine spezifische Aufgabe einem bestimmten UAV zuzuordnen und die Reihenfolge zweier Aufgaben innerhalb einer UAV-Auftragssequenz vorzugeben.

```
IloConstraint constraint;

// constraint to assign a specific task to a specific uav
constraint = IloPresenceOf(env, allTasks[uavIndex][taskIndex]);

// constraint to order tasks within the same uav sequence
constraint = IloBefore(env, uavSequence, task1, task2);

model.add(constraint);
```

Maßgeblich für die Bestimmung der Reihenfolge von Aufgaben innerhalb einer Aufgabensequenz soll die sinnvolle Berücksichtigung der Transitionen zwischen ihnen sein. Entsprechend wird eine Transitionsmatrix aufgestellt und mit den Transitionenzeiten zwischen den jeweiligen Aufgaben befüllt. Über die Randbedingung `IloNoOverlap` wird sichergestellt, dass sich sowohl die Aufträge selbst als auch die Transitionen zwischen ihnen innerhalb einer UAV-Auftragssequenz nicht überlappen dürfen.

```
// setup transition matrix
IloTransitionDistance transitionCostMatrix[taskIndex1][taskIndex2]; // contains
the transition times from task1 to task2 in seconds
model.add(IloNoOverlap(env, uavSequence, transitionCostMatrix));
```

Anschließend folgt das Aufsetzen der Optimierungsfunktion, sodass eine Lösung die Transitionenzeiten zwischen den Aufgaben minimiert. Dazu wird die Funktion mit den Transitionskosten befüllt, die zwischen einer Aufgabe und ihrer Folgeaufgabe anfallen. Hierbei ist zu beachten, dass die dynamische Auswertung der Randbedingung `IloTypeOfNext` dafür sorgt, dass die Transitionskosten nur dann Berücksichtigung finden, wenn die entsprechende Aufgabe präsent ist und ein Folgeauftrag existiert.

```
IloNumExpr objFunc(env, 0);
...
// for each task and each uav-tasksequence do
nextTaskIndex = IloTypeOfNext(taskSequence, task)
objFunc += transitionCostMatrix[taskIndex][nextTaskIndex]
...
IloObjective objective = IloMinimize(env, objFunc);
model.add(objective);
```

4.2.2. Integration der Anfrage

Um eine Anfrage im Scheduling-Prozess zu berücksichtigen, wird diese analog zu den anderen Aufgaben als Intervallvariable dargestellt. Dabei werden Anfragen zur temporären Kontrolle und angefragte Aufträge analog behandelt, da sie jeweils die Ressource UAV für einen entsprechenden Zeitraum in Anspruch nehmen. Dieser ist entweder durch den Client vorgegeben oder kann aus der angefragten Aufgabe ermittelt werden. Die Berechnung der Transitionenzeiten erfolgt auf Basis eines Handover-Punkts bzw. des Startpunkts des Auftrags. Die Integration der Anfrage in den Referenzplan wurde dabei über drei Varianten modelliert.

4.2.2.1. Variante 1: Integration über Priorität

In Variante 1 wird eine Randbedingung zur Integration der Anfrage entsprechend einer angegebenen Priorität formuliert. Eine hoch priorisierte Anfrage soll dabei möglichst an vorderster, eine niedrig priorisierte Anfrage an hinterster Stelle in die Aufgabensequenz

einsortiert werden. Für eine mittlere Priorität soll eine möglichst optimale Integration ohne zusätzliche Randbedingungen erfolgen.

```
//for high priority
constraint = IloFirst(env, uavSequence, requestedTask);

// for low priority
constraint = IloLast(env, uavSequence, requestedTask);
```

4.2.2.2. Variante 2: Integration über Kostenmetrik

In Variante 2 wird die Anfrage unter Berücksichtigung eines angegebenen Zeitbereichs integriert. Anhand einer Stufenfunktion werden dazu Randbedingungen formuliert, die den Start und das Ende der Ausführung innerhalb eines definierten Zeitfensters beschränken.

```
// Constraint that the requested task starts between the earliest and the latest
begin time
IloNumArray timeArray(env);
timeArray.add((requestedTask.earliestBegin - timeNow).total_seconds());
timeArray.add((requestedTask.latestBegin - timeNow).total_seconds());
IloNumArray valueArray(env);
valueArray.add(0);
valueArray.add(1);
valueArray.add(0);
IloNumToNumStepFunction f(env);
f.setSteps(timeArray, valueArray);
constraint = IloForbidStart(env, requestedTask, f);
```

Weiter wird die Optimierungsfunktion derart modifiziert, dass sich die Kosten erhöhen, je weiter die Anfrage von der gewünschten Zeit abweicht. Alternativ ließe sich hierfür auch eine komplexere Nutzwertfunktion anwenden. Wichtig bleibt dabei, dass Dimension und Skalierung an die Kostenmetrik angepasst sein müssen.

```
auto delay = IloStartOf(requestedTask) - requestedStart;
objFunc += IloMax(delay, -delay);
```

Diese Variante nutzt die direkte Kompensation von Kosten und Nutzen durch Einspeisung der Nutzwertfunktion des Clients in die Kostenmetrik des Schedulers. Da somit anfallende Missionskosten direkt durch den abfallenden Nutzen ausgeglichen werden können, lässt sich durch einen einzelnen Schedulingprozess eine optimierte Lösung finden. Im Rahmen dieser Lösung ist das beste unbemannte System sowie der beste Zeitpunkt der Integration im Sinne der Optimierungsmetrik ermittelt. Eine wesentliche Voraussetzung für die Anwendbarkeit dieses Ansatzes ist jedoch, dass Nutzwert-Funktion und Kostenmetrik gleichdimensioniert sind, damit Kosten und Nutzen gegeneinander verrechnet werden können.

4.2.2.3. Variante 3: Integration über multikriterielle Entscheidung

Variante 3 verzichtet auf die Modifikation der Kostenmetrik und ist damit nicht auf die Vergleichbarkeit von Nutzwertfunktion und Kostenmetrik angewiesen. Stattdessen werden unabhängig vom Nutzwert der Anfrage verschiedene Optionen generiert und anschließend über eine multikriterielle TOPSIS-Analyse bewertet. Dabei erfolgt ein Ranking der Lösungen entsprechend der Vor- und Nachteile hinsichtlich der Kosten bzw. des Nutzwerts sowohl für den Host als auch den Client. Die verschiedenen Optionen sollen je nach Integrationsmodus mehr oder weniger an der Beibehaltung aller bereits geplanten Aufgaben orientiert sein. Dies wird realisiert durch die Vorgabe entsprechender Randbedingungen, die im Lösungsprozess berücksichtigt werden müssen und damit die Lösungsmenge einschränken. Mit ihnen kann die Zuordnung zu einem UAV (assignment-constraints) sowie ihre Reihenfolge in der Aufgabensequenz (sequence-constraints) vorgegeben werden.

```
// assignment-constraint according to the reference plan
uavIndex = referenceTask.uavIndex;
constraint = IloPresenceOf(env, tasksOfAllUAVs[uavIndex][taskIndex]);
```

```
// sequence-constraint according to the reference plan
if(referenceTask1.beginTime < referenceTask2.beginTime)
    constraint = IloBefore(env, uavSequence, task1, task2);
else
    constraint = IloBefore(env, uavSequence, task2, task1);
```

Mit dem *konventionellen Integrationsmodus* werden Optionen erzeugt, die die Anfrage unterschiedlichen Positionen innerhalb der UAV-Auftragssequenzen des Referenzplans ohne zusätzliche Umstrukturierung zuordnet. Dazu werden die Randbedingungen derart formuliert, dass Zuordnung und Reihenfolge aller bereits geplanten Aufgaben beibehalten werden müssen. Die Abdeckung aller Möglichkeiten, also auch solcher, die die unbemannten Systeme ggf. ineffizienter einsetzen als andere Lösungen, dient insbesondere der Vollständigkeit des Sets von Optionen, das dem Host später zur Entscheidungsfindung zur Verfügung gestellt wird.

Mit dem *optimierenden Integrationsmodus* sollen sich mögliche Verbesserungen im Referenzplan infolge einer Umstrukturierung von Aufgaben zunutze gemacht werden. Dazu werden die Randbedingungen für Aufträge desjenigen UAV abgeschwächt, dem das angefragte Planelement zugewiesen wird. Für Lösungen, die ein Vertauschen von Aufgaben innerhalb der Auftragssequenz erlauben sollen, werden die Randbedingungen zur Beibehaltung der Reihenfolge aufgehoben. Für Lösungen, die einen potenziellen Transfer von Aufgaben an ein anderes UAV berücksichtigen sollen, werden die Randbedingungen zur Beibehaltung der Zuweisung aufgehoben. Da beide Ansätze die Anzahl der möglichen Permutationen jedoch

schnell erhöhen, wird zur Reduzierung des Rechenaufwands jeweils nur eine Lösung für jedes unbemannte System ermittelt¹⁰.

Für den *impliziten Integrationsmodus* wird die Anfrage den eingangs erwähnten impliziten Aufgaben zugeordnet. Über die Randbedingungen, dass implizite Aufgaben immer nach expliziten Aufgaben eingeordnet werden müssen, wird die Anfrage damit automatisch in den impliziten Teil der Lösung einsortiert und kann dort durch den Lösungsprozess frei platziert werden.

Nachdem alle relevanten Randbedingungen zum `IloModel` hinzugefügt wurden, kann schließlich der *CP-Optimizer* mit dem `IloModel` initialisiert und der Lösungsprozess gestartet werden. Für jede Variation in der Anfrageposition und des Integrationsmodus muss mit den zugehörigen Randbedingungen ein eigener Scheduling-Prozess durchgeführt werden. Entsprechend ergeben sich die unterschiedlichen Lösungen.

```
IloCP cp(model);
...
cp.solve();
```

4.2.3. Multikriterielle Plan-Bewertung

Die Lösungspläne werden anschließend anhand der im Konzept identifizierten Kriterien zur Bewertung der Plan-Qualität evaluiert. Dazu wird für jede Lösung in den gewählten Kriterien ausgewertet, welchen Effekt die Integration der Anfrage auf den für alle gleichermaßen gültigen Referenzplan hat. Dadurch wird erreicht, dass nur diejenigen Anteile der Lösungen miteinander verglichen werden, die als unmittelbare Folge der Integration der Anfrage resultieren. Die auszuwertenden Parameter wurden dabei so definiert, dass sie Werte in einer ähnlichen Dimension liefern. Sie ergeben alle einen positiven Wert, der umso kleiner ist, je besser der Plan in diesem Kriterium zu bewerten ist. D.h. ein kleiner Wert steht für eine hohe Qualität und umgekehrt. Die Bewertung und das Ranking der generierten Optionen erfolgten über die folgenden Schritte. Im ersten Schritt werden die im Konzept spezifizierten Charakteristiken für jede Lösung ausgewertet und quantifiziert.

```
effectOnUavCost = getUAVCost(solutionPlan) - getUAVCost(referencePlan);
effectOnHCPlanLength = getHCPlanLength(solutionPlan) -
getHCPlanLength(referencePlan);
affectedTasks = getAffectedTasks(solutionPlan, referencePlan)
effectOnUavTaskBalance = getUavTaskBalance(solutionPlan) -
getUavTaskBalance(referencePlan);
clientCost = abs((requestedTask.beginTime - requestedStart).total_seconds());
```

¹⁰ Die Ermittlung von Lösungen, die eine Umsortierung oder ein Übertragen von Aufträgen erlauben, sind jedoch nur dann sinnvoll, wenn das unbemannte System auch die entsprechende Anzahl an Aufträgen besitzt. Eine Lösung zur Abgabe von Aufgaben an ein anderes unbemanntes System ist z.B. nur dann sinnvoll, wenn wenigstens ein Auftrag vorhanden ist.

Dabei ergibt sich z.B. die Länge des Missionsplans aus der Zeitdifferenz zwischen Beginn des ersten und Abschluss des letzten Auftrags. Die UAV-Kosten berechnen sich durch Aufsummieren der Transitionszeiten und der Auftragslänge für sämtliche UAV-Aufträge.

```
hcPlanLength = (hcPlan.back().endTime -  
hcPlan.front().beginTime).total_seconds();
```

```
//for all uavTasks  
uavCost += uavTask.transitiontimeToTask + uavTask.duration;
```

Die Anzahl der von einer Umstrukturierung betroffenen Aufgaben ergibt sich durch den Vergleich mit den zugehörigen Aufträgen aus dem Referenzplan. Hat sich der in der Aufgabensequenz unmittelbar davor befindliche Auftrag geändert, so ist dieser Auftrag entweder direkt oder indirekt durch eine Aufgabenumstrukturierung beeinflusst.

```
// for each task in the solution (except for the inserted request), find the  
corresponding task in the reference plan and check if the previous task changed  
if(task.prevTaskId != referenceTask.prevTaskId)  
{  
    nrOfAffectedTasks++;  
}
```

Die Balance der Aufgabenverteilung unter den UAVs wird berechnet aus dem Durchschnitt aller Zeiträume, in denen ein UAV einen Auftrag durchführt, während ein anderes UAV keinen Auftrag besitzt.

```
// get the uav cost for each uav task sequence  
// for each task of UAV1  
costUAV1 += taskUAV1.transitiontimeToTask + taskUAV1.duration;  
...  
  
// calculate task balance  
uavTaskBalance = (abs(costUAV1 - costUAV2) + abs(costUAV1 - costUAV3)  
+abs(costUAV2 - costUAV3))/3.0;
```

In Schritt 2 werden jeweils die Charakteristiken des gleichen Typs für alle Lösungen eines Lösungssets zusammengenommen. Sie geben den möglichen Wertebereich der jeweiligen Charakteristik über alle Lösungen an.

```
// for all solution characteristics that belong to the same solution set do:  
allEffectsOnUavCost.push_back(solChar.effectOnUavCost);  
...  
allClientCosts.push_back(solChar.clientCost);
```

In Schritt 3 werden die gesammelten Charakteristiken gleichen Typs normalisiert, indem sie auf die Wurzel der summierten Quadrate aller Einzelwerte bezogen werden. Dabei besteht auch die Möglichkeit, einzelne Charakteristiken im Bewertungsprozess stärker zu gewichten als andere. In diesem Fall wurden aber alle Charakteristiken gleichgewichtet.

```

double tmp = 0;
for(const auto &el: characteristicsVector)
{
    tmp += pow(el, 2);
}
tmp = sqrt(tmp);

vector<double> normalizedCharVec;
for(const auto &el: characteristicsVector)
{
    normalizedCharVec.push_back(el/tmp);
}

```

Aus den gesammelten Charakteristiken werden in Schritt 4 die positive und die negative Ideallösung gebildet. Dazu werden für jede Charakteristik die jeweils schlechtesten und besten Werte ermittelt und daraus die zwei Kombinationen für den theoretisch besten und schlechtesten Fall generiert.

```

posOpt.effectOnUavCost = *std::min_element(allEffectsOnUavCost.begin(),
allEffectsOnUavCost.end());
...

negOpt.effectOnUavCost = *std::max_element(allEffectsOnUavCost.begin(),
allEffectsOnUavCost.end());
...

```

In Schritt 5 werden für jede Lösung zunächst jeweils die geometrischen Distanzen (L2-Norm) zur positiven und zur negativen Ideallösung ermittelt. Aus ihnen wird schließlich der TOPSIS-Wert als relative Nähe zur Ideallösung berechnet und bildet damit eine skalare Repräsentation der Plan-Qualität in den betrachteten Kriterien.

```

distToPosOpt = getDist(solChar, posOpt);
distToNegOpt = getDist(solChar, negOpt);

topsisValue = distToNegOpt / (distToPosOpt + distToNegOpt);

// mit
auto getDist = [](const SolutionCharacteristics &aP1, const
SolutionCharacteristics &aP2){
    return sqrt(pow(aP1.effectOnUavCost - aP2.effectOnUavCost, 2)
+ ...
+ pow(aP1.clientCost - aP2.clientCost, 2));
};

```

Die Optionen können, bspw. sortiert nach dem TOPSIS-Wert, dem Host schließlich zur Entscheidungsunterstützung vorgeschlagen werden. Ihre Visualisierung ermöglicht u.a. einen direkten Vergleich zwischen den verschiedenen Optionen und ihren Auswirkungen. Außerdem erlauben sie es dem Host, schnell zwischen mehreren Alternativen auszuwählen.

4.3. Modularer Aufbau zur dezentralisierten Planung

Der Wirkungskreis zwischen Client und Host wurde entsprechend der Variante 3 des dezentralisierten Ansatzes über die in Abbildung 4-1 dargestellten Softwaremodule geschlossen. Dabei wurden zum Großteil bestehende Softwaremodule aus den Projekten CASIMUS und MiRA-CA herangezogen, die zur Erbringung der konzeptionell beschriebenen Funktionalitäten modifiziert und erweitert wurden. Sie untergliedern sich entsprechend ihrer Funktion in Module zur Missionssimulation, zur Darstellung und Interaktion mit den menschlichen Nutzern, zur Planungsunterstützung sowie zur Aufbereitung, Verwaltung und Teilung der taktischen Lageinformationen. Sämtliche Programme sind in der Programmiersprache C++ unter Nutzung des Frameworks *Qt* entwickelt. Tabelle 4-1 zeigt eine Übersicht der Programme und ihrer jeweiligen Funktion im Netzwerkverbund.

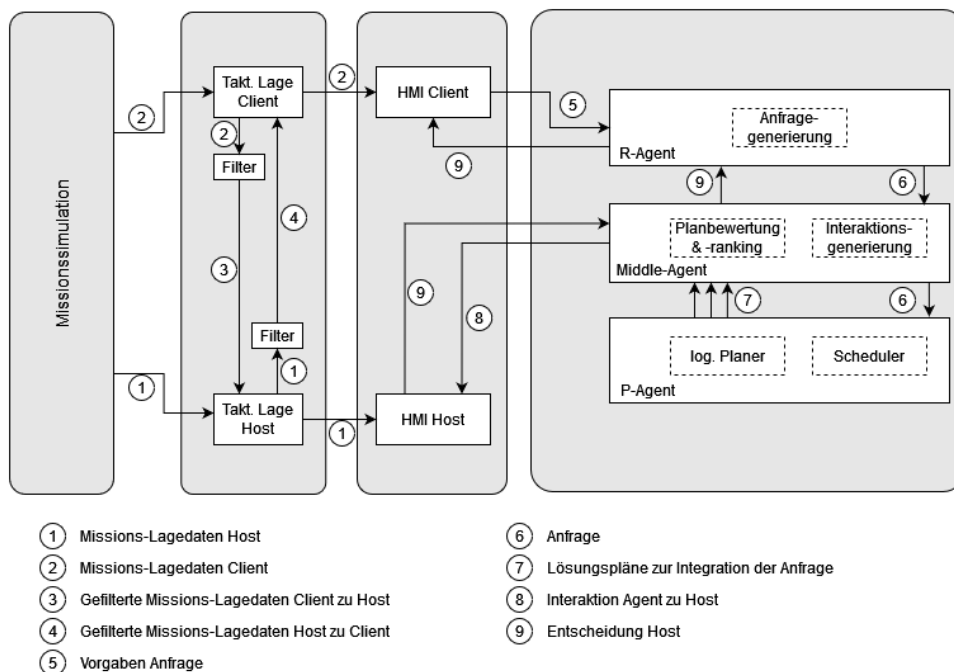


Abbildung 4-1 Modulschaubild Planungsframework

Die taktischen Lageinformationen für Host und Client werden jeweils in einer eigenen Instanz des Softwaremoduls *TacSit* gespeichert und verwaltet. Informationen und Änderungen zu dynamischen Einheiten aus dem Missionsgeschehen erfolgen durch Updates aus der Missionssimulation, die in Kapitel 5.2 im Detail beschrieben wird. Dabei stellt die Vernetzung im Informationsraum die Basis für den vernetzten UAV-Einsatz dar, um ein nutzerübergreifendes Lagebild zu erzeugen und eine effiziente Zusammenarbeit zu fördern. Außerdem wird es dem Host ermöglicht, seiner Überwachungspflicht über den fachgerechten Ressourceneinsatz nachzukommen. Abhängig vom Grad der Zusammenarbeit kann der Informationsaustausch allgemeine taktische Informationen, vehikelspezifische Informationen und missionspezifische Informationen umfassen. Dabei erfolgt vor dem Datenaustausch eine Filterung der Informationen durch den *TacSitFilter* entsprechend der Tabelle 4-2.

Tabelle 4-1 Soft- und Hardwareübersicht Planungsframework

Modulsystem	Programm	Rechner	Funktion
Tactical Situation	TacSit Host	Spreadserver	Verwaltung der taktischen Lage für die Mission des Hosts
Tactical Situation	TacSit Client	Planner	Verwaltung der taktischen Lage für die Mission des Clients
Tactical Situation	TacSitFilter Host	Spreadserver	Filterung der taktischen Daten zum Datenaustausch von Host zu Client
Tactical Situation	TacSitFilter Client	Planner	Filterung der taktischen Daten zum Datenaustausch von Client zu Host
HMI	MFDL	MFDL	Interface des Hosts zur Darstellung der takt. Lage und zur Interaktion
HMI	ClientScreen	ClientLaptop	Interface des Clients zur Darstellung der takt. Lage und zur Interaktion
Planning	P-Agent	Planner	Generierung von Lösungsplänen mittels log. Planung und Scheduling
Planning	Broker	Planner	Bewertung und Ranking der Lösungspläne, Generierung der Interaktion
Planning	R-Agent	ClientLaptop	Generierung von Anfragen

Tabelle 4-2 Übersicht geteilter taktischer Daten

Grad der Kooperation	Geteilte taktische Informationen
Agieren im gemeinsamen Missionsraum	Eigene Kräfte, gegnerische Kräfte, Points of Interest
Agieren im gemeinsamen Missionskontext	Lufträume, Flugkorridore
Agieren in gemeinsamer Mission	Flug-/Marschrouten, Missionsziele

Über die Softwaremodule der Mensch-Maschine-Schnittstellen (Human-Machine Interface – HMI) werden die Lageinformationen dargestellt und die geteilte UAV-Nutzung koordiniert. Das Interface des Clients dient dabei zur Initiierung einer Anfrage, die an das Planungsmodul geleitet wird. Über das Interface des Hosts werden die Anfrage und potenzielle Lösungen präsentiert. Eine detailliertere Beschreibung der Nutzerinterfaces erfolgt in Kapitel 5.4.

Das Planungsmodul ist entsprechend des Middle-Agent Ansatzes auf drei Agenten verteilt. Der Middle-Agent selbst ist auf Grundlage einer Broker-Architektur modelliert. Der *R-Agent* generiert Anfragen nach den Vorgaben des Clients und übermittelt sie zur Verhandlung an den Middle-Agent. Die Übermittlung einer Anfrage wird dabei immer manuell durch den Client initiiert. Hierzu kann der R-Agent über einen Planungsprozess auch den Bedarf des Clients an der geteilten Ressource ermitteln und ihn mit Vorschlägen zur Ressourcenanfrage unterstützen. Eine entsprechende Implementierung fand im Rahmen einer studentischen Arbeit statt. Für eine genauere Beschreibung sei auf Helbig (2022) verwiesen. Entsprechend beschränkt sich die folgende Modellierung auf die Planungsunterstützung für den Host. Nach der Verhandlung empfängt der R-Agent die Entscheidung vom Middle-Agent und kommuniziert das Ergebnis an den Client zurück. Im *P-Agent* sind die Prozesse verankert, um die Lösungspläne zur Integration einer Anfrage in den lokalen Missionsplan des Hosts zu generieren. Dazu hat er Zugriff auf die geplanten Aufgaben der unbemannten Systeme und verfügt über die Planungsfähigkeit zur Ermittlung zukünftigen Ressourcenbedarfs. Über einen

Schedulingprozess werden die verschiedenen Optionen zur Einbindung der Anfrage ermittelt. Der *Middle-Agent*¹¹ evaluiert und bewertet die resultierenden Lösungspläne entsprechend der multikriteriellen TOPSIS-Analyse unter Berücksichtigung des Nutzwerts für den Client und der entstehenden Missionskosten für den Host. Weiterhin generiert er die Interaktionen, um dem Host die Anfrage und ggf. potenzielle Lösungen zu kommunizieren.

Der Datenaustausch zwischen den Programmen erfolgt mittels *AnyCom* (Böhm und Schulte 2012), einem Framework zur Interprozesskommunikation, das am Institut für Flugsysteme entwickelt wurde. Tabelle 4-3 gibt einen Überblick über die verwendeten AnyCom Nachrichten und ihren Inhalt.

Tabelle 4-3 Nachrichtenübersicht Planungsframework

Nr	Nachricht	Inhalt
1	TacticalSituationMessage	Missions-Lagedaten Host (eigene Kräfte, feindliche Kräfte, Missionsgebiete, Missionsobjekte, ...)
2	TacticalSituationMessage	Missions-Lagedaten Client
3	TacticalSituationMessage	Gefilterte Missionslagedaten Client → Host
4	TacticalSituationMessage	Gefilterte Missionslagedaten Host → Client
5	ClientRequestMessage	Vorgaben Anfrage (Interoperabilitätslevel, Priorität, Dauer, Zeitbereich, ...)
6	PreprocessClientRequestMessage	Standardisierte Form der Anfrage
7	PlannerSolutionMessage	Lösungspläne (Aufgabensequenzen, die die Anfrage in den Referenzplan integrieren)
8	AssistantSystemDialogMessage	Textuelle Beschreibung der Anfrage und ggf. des Lösungsvorschlags sowie die Lösungen zur Darstellung im Interface
9	ASDResponseMessage	Entscheidung des Hosts und ggf. der gewählte Lösungsplan

¹¹ Dabei stellen *P-Agent* und *Middle-Agent* jeweils eine Weiterentwicklung der Programme *MIPlanner* und *MIController* von Schmitt (2021) dar.

5. Anwendung in MUM-T Forschungs-Simulationsumgebung

Die prototypische Umsetzung des Konzepts soll nun anhand eines spezifischen Anwendungsfalls konkretisiert und erprobt werden. Dazu betreibt das Institut für Flugsysteme einen Hubschrauber-Forschungssimulator, der als Versuchsträger zur Entwicklung und Erprobung prototypischer Lösungsansätze in den Bereichen Missionsautomatisierung und Pilotenassistenz. Dabei konzentrieren sich die Untersuchungen auf militärische Luftfahrtoperationen unter der Einsatzart Manned-Unmanned Teaming.

5.1. Manned-Unmanned Teaming

Um militärische Operationen hinsichtlich Geschwindigkeit, Effizienz, Sicherheit und Finanzierbarkeit zu verbessern, kommen vermehrt unbemannte Vehikel zum Einsatz. Als abgesetzte Plattformen liefern sie einen operationellen Mehrwert z.B. durch Aufklärung, Waffeneinsatz oder im elektronischen Kampf. Derzeit ist die Kontrolle eines einzelnen Systems jedoch mit hohem Personalaufwand für die Steuerung, Navigation und Systembedienung verbunden. Dabei sehen zukünftige Einsatzkonzepte eine Invertierung dieser Führungsspanne vor, bei der ein einzelner Operateur für mehrere unbemannte Systeme verantwortlich ist. Die Einführung von Automation erlaubt es, dass ein einzelner Operateur die gleichzeitige Führung mehrerer unbemannter Systeme übernehmen kann. Sheridan und Verplank (1978) haben hierfür den Begriff der *Leitenden Kontrolle* (engl. Supervisory Control) geprägt. Insbesondere um in Planungs-, Entscheidungs- und Problemlösungsangelegenheiten bedarfsweise intervenieren zu können aber auch zum Treffen ethischer Entscheidungen (z.B. beim Waffeneinsatz) wird der Menschen als Überwacher und Entscheider ein unverzichtbarer Bestandteil eines solchen Teams bleiben.

Manned-Unmanned-Teaming (MUM-T) (Brewer et al. 2019; Uhrmann et al. 2009) oder *Human-Machine Teaming* (Office of the Secretary of Defense 2018) beschreibt eine militärische Einsatzart, in der bemannte und unbemannte Vehikel in einem gemeinsamen Verbund eingesetzt werden. Dabei dient das bemannte System als Führungs-Plattform, von welchem die unbemannten Systeme individuell koordiniert werden. Die unbemannten Systeme nehmen somit die Funktion von Teammitgliedern ein, mit denen eine Zusammenarbeit analog zu bemannten Teams angestrebt wird. Dabei postuliert das Konzept die Positionierung der Führungsinstanz gemeinsam mit den unbemannten Systemen innerhalb des Situationsgeschehens. Hierdurch soll der Kommandant infolge eines besseren Lageüberblicks und der Nähe zum Geschehen ein gesteigertes Situationsbewusstsein und eine intensivere Teambindung erfahren. Außerdem erhöht sich aufgrund der lokalen Vernetzung die Robustheit

gegenüber Latenzeffekten, Bandbreitenbeschränkungen oder Störungen des Datenlinks¹². Insbesondere die Möglichkeit, potenzielle Feinde oder Gefahren frühzeitig zu erkennen und darauf reagieren zu können, verringert dabei das Risiko für das bemannte Führungsvehikel.

Im Kern befasst sich diese Arbeit mit der Ausweitung einer Einzel-Nutzer MUM-T Konstellation auf mehrere Nutzer, die sich in einem gemeinsamen, vernetzten Arbeitsumfeld befinden. Somit erweitert diese Arbeit bisherige Forschungsbestreben zur Kommandierung mehrerer unbemannter Systeme von einem bemannten Führungsvehikel aus, indem ihre Dienste weiteren Nutzern verfügbar gemacht werden. Im Kontext von Multi-User MUM-T bezieht sich die Forschungsfragestellung darauf, wie die Planung des Führungsvehikels und der unbemannten Systeme in einem MUM-T Verbund gestaltet werden kann unter der Maßgabe, dass Planungselemente zusätzlicher Nutzer berücksichtigt werden sollen.

5.2. Simulationsumgebung zur Integration

Als Simulationsumgebung wurde der institutseigene Transporthubschrauber-Forschungssimulator genutzt, dargestellt in Abbildung 5-1 und Abbildung 5-2. Dabei handelt es sich um einen stationären Missionssimulator, der ein generisches, zweisitziges Transporthubschrauber-Cockpit abbildet und im Rahmen der Studien MUM-T, MiRA, MiRA-T, MiRA-CA und CASIMUS aufgebaut und kontinuierlich weiterentwickelt wurde.

Ein Convertible Laptop dient zur Simulation eines mobilen und flexibel einsetzbaren Arbeitsplatzes für einen zusätzlichen Nutzer, bspw. einen infanteristischen *Forward Air Controller* (FAC), einen *Joint Terminal Attack Controller* (JTAC) bzw. einen Patrouillen- oder Konvoi-Führer. Das Interface dient im Wesentlichen zur Initiierung von UAV-Nutzungsanfragen gegenüber der Hubschrauberbesatzung und soll keinen eigenständigen Simulator abbilden.

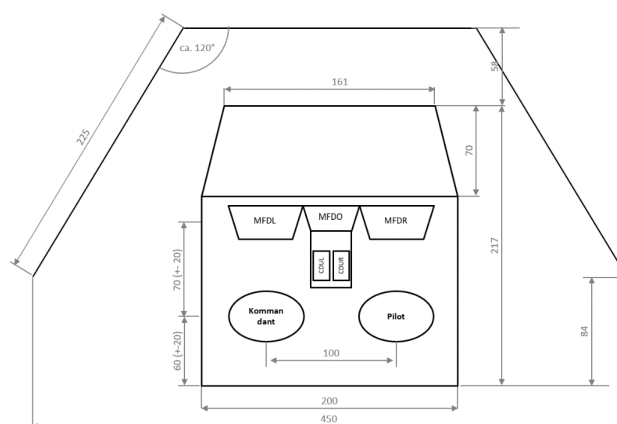


Abbildung 5-1 Schematische Darstellung Hubschraubercockpit-Aufbau

¹² In Operationsgebieten mit einem umkämpften elektromagnetischen Spektrum sind Datenverbindungen über größere Distanzen nicht verlässlich.



Abbildung 5-2 Innenansicht Hubschraubercockpit

Zur Simulation der Hubschrauber-Flugphysik dient hierbei die Software *X-Plane 10* der Firma *Laminar Research* und ein modifiziertes Flugmodell des Mehrzweckhubschraubers Sikorsky S-76. Das Missionsgeschehen wird über die Software *Virtual Battlespace 3 (VBS 3)* von *Bohemia Interactive* simuliert. Sie diene ebenfalls dazu, um auf Basis der Fluglagedaten die Hubschrauber-Außensicht zu generieren, welche anschließend über drei planare, um jeweils 60° versetzte Rückwandprojektionen auf ein Blickfeld von ca. 180° horizontal und 45° vertikal projiziert wurde. Für die Missionsszenarie diene ein Gebiet südlich der afghanischen Hauptstadt Kabul, als geotypische Repräsentation des mittleren Ostens, der in der Vergangenheit häufiger Ort für IKM¹³-Einsätze der Bundeswehr war. Abbildung 5-3 zeigt den modularen Aufbau der Missionssimulation. Tabelle 5-1 gibt einen Überblick über die darin verwendeten Programme.

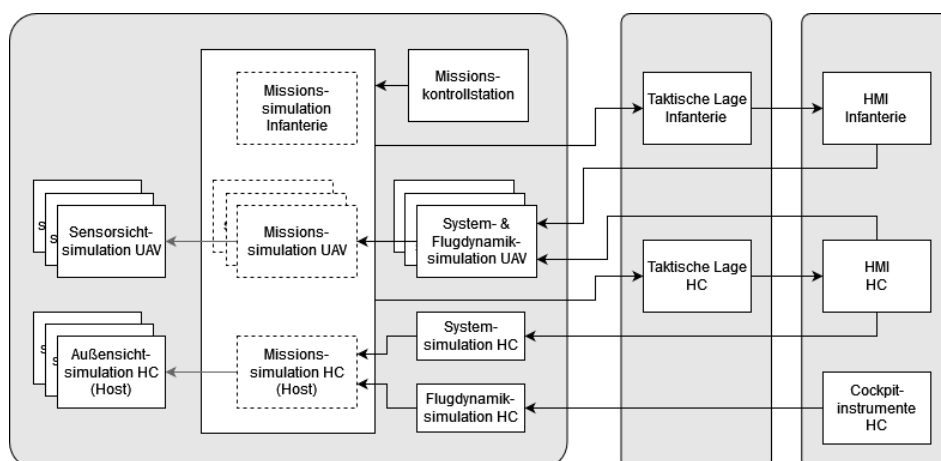


Abbildung 5-3 Modulschaubild Missionssimulation

Der Simulator ermöglicht damit die Untersuchung von Missionen, bei dem ein Transporthubschrauber als Führungsfahrzeug, im Verbund mit mehreren UAVs eingesetzt wird.

¹³ Internationales Krisenmanagement

Sie dienen dem Führungshubschrauber als abgesetzte Sensorplattformen und erweitern damit Reichweite und Fläche, die durch Aufklärung abgedeckt werden können. Dafür verfügen die UAVs über die Fähigkeiten der Aufklärung eines vorgegebenen Bereichs, der Transition zu einer vorgegebenen Koordinate sowie der Detektion von potenziellen Landepunkten innerhalb einer Landezone. Durch die frühzeitige Erkennung möglicher Bedrohungen kann der Missionsplan mit ausreichend zeitlichem Vorlauf angepasst werden. Dabei werden die UAVs nach dem LOI-Level 4 (STANAG 4586 2017) geführt, also über aktives Sensor- und Flugmanagement, aber unter Vernachlässigung des Start- und Landevorgangs. Die UAVs können neben der Hubschrauberbesatzung auch anderen Bedarfsträgern (Clients) innerhalb eines gemeinsamen Operationsgebiets zur Verfügung gestellt werden. Dabei wird durch das Interface des Clients eine Vernetzung mit der Hubschrauberbesatzung erreicht, die den digitalen Austausch taktischer Informationen und die gemeinsame UAV-Nutzung ermöglicht.

Tabelle 5-1 Soft- und Hardwareübersicht Missionssimulation

Modulsystem	Programm(e)	Rechner	Funktion
3x Außensichtsimulation HC (L, M, R)	VBS	<ul style="list-style-type: none"> • AußensichtL • AußensichtM • AußensichtR 	Generierung der Außensicht zur Projektion auf die Cockpit-Leinwände
3x Sensorsichtsimulation UAV (UAV 1 – 3)	VBS	UAVVBS	Generierung der Sensorsichten für die einzelnen UAVs
Missionssimulation	VBS	VBSServer	Simulation des Missionsszenarios
Missionskontrollstation	SimOperator	Master	Kontrolle über die Mission & Taktische Lage (Hinzufügen/Löschen von Objekten, Einsteuern von Missionseignissen, ...)
Systemsimulation HC	HCSysmSimulation	Master	Verwalten und Simulation der Systemzustände des Hubschraubers
Flugdynamiksimulation HC	X-Plane 10	Spreadserver	Simulation der Hubschrauber-Flugdynamik
3x System- & Flugdynamiksimulation (UAV 1-3)	UAVSystemSimulation, UAVHub, ACU, ...	UAVSim	Simulation des Verhaltens, der Flugdynamik und der Systemzustände der UAVs
Fluginstrumente HC (Pilot & Kommandant)	ReiserCLS	Master	Interface zum Anschluss der Reiser-Fluginstrumente
Taktische Lage HC	TacSit	Spreadserver	Verwaltung der taktischen Lage für die Hubschraubermission
Taktische Lage Infanterie	TacSit	Planner	Verwaltung der taktischen Lage für die bodengebundene Mission
HMI HC	<ul style="list-style-type: none"> • MFD Left • MFD Right • MFD Overhead • CDU Left • CDU Right 	<ul style="list-style-type: none"> • MFDL • MFDR • MFDO • CDUL • CDUR 	Interfaces zur HC-Systembedienung, zur Führung der UAVs sowie zum Zugriff auf die taktische Lage und die UAV Sensorsichten
HMI Infanterie	ClientScreen	ClientLaptop	Interface zum Zugriff auf die taktische Lage und zur Anfragengenerierung

Während der Pilot für die Steuerung des Hubschraubers verantwortlich ist, liegen die Aufgaben des Kommandanten vor allem in der Missionsplanung und -umplanung. Diese Aufgaben umfassen die Routenplanung, die Aufgabenplanung und die Ausweichplanung aller beteiligter Vehikel, also des Hubschraubers selbst sowie der UAVs. Hinzu kommen Aufgaben der Systemüberwachung, des Systemmanagements und der Funkkommunikation, die von beiden Besatzungsmitgliedern wahrgenommen werden können.

Um ihren individuellen Aufgaben nachzukommen, stehen dem Pilot und dem Kommandanten mehrere Multifunktionsdisplays (MFDs) und Control and Display Units (CDUs) im Hubschraubercockpit zur Verfügung. Hauptwerkzeug des Kommandanten zur Missionsplanung und -überwachung ist dabei eine digitale taktische Karte, die neben der Überwachung des Einsatzes auch zur Planung der Mission, zur Führung der UAVs, zum Zugriff auf ihre Sensoren und zur Interaktion mit Assistenzfunktionen verwendet wird. Der fliegende Pilot nutzt vorwiegend die Flugsteuerungselemente und die Außensicht inkl. Head-Up Display (HUD) zur Durchführung der Flugaufgaben. Abbildung 5-2 zeigt die Anordnung der beschriebenen Elemente im Cockpit. Weiterhin ermöglicht das MFD, dargestellt in Abbildung 5-4, den Zugriff auf separate Displays zur Einstellung und Überwachung flugrelevanter Instrumente sowie des Systemmanagements.

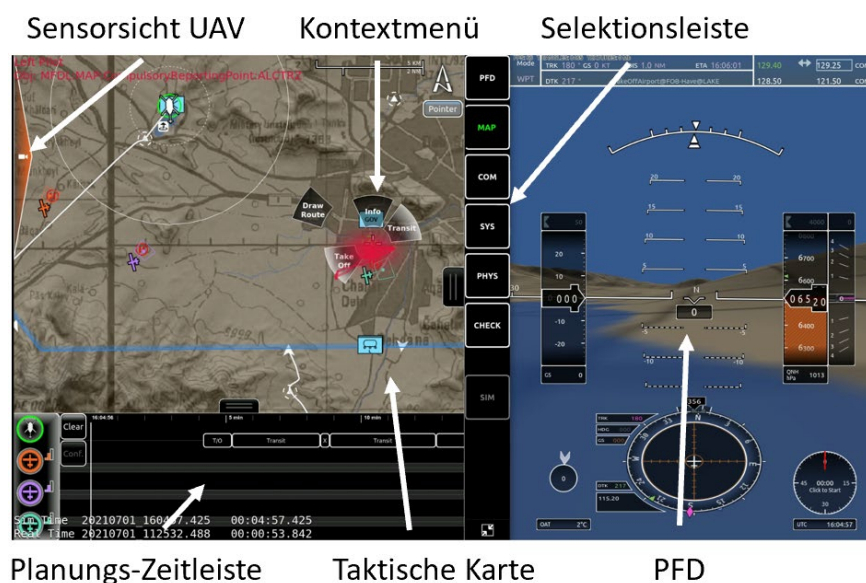


Abbildung 5-4 Elemente des Multifunktions-Displays

Um die Führung mehrerer UAVs bei gleichzeitiger Führung des Hubschraubers und Koordinierung der Gesamtmission zu ermöglichen, werden sie nach dem Ansatz der auftragsbasierten Führung (Uhrmann und Schulte 2011) aus dem Hubschraubercockpit kommandiert. Durch diese Form der Delegation wird eine Führung analog zu bemannten Systemen ermöglicht, die auf größtenteils eigenständigem Handeln im Sinne eines erteilten Auftrags beruht. Dabei erfolgt die Kommandierung durch Vergabe eines Handlungsziels auf hohem Abstraktionsniveau (Uhrmann 2013), i.d.R. auf Ebene von Missionsaufgaben, anstatt die Flugsteuerung oder den Sensoreinsatz auf niedriger Ebene manuell zu kontrollieren. Entsprechend werden Aufträge nach einem kompakten Schema formuliert z.B. in Form von: „Kläre auf – Routenabschnitt Bravo“ oder „Bewege dich zu – Koordinate Sierra“, etc. Aufträge, die dem gleichen System zugewiesen sind, werden in ihrer zeitlichen Reihenfolge aneinandergereiht. Entsprechend ergibt sich für jedes System eine eigene Aufgabensequenz. Zusammengefasst für alle Systeme resultieren sie im Gesamt-Missionsplan des Teams aus dem bemannten und den unbemannten Systemen.

Die automatisierte Ausführung der kommandierten Aufträge setzt voraus, dass die UAVs befähigt werden, einen abstrakten Auftrag verstehen und ausführen zu können. Hierzu verfügt jedes UAV über einen eigenen Agenten, der die notwendigen Aktionen zur Erfüllung eines Auftrags identifiziert und soweit ausplant, dass sie automatisiert durch das UAV ausgeführt werden können (Rudnick und Schulte 2017). Dadurch kann das UAV weitgehend selbstständig agieren und den Kommandanten durch einen reduzierten Aufmerksamkeitsbedarf entlasten.

5.3. Interoperabilität zur gemeinsamen UAV-Nutzung

Der Kommandant des Hubschraubers fungiert als Host, der die eigenen UAVs verwaltet und vorwiegend für die eigene Mission nutzt. Ein zusätzlicher Bedarfsträger tritt als Client auf und wird ermächtigt, Anfragen zur temporären Nutzung der unbemannten Systeme zu stellen. Da die Verantwortung über die UAVs durchgängig dem Kommandanten obliegt, entscheidet dieser situationsbedingt und entsprechend des eigenen Bedarfs darüber, ob Nutzungsanfragen genehmigt oder abgelehnt werden. Darüber hinaus besitzt er die Autorität, eine bereits genehmigte Nutzung jederzeit zu ändern oder zu widerrufen. Dazu wurden die Interoperabilitätslevel konkretisiert, die den Zugriff auf ein geteiltes UAV für den Client sukzessiv erhöhen:

Level 1. Der Client erhält Zugriff auf die Live-Sensordaten des UAV, jedoch ohne Kontrolle über den Sensor oder das System selbst.

Level 2. Der Client wird ermächtigt, spezifische UAV-Aufträge anzufragen. Die Anfragen unterliegen jedoch der Zustimmung durch den Hubschrauberkommandanten und müssen durch ihn in den eigenen Missionsplan integriert werden.

Level 3. Der Client erhält die temporäre Kontrolle über das UAV und kann es somit eigenständig kommandieren. Um Nutzungskonflikte zu vermeiden, ist die Auftragsvergabe an jenes UAV für den Kommandanten während dieser Zeit ausgesetzt. Jedoch verbleiben sowohl die Verantwortung als auch die Autorität über das System beim Kommandanten, sodass dieser dem Client die Kontrolle jederzeit wieder entziehen kann.

Handover. Mit einer Übergabe erhält der Client permanent volle Kontrolle über das UAV. Damit verschwindet es aus dem Zugriffs-, dem Verantwortungs- und dem Autoritätsbereich des Kommandanten und wechselt in den des Clients über.

5.4. Werkzeuge Client

Der folgende Abschnitt beschreibt die Modellierung der Anfrage im MUM-T Kontext und ihre Formulierung über das Interface des Clients aus Anwendersicht. Sie repräsentieren die Werkzeuge, die die Initiierung einer Interoperabilitätsanfrage ermöglichen.

5.4.1. Modellierung der Anfrage

Bei der Modellierung der Anfragenformulierung wurde sich an Beispielen der Einsatzunterstützung orientiert, u.a. der Artillerie (FM 6-135 1944), der medizinischen Evakuierung (*Medical Evacuation*) (FM 4-02.2 2007), der Suche und -Rettung in Not geratener Personen (*Search and Rescue*) (JP 3-50 2015) und der Luftnahunterstützung (*Close Air Support*) (JP 3-09 2019). Inhaltlich soll dabei zwischen obligatorischen und optionalen Parametern unterschieden werden. Obligatorische Parameter definieren den minimalen Inhalt einer Anfrage und garantieren somit die Vollständigkeit der Anfrage. Sie sind dementsprechend immer vom Client zu definieren und sollten vom Host nicht verändert werden. Werden nur obligatorische Parameter definiert, besteht die größtmögliche Flexibilität bei der Umsetzung der Anfrage. Optional definierte Parameter erlauben es dem Client, die Anfrage genauer zu spezifizieren, können aber im Gegenzug die Flexibilität bei der Einbindung der Anfrage einschränken. Zusammengefasst können folgende Angaben durch den Client definiert werden:

- **Angefragtes Level der Nutzung (obligatorisch):** Hierin muss definiert werden, ob der passive Datenempfang, die Ausführung eines Auftrags oder die temporäre Kontrolle über ein unbemanntes System angefragt wird.
- **Angefragte Fähigkeit (obligatorisch):** Im Zusammenhang mit dem angefragten Level der Nutzung wird damit spezifiziert, welche Art des Datenempfangs oder was für eine Auftragsart angefragt wird bzw. welche Fähigkeit ein unbemanntes System zur temporären Kontrolle besitzen soll.
- **Dauer der angefragten Nutzung (obligatorisch):** Bei einer Anfrage zur temporären Nutzung eines unbemannten Systems muss die Dauer der Fremdnutzung angegeben werden. Zeiten für die Transition zwischen Host und Client sollten separat behandelt werden, da diese von der jeweiligen Umsetzung abhängig sind. Wird die Durchführung eines spezifischen Auftrags angefragt, kann der zugehörige Zeitaufwand daraus abgeleitet werden.
- **Prioritätsvorgabe (optional):** Auswahl aus den drei Prioritätsstufen „hoch“, „mittel“ und „niedrig“.
- **Zeitvorgabe (optional):** Angabe eines frühesten, eines bevorzugten und eines spätesten Zeitpunktes für den Beginn der angefragten Nutzung zur Ermittlung einer Nutzwert-Funktion.
- **Angefragtes System (optional):** Ist das Wissen über die einzelnen verfügbaren Systeme bekannt, kann über diesen Parameter ggf. ein spezifisches System angefragt werden. Dies ist jedoch vom Umfang der Informationsbereitstellung abhängig.

5.4.2. Mensch-Maschine-Interface Client

Das Interface des Clients dient einerseits zur Anzeige des Lagebilds für die eigene Missionsdurchführung und zur Kommunikation mit der Hubschrauberbesatzung. Dies schließt den Anfragemechanismus ein, anhand dessen die gewünschten Planelemente übermittelt werden können. Über eine taktische Karte hat der Client Zugriff auf eine Übersicht des simulierten Einsatzgebietes mit allen taktischen Lageinformationen. Damit liefert sie auch Informationen über den Hubschrauber und die potenziell verfügbaren UAVs. Gleichzeitig dient sie zur Initiierung und Spezifizierung von UAV-Nutzungsanfragen sowie zum Sensor-Zugriff und zur Auftragsdelegation bei gewährter Kontrolle über ein UAV.

Abbildung 5-5 zeigt das Client-Interface. Links in der taktischen Karte ist das Symbol der eigenen Einheit (hellblaues taktisches Zeichen) sowie ein geplanter Routenabschnitt (schwarze Linie) dargestellt. Durch Selektion des Abschnitts öffnet sich das abgebildete Kontextmenü und bietet verschiedene Aktionen für das referenzierte Objekt. Die rechte Seite zeigt das Spezifikationsmenü einer Anfrage. Die rechte Seite zeigt das Spezifikationsmenü einer Anfrage.

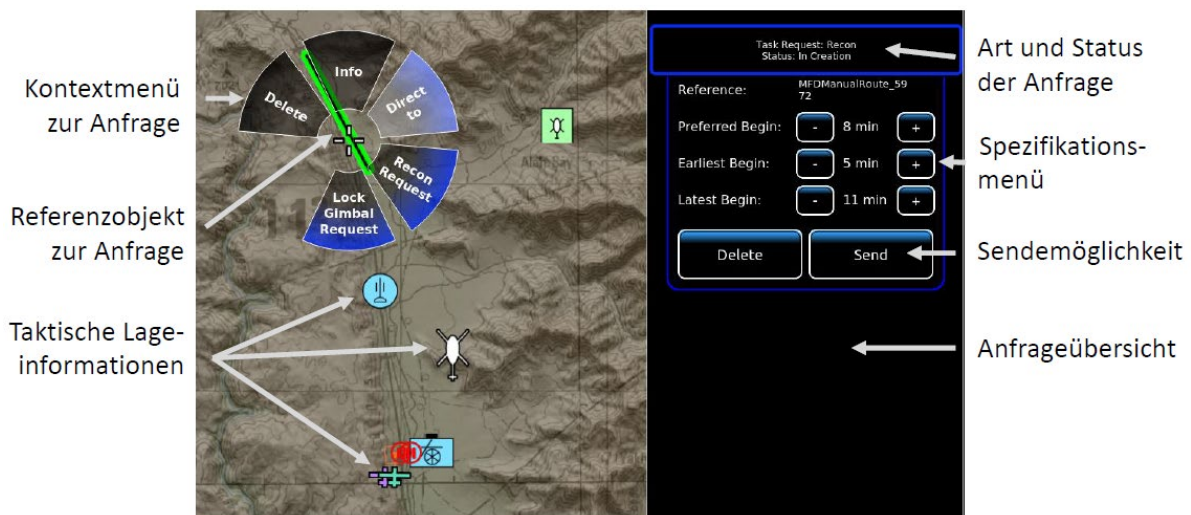


Abbildung 5-5 Nutzerinterface Client

Die Anfragen zur Nutzung eines UAV sind objektgebunden und werden durch Selektion eines relevanten Referenzobjektes auf der Karte eingeleitet. Entsprechend der konkretisierten Interoperabilitätsdefinition können drei Formen von Nutzeranfragen gestellt werden:

1. Anfrage zur passiven Nutzung eines UAV-Sensors,
2. Anfrage zur Ausführung eines UAV-Aufklärungsauftrages und
3. Anfrage zur temporären Kontrolle über ein UAV.

Die Selektion einer Route dient zur Initiierung einer Anfrage für die Aufklärung derselbigen. Mit der Auswahl eines Punkts auf der Karte wird die Anfrage zur temporären Kontrolle eines UAV eingeleitet. Dieser Punkt dient dann als Übergabeort, zu dem das UAV fliegen soll, um dort temporär in die Kontrolle des Clients überzugehen. Nachdem die Anfrage initiiert wurde,

taucht sie in einer separaten Übersicht auf und kann dort weiter spezifiziert werden. Stellt der Client mehrere Anfragen parallel, werden sie in dieser Übersicht aufgelistet. Über ein Einstellungsmenü kann der Client der Anfrage dann weitere Parameter, wie z.B. eine Priorität oder eine explizite Startzeit in Kombination mit einem zeitlichen Flexibilitätsbereich, zuweisen. Bei einer Anfrage zur temporären Kontrolle muss weiterhin die Nutzungsdauer spezifiziert werden. Wird die Durchführung eines Auftrags angefragt, so ergibt sich diese automatisch aus der berechneten Dauer dieser Aufgabe. Falls die entsprechenden Informationen über verfügbare UAVs, insbesondere deren Fähigkeiten, Positionen und Aufgaben zur Verfügung gestellt werden, ist es auch möglich, dass der Client ein bestimmtes UAV anfragt. Sobald alle Spezifikationen getroffen wurden, kann die Anfrage an den Host bzw. den Broker gesendet werden. Dadurch sind die Einstellungen fixiert und nicht mehr abänderbar. Um eine Anfrage dennoch anpassen zu können, kann diese zurückgezogen und ihre Verarbeitung durch den Broker und den P-Agent abgebrochen werden. Nach Anpassung der Einstellungen kann sie dann erneut abgesendet werden. Ebenso lässt sich eine Anfrage komplett abrechnen, wenn z.B. ihre Notwendigkeit nicht mehr gegeben ist. Mit der Anfrage selbst wird auch ihr Status visualisiert, der sich je nach Verarbeitungsstand aktualisiert und folgende Stufen durchläuft:

- **„initiiert“**: Die Anfrage befindet sich im Bearbeitungsmodus und wird derzeit nicht vom Planungsagenten berücksichtigt. Dies ist der initiale Zustand einer Anfrage, wenn sie neu erstellt und noch nicht an den Host übermittelt wurde. Auch wenn der Client eine Anfrage zur nachträglichen Bearbeitung zurückzieht, wird diese nicht weiter vom Planungsagenten bearbeitet und gelangt in diesen Status zurück.
- **„gesendet“**: Die Anfrage wurde an den Planungsagenten des Hosts übermittelt und befindet sich dort derzeit in der Bearbeitung. D.h. der Pilot hat noch keine Entscheidung über die Anfrage getroffen.
- **„angenommen“**: Die Anfrage wurde durch den Piloten angenommen und in den Missionsplan integriert, wird jedoch noch nicht ausgeführt.
- **„abgelehnt“**: Die Anfrage wurde durch den Piloten abgelehnt.
- **„in Durchführung“**: Die angenommene Anfrage wird derzeit durch ein UAV ausgeführt.
- **„abgebrochen“**: Eine bereits angenommene Anfrage wurde nachträglich abgelehnt oder während der Durchführung abgebrochen.

Zusätzlich zur Statusmeldung übersendet der Planungsagent dem Client mit erfolgter Entscheidung auch ein Feedback, ob die Anfrage angenommen oder abgelehnt wurde. Dieses taucht als Dialog im Display des Client-Interfaces auf.

5.5. Werkzeuge Host

Die Werkzeuge des Hosts umfassen die Planungsunterstützung und dessen Interface.

5.5.1. Multi-Agenten Planung

Die grundlegende Planungsfähigkeit für den Hubschrauber-UAV-Verbund baut im Wesentlichen auf den Vorarbeiten von Schmitt (2021) auf. Entsprechend des Missionsfortschritts werden dabei schrittweise Teilpläne generiert, die zum Erreichen des Missionsziels bzw. eines Zwischenziels (z.B. Pick-up Point zur Aufnahme, oder Drop-Point zum Absetzen von Personal oder Fracht) notwendig sind. Dabei werden u.a. flugrelevante Missionsareale (Helicopter Operating Area – HOA, Helicopter Operating Box – HOB), Navigationspunkte (z.B. Checkpunkte oder Korridore zum Eintritt oder Verlassen der Operationsgebiete), Bedrohungen, UAV-Sensoraufgaben (z.B. Routen- oder Landepunktaufklärung) sowie Aufgaben zum Abflug, zur Landung und zur Be- bzw. Entladung berücksichtigt.

5.5.1.1. Zentralisierte Planung

Zur Integration des zentralisierten Planungsansatzes wurde im Rahmen einer studentischen Arbeit (Helbig 2021) ein Missionsszenario zur Durchführung zweier getrennter Hubschraubermissionen erstellt. Beide Hubschrauber besaßen jeweils den Auftrag, einen individuellen Zielpunkt innerhalb des gemeinsamen Operationsgebiets anzufliegen, um dort eine Fracht abzuladen bzw. aufzunehmen. Insgesamt standen dafür drei UAVs zur gemeinsamen Nutzung zur Verfügung. Anhand des zentralisierten Planungsansatzes sollte nun ein Gesamtplan entwickelt werden, der die gemeinsame Nutzung der UAVs einbezog. Beide Hubschrauber befanden sich initial an einer gemeinsamen Heimatbasis, außerhalb des Operationsgebiets. Ihre jeweiligen Flugrouten innerhalb des Operationsgebiets mussten dabei vorab durch die verfügbaren UAVs aufgeklärt werden. Hierfür wurden die beiden Planungsprobleme in einem gemeinsamen PDDL-Planungsproblem dargestellt und zentral gelöst. Abbildung 5-6 zeigt den Gesamtplan, aufgegliedert in die jeweiligen Missionsanteile der beiden Hubschrauber. Dargestellt sind die beiden Missionspläne, jeweils bestehend aus dem Hubschrauberplan in grau und den einzelnen UAV-Plänen in der entsprechenden UAV-Farbe (orange, lila und grün). Ein UAV-Auftrag ist wiederum farblich aufgegliedert in die beiden Anteile der Transition, um den Startpunkt zum Beginn der Aufklärung zu erreichen (transparent) und der eigentlichen Aufklärung (gefärbt). Durch Übereinanderlegen der beiden Pläne ergibt sich die Gesamtauslastung der UAVs. Abbildung 5-7 zeigt das zugehörige Missionsgebiet inklusive einer räumlichen Darstellung der beiden Missionspläne.

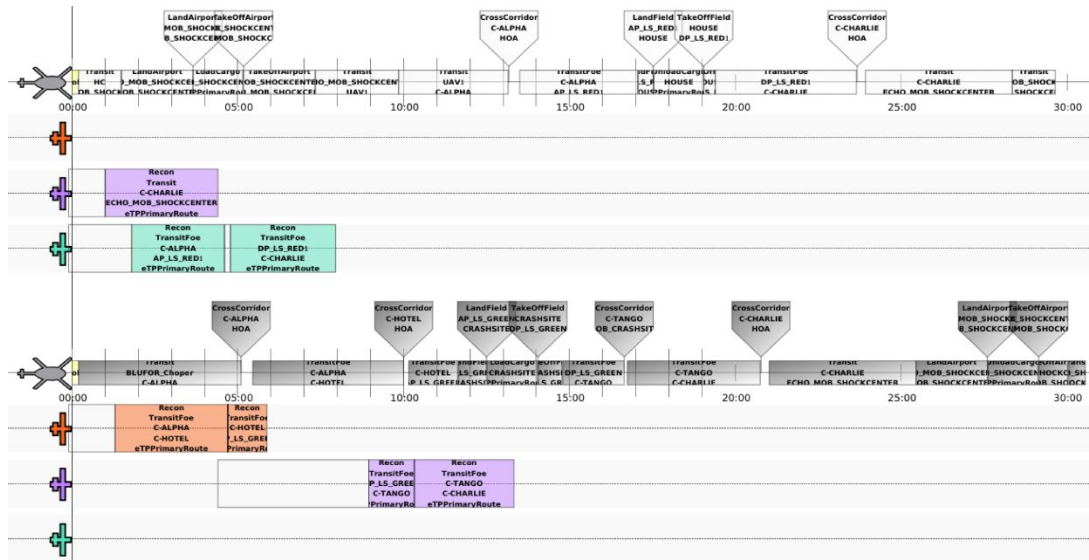


Abbildung 5-6 Zentralisiert ermittelter Gesamtplan, auf beide Missionen (oben/unten) aufgeteilt

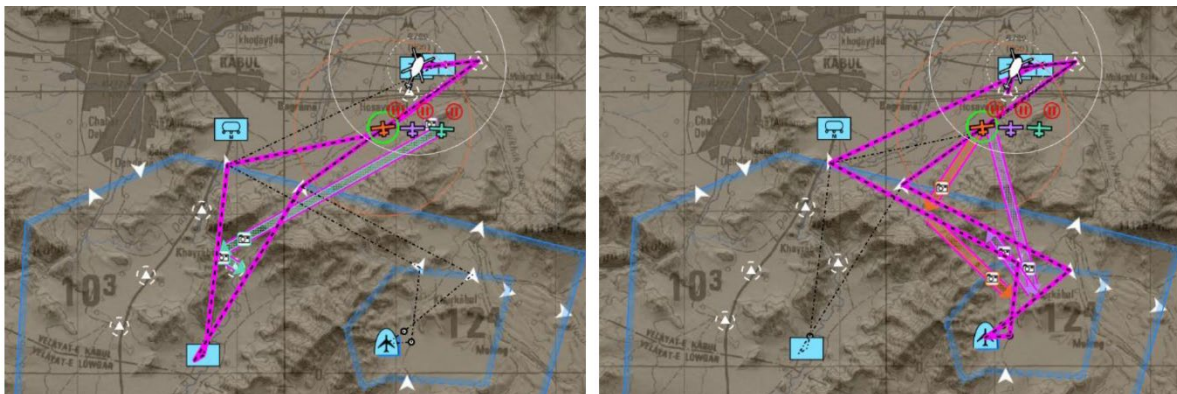


Abbildung 5-7 Räumliche Darstellung der zentralisiert ermittelten Pläne im Missionsgebiet

5.5.1.2. Dezentralisierte Planung

Abbildung 5-8 zeigt anhand eines Beispiels die verschiedenen Optionen, die durch den Koordinierungsprozess in der dezentralisierten Planung ermittelt wurden und eine Anfrage (in Magenta hervorgehoben) in einen Referenzplan a) integrieren. In Plan b) wird die Anfrage z.B. dem orangefarbenen UAV zugewiesen, welches zuvor keinen Auftrag besaß. In Plan c) wird die Anfrage an die Auftragssequenz des lilafarbenen UAV angehängt. In Plan d) wird die Anfrage zwischen den bestehenden Aufträgen des türkisarbenen UAV eingefügt. Bei allen drei Lösungen b) bis d) wird die Anfrage im Rahmen des konventionellen Integrationsmodus in den Missionsplan eingefügt, d.h. ohne die Struktur des ursprünglichen Plans zu verändern. Je nach Positionierung in der Auftragssequenz werden dadurch die Transitionszeiten zum Erreichen eines angefragten Aufklärungsauftrags und zum nachfolgenden Auftrag beeinflusst. Die Pläne e) und f) stellen Lösungen im Rahmen des optimierten Integrationsmodus dar, der Umstrukturierungen bereits geplanter Aufträge erlaubt. Diese zielen in erster Linie jedoch nicht darauf ab, den darunterliegenden Missionsplan des Piloten zu optimieren, sondern sollen

vornehmlich günstige Änderungen im Zusammenhang mit der Implementierung einer Anfrage identifizieren. Änderungen an den zugrundeliegenden Planelementen des Piloten, die nicht im Zusammenhang mit einer Anfrage stehen, wurden bereits durch Schmitt (2021) untersucht und sollen hier nicht noch einmal aufgegriffen werden. Dabei zeigt Plan e) eine Lösung, bei der die Aufgaben des UAV, dem die Anfrage zugewiesen wurde, neu angeordnet sind. In diesem Beispiel wurden die beiden bereits geplanten Aufgaben des türkisarbenen UAV getauscht, da die Neuordnung zu einer Verringerung der Transitionszeiten führt. In Plan f) werden die Aufträge des türkisarbenen UAV an das orangefarbene UAV übertragen, um dafür die Anfrage zu übernehmen. Je nach Umfang des ursprünglichen Plans ergibt sich daraus eine Vielzahl von möglichen Integrationen, die sich in der Gesamtdauer und der UAV-Auslastung individuell unterscheiden.

Unter Nutzung der generierten und bewerteten Lösungen kann der Planungsagent nun mit dem MUM-T Kommandant interagieren und zur Vereinfachung des Entscheidungsproblems beitragen. Der Umfang der Unterstützung wurde über die nachfolgenden Automationslevel skaliert, die sich an den Automationsleveln von Sheridan und Verplank (1978) orientieren:

- Keine Unterstützung (LOA 1)
- Bereitstellung aller realisierbaren Handlungsoptionen (LOA 2)
- Empfehlung einer spezifischen Lösung (LOA 4)

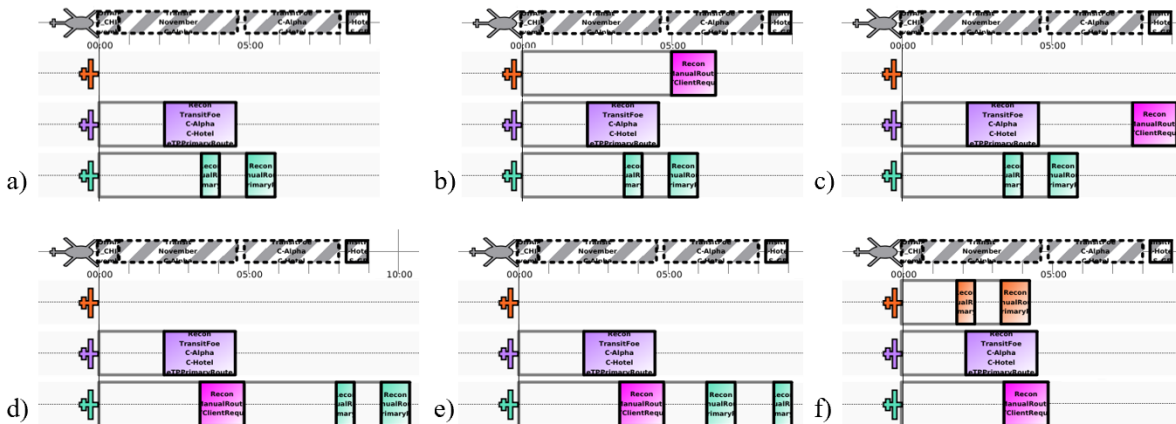


Abbildung 5-8 Lösungspläne unterschiedlicher Integrationsmodi

5.5.2. Mensch-Maschine-Interface Host

Zur Interaktion mit dem Host diente das MFD im Cockpit des Hubschraubersimulators, das um die Anforderungen des Hosts zur Koordinierung der Multi-Nutzer Planung erweitert wurde. Diese umfassten einerseits die Darstellung und manuelle Bearbeitung externer Anfragen und andererseits die Visualisierung von Lösungsvorschlägen sowie die Interaktion mit dem Planungsagent.

5.5.2.1. Visualisierung des Missionsplans

Das Hauptarbeitsmittel des Hosts ist die digitale taktische Karte (siehe Abbildung 5-9), die das Einsatzgebiet und dessen Topografie darstellt. Ihr überlagert sind missionsrelevante Gebietseingrenzungen, Flugkorridore, Infrastrukturen und andere Einheiten (dargestellt mit ihren taktischen Symbolen nach APP-6 (2011)).

Neben der Überwachung des Missionsverlaufs kann die Karte außerdem interaktiv genutzt werden, um sich z.B. Informationen über eingetragene Elemente einzuholen oder um Routen zu skizzieren. Zusätzlich zur Informationsbereitstellung dient sie weiterhin zur Planung und Delegation von Aufträgen an die unterstellten UAVs sowie zum Zugriff auf ihr Sensorbild. Die Erteilung von Aufträgen erfolgt dabei entsprechend der zweistufigen Selektion von Referenzobjekt und Auftrag mittels eines kontextsensitiven Radialmenüs. Erteilte (sprich geplante) UAV-Aufträge werden als Pfeile in der entsprechenden UAV-Farbe (orange, lila, türkis) visualisiert, die den jeweiligen Start- und Zielpunkt des Auftrags miteinander verbinden. Dabei startet der Pfeil des Auftrags, den das UAV momentan bearbeitet, an der UAV Position und ist auf das entsprechende Referenz-Objekt gerichtet. Für einen Transit ist dies z.B. die Zielkoordinate, für einen Aufklärungsauftrag das aufzuklärende Objekt. Nachfolgende Aufträge starten am Endpunkt des vorhergehenden Auftrages und bilden somit eine Auftragskette, anhand derer die Bewegung des UAV innerhalb des Missionsgebiets abgeschätzt werden kann. Geplante Aufträge für den Hubschrauber sind in Form der zugehörigen Flugrouten als weiße Linien visualisiert. Insgesamt stellen die UAV-Auftragspfeile und die Hubschrauberrouuten den Gesamt-Missionsplan des MUM-T Verbunds dar.

Was aus der räumlichen Darstellung in der Karte jedoch schwierig abzuleiten ist, sind die zeitlichen Eigenschaften des Plans, also eine Abschätzung der Dauer der einzelnen Aufträge und ihrer UAV-übergreifenden zeitlichen Abstimmung zueinander. Zur Visualisierung des chronologischen Ablaufs des Missionsplans wurde eine Zeitleiste implementiert, die die Aufträge separiert nach den einzelnen Vehikeln für den Hubschrauber und die UAVs auflistet. Dargestellt wird die Dauer, die das Vehikel für die Ausführung des jeweiligen Auftrags gebunden ist. Für die UAVs unterteilt sich diese in die Transitionszeit, die das Vehikel zur Erreichung des Referenzobjektes benötigt und die Dauer zur Fähigkeitserbringung, also dem Zeitraum der sensorischen Aufklärung.

Aus dieser Visualisierung soll einerseits ersichtlich werden, ob einzelne Aufträge rechtzeitig beendet werden können und ob die Aufgaben (insbesondere zu anderen UAVs oder zum Hubschrauber) zeitlich gut aufeinander abgestimmt sind. Andererseits soll damit ein genereller Beitrag zur Erhöhung der Transparenz des Missionsplans und demzufolge zum Planbewusstsein geleistet werden. Weiterhin wird es über die Zeitleiste ermöglicht, mit

einzelnen Aufträgen zu interagieren. Durch Selektion eines Auftrags kann der Nutzer spezifische Informationen zu diesem erhalten, Einstellungen treffen oder diesen löschen.

Im Hinblick auf die Integration von Fremdaufträgen soll die Zeitleiste die Abschätzung von zeitlichen Auswirkungen auf den Missionsplan erleichtern und zur Nachvollziehbarkeit von präsentierten Lösungen beitragen.

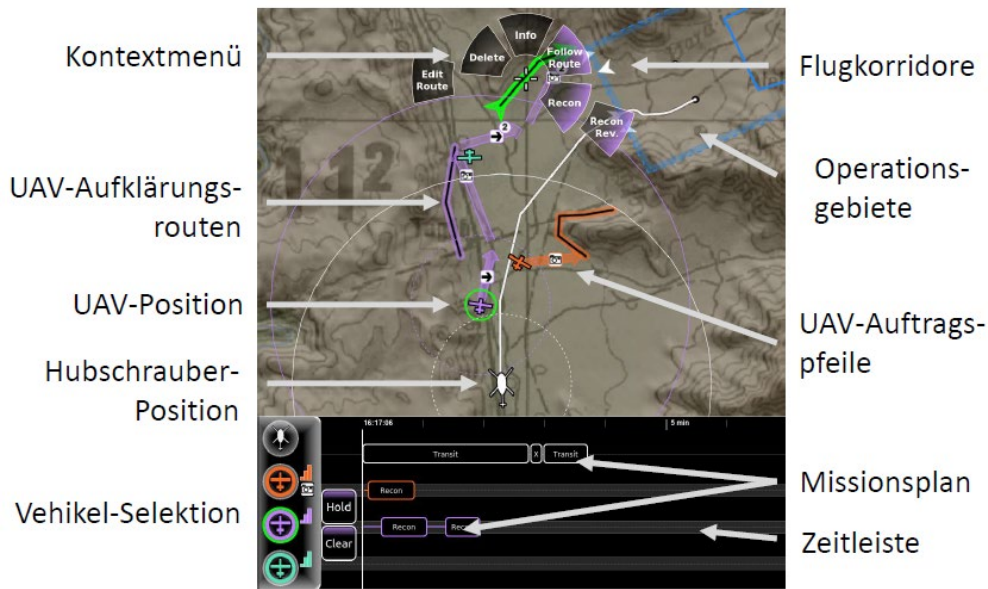


Abbildung 5-9 Taktische Karte und Zeitleiste

5.5.2.2. Visualisierung und Bearbeitung einer Anfrage

Die Anfrage wird dem Host in Dialog-Form auf der taktischen Karte als textuelle Darstellung präsentiert. Darin enthalten sind der Name der anfragenden Einheit, das angefragte Interoperabilitätslevel und ggf. die Dauer einer temporären Nutzung bzw. das Objekt, deren Aufklärung angefragt wird. Um eine räumliche Referenz auf der taktischen Karte herzustellen, werden die anfragende Einheit und das Referenzobjekt (also entweder das aufzuklärende Objekt oder der Handover-Punkt zur temporären Übergabe der Kontrolle) blau hervorgehoben.

Die manuelle Integration einer angefragten UAV-Nutzung erfolgt in Analogie zur Vergabe eigener Aufträge an die UAVs. Zunächst muss das UAV ausgewählt werden, dem die Anfrage zugewiesen werden soll. Über die anschließende Selektion des (blau hervorgehobenen) Referenzobjektes der Anfrage kann die Anfrage dann über das auftauchende Kontextmenü zugewiesen werden. Abbildung 5-10 zeigt den Vorgang der manuellen Integration. Analog zur eigenen Auftragsvergabe wird die Ausführung der Anfrage dann an die Auftragssequenz des gewählten UAV angehängt. Die Anfrage ist damit in den Gesamt-Missionsplan des Hubschrauber-UAV Teams integriert. Auf der taktischen Karte wird die Anfrage über einen blau umrahmten Auftragspfeil hervorgehoben, der analog zu allen anderen Auftragspfeilen in die Aufgabenreihenfolge des zugewiesenen UAV eingebettet ist und auf das Referenzobjekt

der Anfrage zeigt. In der Zeitleiste finden sich implementierte Anfragen ebenfalls blau umrahmt wieder, um sie von den eigenen Aufträgen abzuheben. Eine Aufklärungsanfrage wird ansonsten genauso dargestellt, wie eigens vergebene Aufklärungsaufträge. Eine implementierte temporäre Kontrollübergabe unterscheidet sich in ihrer Darstellung durch einen ausgegrauten Zeitbereich, während das UAV der Fremdkontrolle unterliegt. Prinzipiell ist sie aber ebenfalls aufgeteilt in einen Zeitbereich, der die Transition zum Handover-Punkt beschreibt und einen Zeitbereich, in dem die Kontrolle über das UAV an den Client übertragen wird.

Eine bereits implementierte Anfrage kann durch den Host neu zugewiesen werden, indem das Planelement der bereits integrierten Anfrage in der Zeitleiste selektiert und gelöscht wird. Die angefragte Nutzung wird dadurch wieder zurück in den Anfragestatus überführt und kann anschließend neu in der Aufgabensequenz positioniert oder einem anderen UAV zugewiesen werden. Auf diese Weise ist ebenfalls eine nachträgliche Ablehnung einer bereits genehmigten Anfrage möglich.

Auch die Durchführung eines angefragten Aufklärungsauftrags verhält sich prinzipiell analog zur Ausführung eines Aufklärungsauftrags, der eigeninitiativ durch den Host vergeben wurde. Der einzige Unterschied ist, dass dieser Auftrag durch den Client initiiert wurde und die Aufklärungsergebnisse hauptsächlich zu dessen Missionsdurchführung beitragen. Die Übergabe der Kontrolle wird durch einen Transit zu dem in der Anfrage spezifizierten Handover-Punkt eingeleitet. Dort angekommen, wird die Kontrolle über das UAV an den Client transferiert. Dazu hält jedes UAV die Information darüber vor, welcher Nutzer momentan befugt ist, Aufträge an dieses UAV zu vergeben. Standardmäßig ist dies der Host, jedoch kann diese Befugnis durch die temporäre Übergabe der Kontrolle zeitweise an einen anderen Nutzer übertragen werden. Sobald der Client als temporärer Bediener des UAV eingetragen ist, wird auf seiner Benutzeroberfläche die Möglichkeit zur Auftragsvergabe an dieses UAV freigegeben. Ab diesem Zeitpunkt kann der Client eigenständig Aufklärungsaufträge an das UAV vergeben, ohne dass sie durch den Host genehmigt werden müssen. Während dieser Zeit kann er die Kontrolle auch vorzeitig beenden oder eine Verlängerung des Nutzungszeitraums anfragen. Über diesen Zeitraum hinaus können keine Aufträge mehr vergeben werden. Für den Zeitraum der temporären Nutzung durch den Client ist die Vergabe von Aufträgen an dieses UAV für den Host ausgesetzt, um eine parallele Bedienung auszuschließen. Dies ist auf dem entsprechenden UAV-Symbol auf der taktischen Karte und in der Zeitleiste des Hosts visualisiert. Die Zeitleiste zeigt außerdem den Rest-Zeitraum der temporären Fremdnutzung an. Der Host kann durchgängig beobachten, wie das UAV genutzt wird und jederzeit einschreiten, um die Fremdnutzung zu beenden und die Kontrolle über das UAV wiederzuerlangen. Andernfalls geht das UAV automatisch wieder in die Kontrolle des Hosts über, sobald die Zeitdauer der temporären Nutzung abgelaufen ist. Dann wird der Client als temporärer Nutzer wieder ausgetragen und verliert die Möglichkeit der Auftragsvergabe. Ein bereits laufender

Auftrag wird in diesem Zuge nicht abgebrochen, sondern weiter ausgeführt. Der Host kann diesen Auftrag jedoch abbrechen, um das UAV wieder für die eigenen Zwecke zu nutzen.

Damit ist die Entscheidungshoheit des Hosts über die Fremdnutzung eines UAV permanent gegeben. Er trifft die Entscheidung über Gewährung oder Ablehnung einer Anfrage, die Zuweisung der Anfrage und kann diese Zuweisung sowohl vor als auch während der Ausführung jederzeit anpassen oder rückgängig machen.

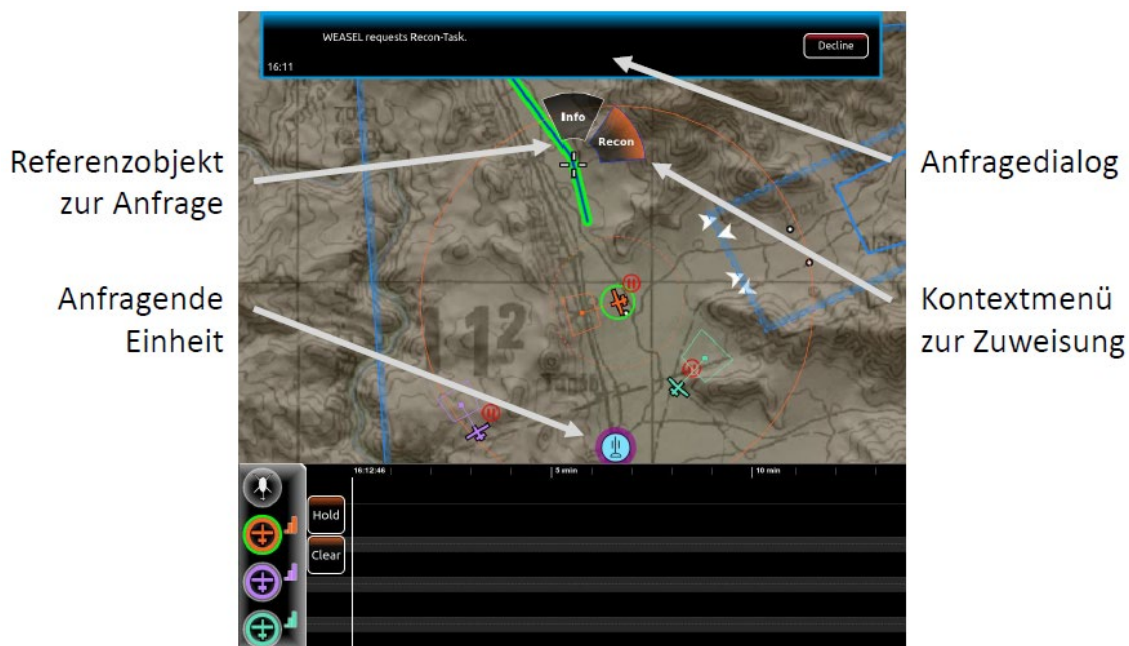


Abbildung 5-10 Nutzerinterface Host in Konfiguration „Manuell“

5.5.2.3. Entscheidungsunterstützung durch Auswahl

Analog zur Präsentation der Anfrage findet auch die Entscheidungsunterstützung durch den Planungsagenten auf der taktischen Karte im MFD des Kommandanten statt. Die Interaktion ist im wesentlichen dialogbasiert, wird jedoch durch die Darstellung zusätzlicher Elemente auf der Karte und innerhalb der Zeitleiste unterstützt, wie in Abbildung 5-11 zu sehen. Wie auch bei der manuellen Bearbeitung einer Anfrage enthält der Interaktions-Dialog die Anfrage in textueller Form sowie die Möglichkeit ihrer Ablehnung.

Um den Nutzer auf dem Automationslevel 2 zu unterstützen, soll eine möglichst umfangreiche Auswahl an potenziellen Lösungen bereitgestellt werden. Um diese in übersichtlicher Weise verfügbar zu machen, wird es ermöglicht, gezielt durch den gesamten vom Planungsagenten generierten Lösungsraum zu navigieren und die einzelnen Lösungen zu inspizieren. Mit der Visualisierung der räumlichen und zeitlichen Auswirkungen einer spezifischen Lösung in der taktischen Karte und der Zeitleiste soll ein Beitrag zur Vereinfachung des Entscheidungsproblems geleistet werden. Dadurch können positive oder negative Effekte auf den Gesamt-Missionsplan abgeschätzt werden, bevor die endgültige Entscheidung getroffen wird.

Um den räumlichen Zusammenhang zwischen Anfrage-Dialog und dem Mechanismus zur Lösungsauswahl zu gewährleisten, wurde die Integrationsmethode innerhalb des Assistenzdialogs eingebettet (siehe Abbildung 5-11). Hierzu wurde der Dialog um Schaltflächen erweitert, die es erlauben, eine spezifische Lösung zu selektieren und zwischen verschiedenen Lösungen durch zu wechseln. Mit ihnen lässt sich das zugewiesene UAV und die Position der Anfrage in der Aufgabenreihenfolge des gewählten UAV auswählen. Um sich eine Lösung anzeigen zu lassen, muss der Nutzer zunächst ein UAV spezifizieren und gelangt dadurch in das zugehörige Lösungset. Anschließend kann das angefragte Planelement dann über eine zeitliche Verschiebung im Plan des ausgewählten UAV platziert werden. Sobald eine Lösung durch den Nutzer selektiert wurde, wird der zugehörige Missionsplan sowohl in der taktischen Karte als auch in der Zeitleiste dargestellt und das Planelement der Anfrage jeweils über eine blaue Umrandung hervorgehoben. Außerdem erscheint im Assistenzdialog eine textuelle Zusammenfassung der gewählten Lösung und die Möglichkeit, diese automatisch durch den Planungsagenten umsetzen zu lassen.

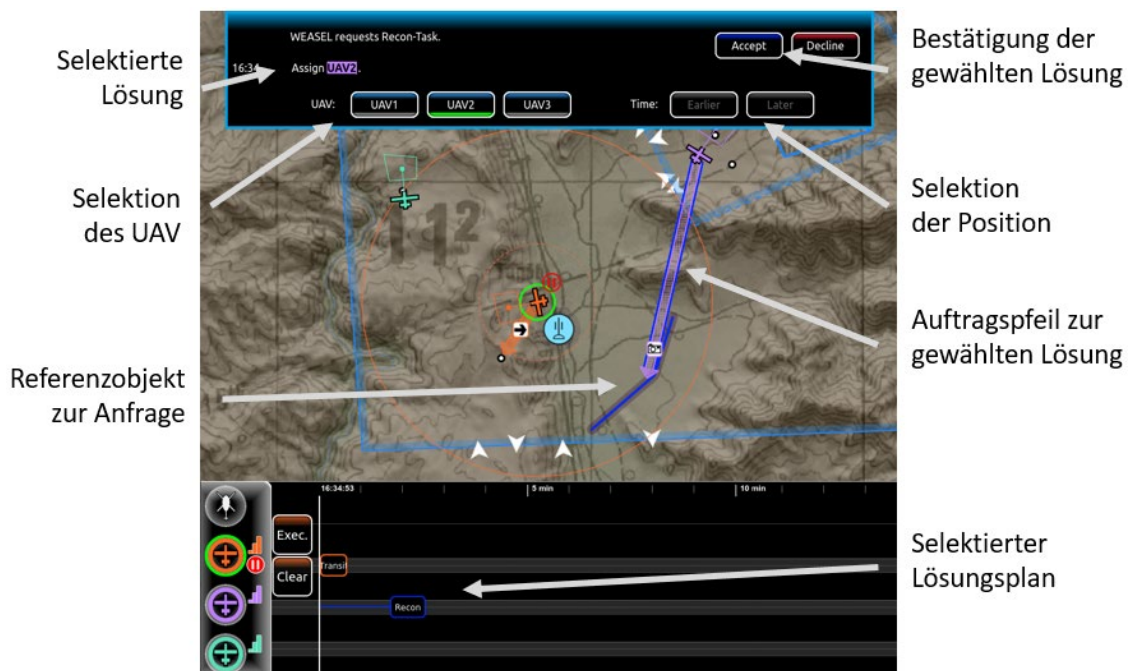


Abbildung 5-11 Nutzerinterface Host in Konfiguration „Alternativenauswahl“

5.5.2.4. Entscheidungsunterstützung durch Handlungsempfehlung

Die Interaktion auf Automationslevel 4 umfasst den Vorschlag derjenigen Lösung, die unabhängig von der UAV-Zuweisung den besten TOPSIS-Wert erzielt. Da diese Interaktion nur eine einzige Lösung umfasst, wird diese bereits vorselektiert. Entsprechend wird eine textuelle Beschreibung dieser Lösung als Vorschlag direkt im Dialogfeld präsentiert und auf der taktischen Karte und in der Zeitleiste angezeigt. Im Gegensatz zu den anderen Leveln besteht hierbei die Möglichkeit, diese Lösung unmittelbar und ohne zusätzliches

Auswahlverfahren durch den Nutzer zu akzeptieren. Dabei handelt es sich in der Abbildung 5-12 um den Vorschlag zur sofortigen Zuweisung des angefragten Aufklärungsauftrags an das orangefarbene UAV1.

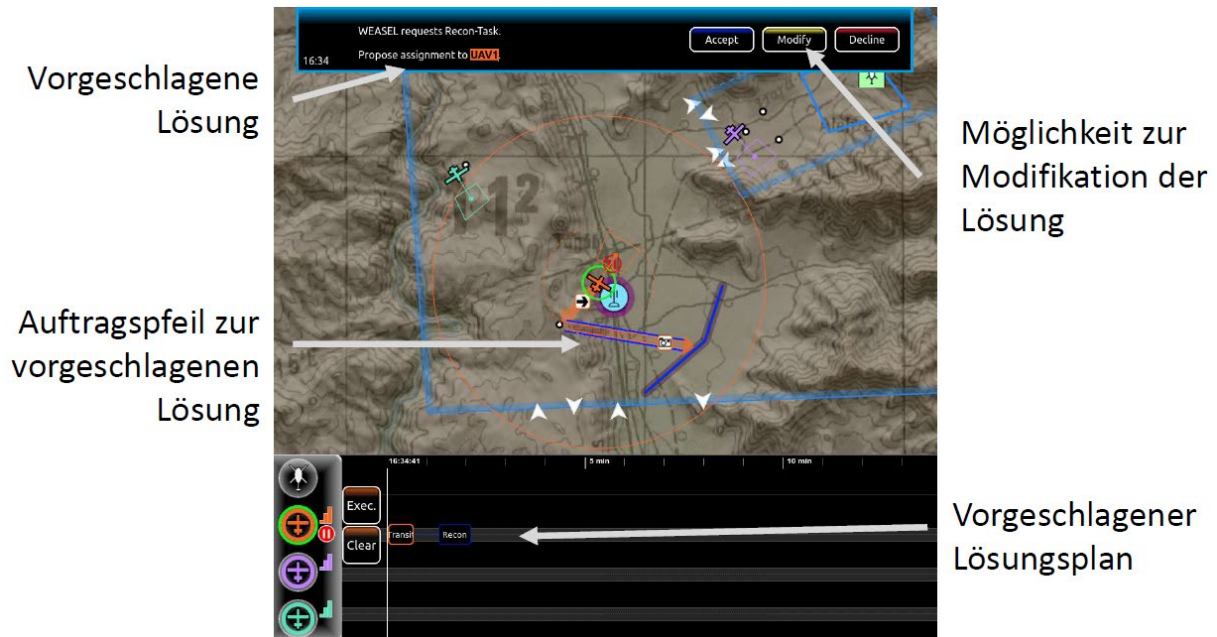


Abbildung 5-12 Nutzerinterface Host in Konfiguration „Handlungsempfehlung“

Insofern eine Lösung Optimierungen durch Umstrukturierung der ursprünglichen Missionaufgaben beinhaltet, sind diese durch eine magentafarbene Umrahmung hervorgehoben. Dabei sind die Pfeile der ursprünglichen Auftragsverteilung noch schwach gestrichelt hinterlegt, um die Änderungen am Missionsplan durch einen Vorher-Nachher-Vergleich nachvollziehbar zu machen. Abbildung 5-13 zeigt eine Lösung, die eine Umsortierung der UAV-Aufgabensequenz empfiehlt. In Abbildung 5-14 wird die Abgabe eines Auftrags an ein anderes UAV zugunsten der Ausführung der Anfrage vorgeschlagen.

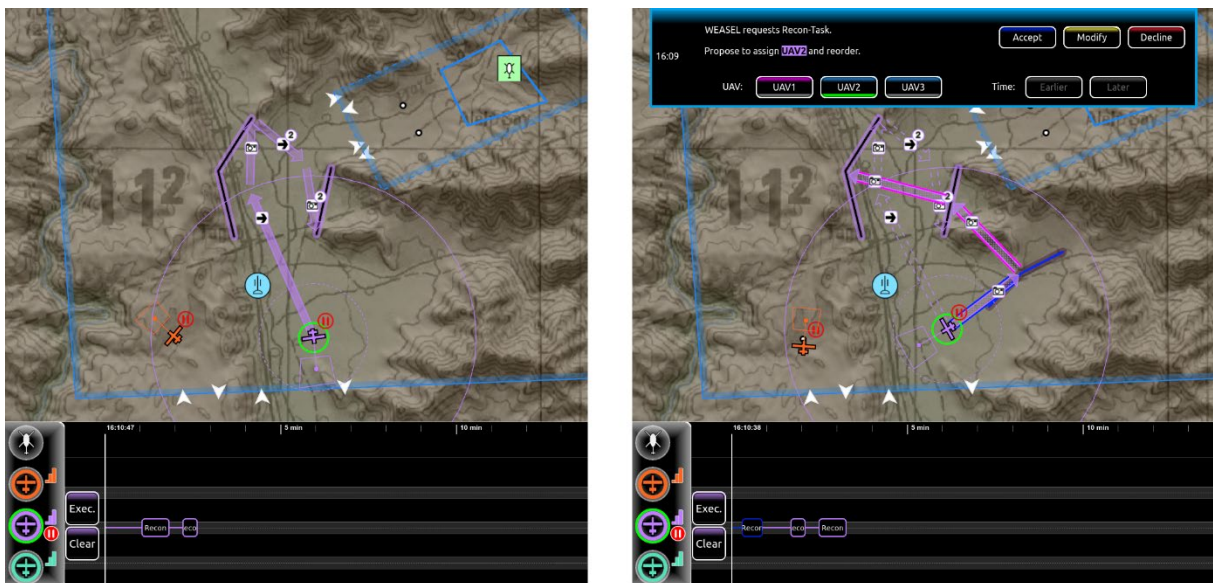


Abbildung 5-13 Vorschlag inklusive der Umsortierung eines bestehenden Auftrages (rechts) und Ausgangssituation (links).

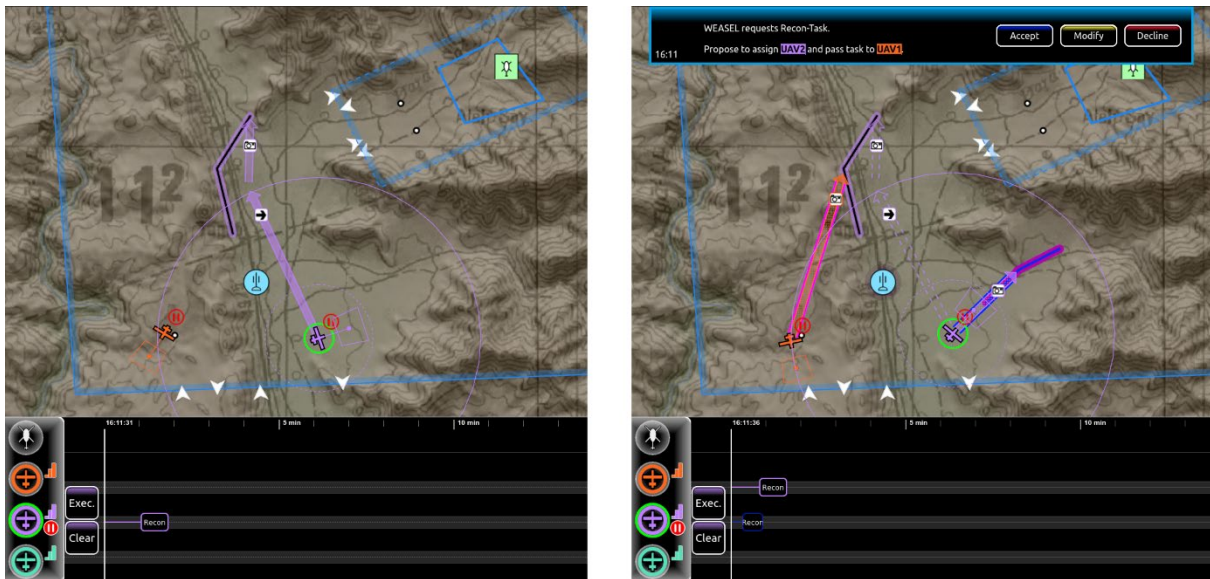


Abbildung 5-14 Vorschlag inklusive des Transfers eines bestehenden Auftrages (rechts) und Ausgangssituation (links).

5.5.2.5. Modifikationsmöglichkeiten

Zwar bringt die Handlungsempfehlung den Vorteil einer reduzierten Komplexität des Entscheidungsproblems mit sich. Jedoch beschränkt dies damit auch den Entscheidungsspielraum des Kommandanten, denn entspricht die vorgeschlagene nicht der gewünschten Lösung, ist ein Rückgriff auf die manuelle Integration erforderlich. Damit ist die Unterstützung vor allem durch eine einseitige Interaktion vom Agenten zum Nutzer geprägt. Dabei kann es diverse Gründe (z.B. taktischer Natur) geben, warum der Kommandant eine alternative Lösung gegenüber der durch den Agenten vorgeschlagenen Lösungen bevorzugen würde. Durch die Möglichkeit zur Modifikation einer dargestellten Lösung soll dem Kommandanten die Wahl einer Alternative in solch einer Situation erleichtert werden. Dazu wird es erlaubt, die UAV-Zuweisung und Positionierung der Anfrage in der Auftragssequenz über die bereits bekannten Schaltflächen im Assistenzdialog manuell abzuändern und damit durch die gesamten Lösungspläne aus Automationslevel 2 zu navigieren. Insofern eine Empfehlung modifiziert wird, erscheinen Indikatoren im Assistenzdialog (siehe Abbildung 5-15), mit denen der Nutzer zur empfohlenen Lösung zurückgelangen kann. Dazu werden die Schaltflächen farblich hervorgehoben, die betätigt werden müssten, um die empfohlene Lösung zu erhalten. Durch diese Möglichkeit der Anpassung wird die Interaktion um ein responsives Element in die umgekehrte Richtung, also vom Nutzer zum System erweitert.

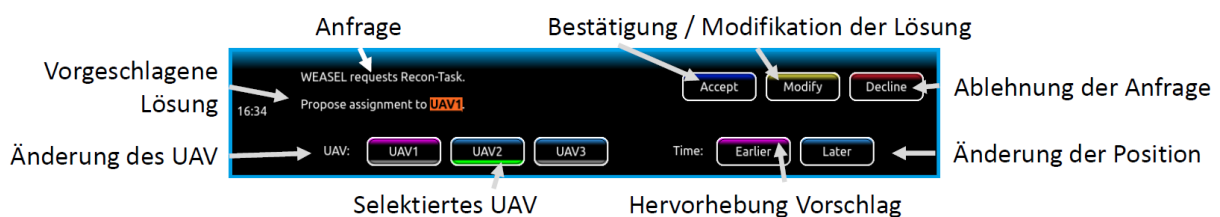


Abbildung 5-15 Modifikationsmöglichkeiten im Dialog der „Handlungsempfehlung“

6. Erprobung

Um das Nutzungskonzept und die Planungsunterstützung zu evaluieren, wurden zwei Mensch-Maschine Versuche ausgearbeitet und mit Probanden im Forschungssimulator durchgeführt. Darin wurden die entwickelten Ansätze evaluiert und ihr Einfluss auf Human-Factors Messgrößen in Human-in-the-loop Experimenten untersucht. Dabei lag der Fokus schwerpunktmäßig auf der Evaluation des Host-Arbeitsplatzes. Da der Mehrwert einer geteilten Ressourcennutzung für den Bedarfsträger naheliegend ist, konzentrierte sich die Untersuchung auf die mit der Ressourcenabgabe verbundenen Effekte für den Host.

Die Erprobung untergliederte sich in ein dediziertes Telexperiment zur gezielten Evaluierung des Nutzungskonzepts und der Planungsunterstützung (siehe auch (Roth und Schulte 2022b)) sowie einer Funktionsdemonstration unter deutlich komplexeren Anforderungen und erhöhter Realitätsnähe. Beide experimentellen Anteile waren eingebettet in eine 5-wöchige Experimentalkampagne, an der insgesamt 9 Militärhubschrauberpiloten sowie ein Flugtestingenieur teilnahmen. Tabelle 6-1 zeigt einen demografischen Überblick über die Probanden. In Anbetracht der spezifischen Anwendungsdomäne sollte die Versuchsgruppe maßgeblich aus erfahrenen Militärhubschrauberpiloten bestehen. Zwar schränkte diese Vorgabe die Gruppe der verfügbaren Teilnehmer erheblich ein, war dafür aber mit dem Vorteil verbunden, die Ausbildungszeit zu verkürzen und die Erfahrung und das Wissen von Fachleuten miteinbeziehen zu können.

Tabelle 6-1 Demografischer Überblick über die Probanden

	Alter	Flugstd.	Flugmuster	Rollen	Funktionen
1	43	>1900	Alouette II, Bo 105	Kommandant, Schwarmführer	Transport, Aufklärung
2	29	>170	Keine Aussage	Kommandant	Transport, Aufklärung, Bekämpfung
3	51	>3000	Bell UH-1D, Blackhawk, CH-53	Kommandant, Schwarmführer	Transport, SAR*
4	43	>3000	Bell UH-1D, NH-90, CH-53, Bo 105, H145	Kommandant, Schwarmführer	Transport, SAR*
5	43	>2200	Bo 105, Tiger, Alouette II	Kommandant, Schwarmführer	Aufklärung, Bekämpfung
6	51	>3600	Tiger, Bo 105	Kommandant, Schwarmführer	Aufklärung, Bekämpfung
7	44	>2500	Alouette II, Bo 105, UH-1D, Blackhawk, NH-90	Kommandant, Schwarmführer	Transport, Aufklärung, Bekämpfung, SAR*
8	48	>3700	Keine Aussage	Kommandant	Aufklärung, Bekämpfung, SAR*
9	25	>50	Tiger	Flugtestingenieur	Transport, Aufklärung, Bekämpfung, SAR*
10	44	>2000	Bo 105, Tiger, UH-1D, EC135	Kommandant, Schwarmführer	Transport, Aufklärung, Bekämpfung

* Search and Rescue

Jeweils zwei Piloten wirkten über den Zeitraum von einer Woche sowohl einzeln als auch gemeinsam in verschiedenen Versuchen mit. Neben dem hier beschriebenen Experiment durchliefen die Probanden dabei auch zu anderen Forschungsthemen zugehörige Experimente mit abweichenden Untersuchungsfragestellungen im Zusammenhang mit MUM-T. Zu Beginn erhielt jeder Proband eine Einführung, die die Grundkenntnisse über die Einsatzart MUM-T und den Forschungssimulator vermittelte. Daran schloss sich ein umfangreiches Basistraining an, um sich mit dem Flugsimulator vertraut zu machen. Trainiert wurde insbesondere der Umgang mit der Flugsteuerung und dem Multifunktionsdisplay, einschließlich der Missionsplanung und dem Einsatz der UAVs. Dementsprechend vorbereitet, durchliefen die Probanden innerhalb der folgenden Tage vier unterschiedliche Einzelexperimente sowie die Funktionsdemonstration im komplexen Anwendungsfeld. Der schematische Experimentalablauf ist in Abbildung 6-1 dargestellt.

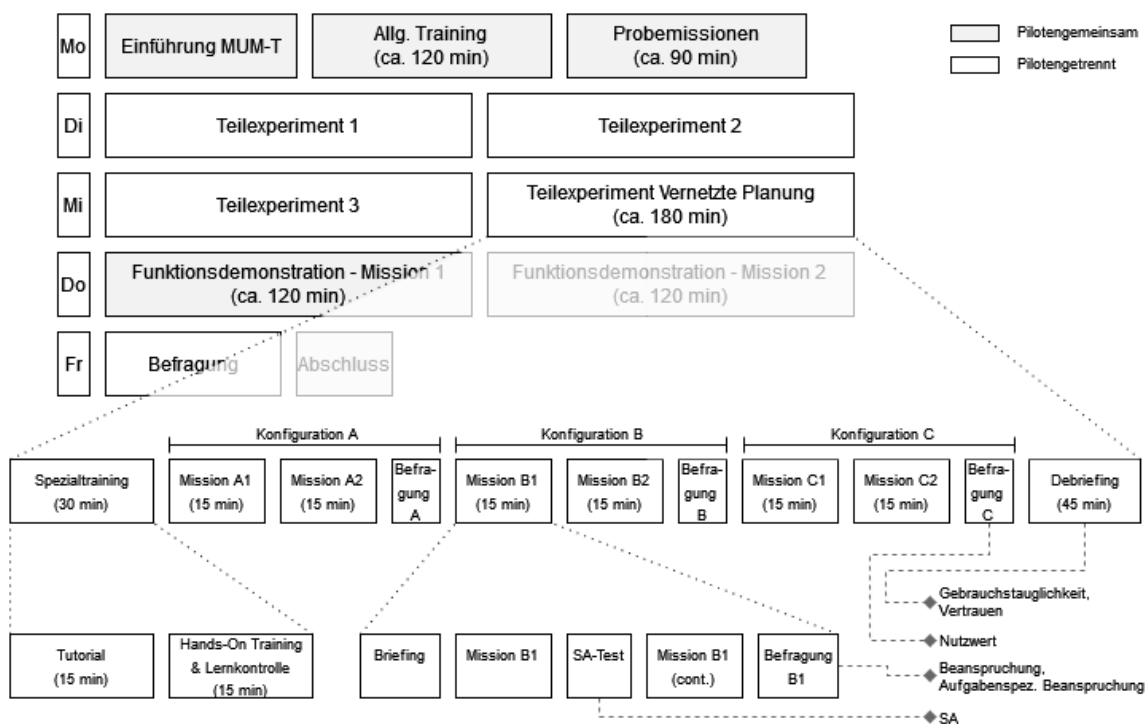


Abbildung 6-1 Schematischer Experimentalablauf für einen Probanden

6.1. Einzeluntersuchung – Unterstützung der Anfragenbearbeitung

Das Einzelexperiment stützte sich auf die Untersuchung in kurzen Missionsausschnitten. Diese kompakte Form zielte darauf ab, die begrenzte Experimentalzeit möglichst effektiv zu nutzen und auf die dedizierte Untersuchung der Forschungsfragen zu fokussieren. Dies ermöglichte es wiederum, eine größere Menge an Messdaten zu sammeln und die Versuche kürzer zu gestalten, um Ermüdungserscheinungen vorzubeugen. Dazu waren die Missionsausschnitte im Vergleich zu realen Missionen zeitlich komprimiert und wurden bereits nach Erreichen eines bestimmten

Fortschritts beendet. Dieser Zeitpunkt wurde dabei so gewählt, dass die Mission stets im Anschluss an eine erfolgte Zwischenlandung beendet wurde und somit ein gedanklicher Abschluss der Mission trotzdem möglich war. Das Risiko nachteiliger Effekte auf Präsenz und Immersion musste dafür in Kauf genommen werden.

6.1.1. Untersuchungs-Schwerpunkte

Die Untersuchung hatte zum Ziel, mögliche Vor- und Nachteile der unterschiedlichen Assistenzlevel des Planungsagenten bei der Einbindung von Anfragen zu identifizieren. Insbesondere wurden Auswirkungen auf typische Human-Factors Messgrößen, aber auch die Präferenz der Probanden untersucht. Dazu wurden die folgenden Untersuchungsfragestellungen betrachtet:

- Wie wirkt sich das Bereitstellen von Lösungen bzw. die Empfehlung einer expliziten Lösung auf die Performance der Anfragenbearbeitung aus?
- Wie wirkt sich das Bereitstellen von Lösungen bzw. die Empfehlung einer expliziten Lösung auf das Situationsbewusstsein aus?
- Wie wirkt sich das Bereitstellen von Lösungen bzw. die Empfehlung einer expliziten Lösung auf die Beanspruchung aus?

Weiterhin sollte das Experiment Aufschluss über folgende Aspekte liefern:

- Wurde die Planungsunterstützung als nützlich empfunden?
- War das Vertrauen in die Planungsunterstützung angemessen?

6.1.2. Experimentelles Design

Da die Erlangung statistisch signifikanter Ergebnisse aufgrund der erwartungsgemäß geringen Anzahl an Versuchspersonen unwahrscheinlich war, wurde auf eine strenge Formulierung von Hypothesen verzichtet. Dennoch sollte ein sorgfältiges experimentelles Design für eine möglichst saubere Datengrundlage sorgen.

6.1.2.1. Versuchsaufbau

In diesem Experiment wurde dem Probanden die Rolle des Kommandanten innerhalb einer militärischen Hubschraubertransportmission zugewiesen. Zur Erfüllung dieser Aufgabe waren drei UAVs mit Aufklärungsfähigkeiten unterstellt, die auch anderen Nutzern im Einsatzgebiet verfügbar gemacht werden sollten. Aufgabe des Probanden war demnach die Durchführung der Hubschraubertransportmission, insbesondere die Planung und der Einsatz der UAVs sowie die Koordinierung des nutzerübergreifenden UAV-Einsatzes. Die Rolle des fliegenden Piloten

wurde von einem trainierten Mitarbeiter wahrgenommen, der die Flugaufgaben auf Anweisung des Probanden durchführte und ansonsten keinen aktiven Einfluss auf das Missionsgeschehen nehmen durfte. Parallel dazu wurden verschiedene Missionen von bodengebundenen Nutzern simuliert, die berechtigt waren UAV-bezogene Anfragen zu stellen. Die Bodenoperationen liefen dabei, abhängig vom Missionsfortschritt des Hubschraubers, vollständig automatisiert ab und sendeten zu bestimmten Zeitpunkten Anfragen zur UAV-Nutzung an die Probanden. Auf Grundlage ihrer aktuellen Situation mussten die Probanden entscheiden, ob die Fremdnutzung mit der eigenen Missionsdurchführung vereinbar war, welchem UAV die Anfrage zugeordnet und wie sie in den jeweiligen UAV-Plan eingeordnet werden sollte. Dieser Entscheidungsprozess wurde in verschiedenen Versuchskonfigurationen unterschiedlich stark durch den Planungsagenten unterstützt. Eine Überbeanspruchung der Probanden sollte per Design vermieden werden, damit die Piloten genügend Zeit und ausreichend mentale Ressourcen besaßen, um sich mit dem Problem der Integration einer Anfrage und den dafür bereitgestellten Konfigurationen zu befassen.

Von einer Kontrollstation aus wurde die Simulation durch den Versuchsleiter gestartet und gesteuert. Der Großteil aller relevanten Aktivitäten zur Steuerung der Versuche waren automatisiert, um eine Einheitlichkeit über alle Probanden zu gewährleisten.

6.1.2.2. Variablen und Operationalisierung

Für den Versuch wurde ein 1x3 *Within-Subjects*¹⁴ Design gewählt. Dabei wurde das Automationslevel als einzige *unabhängige Variable* durch den Experimentator verändert, um Effekte auf die abhängigen Variablen zu untersuchen. Das Automationslevel erstreckte sich dabei über die drei Konfigurationen:

- Manuell (LOA 1),
- Alternativenauswahl (LOA 2) und
- Handlungsempfehlung (LOA 4).

Jeder Proband wurde dabei mit allen drei Konfigurationen konfrontiert, um Effekte unmittelbar auf die Konfigurationsänderung zurückführen zu können. Die *Abhängigen Variablen* und ihre Operationalisierung wurden folgendermaßen gewählt:

- *Beanspruchung*: Die generelle Beanspruchung in jeder Mission wurde über einen subjektiven Bedford-Fragebogen (Roscoe 1984) gemessen.

¹⁴ Beim *Within-Subjects* Design durchlaufen alle Probanden sämtliche zu untersuchenden Konfigurationen eines Experiments. Bei der Auswertung werden die Ergebnisse derselben Versuchsperson für die unterschiedlichen Konfigurationen paarweise gegenübergestellt. Beim *Between-Subjects* Design werden die Probanden gleichmäßig auf die Vergleichskonfigurationen verteilt, sodass jede Versuchsperson nur eine der Konfigurationen durchläuft. Bei der Auswertung werden die Ergebnisse der jeweiligen Gruppen gegeneinander verglichen.

- *Aufgabenspezifische Beanspruchung:* Wie beanspruchend die Einbindung von Fremdanfragen im Kontext der Gesamtmission war, wurde über eine Selbsteinschätzung anhand einer 7-Punkte Likert-Skala (Likert 1932) erfasst.
- *Situationsbewusstsein:* Über einen an das SAGAT-Prinzip (Endsley 1988) angelehnten Fragebogen wurde das Situationsbewusstsein bezüglich des Aufenthalts der UAVs überprüft. Dazu wurde die Simulation zu einem unbekanntem Zeitpunkt während der Missionsdurchführung pausiert und die derzeitigen Positionen der drei unterstellten UAVs abgefragt. Um auch die Unsicherheit bzgl. der angegebenen Positionen zu erfassen, sollte weiterhin ein möglicher Aufenthaltsbereich um jede angegebene UAV-Position skizziert werden.
- *Leistung:* Zur Operationalisierung der Leistung wurde die Zeit gemessen, die die Probanden zur Bearbeitung einer Anfrage benötigten.
- *Nutzwert:* Zur Bewertung des Nutzwerts der einzelnen Konfigurationen wurde eine modifizierte Cooper-Harper Bewertungsskala (Cummings et al. 2006) genutzt.
- *Einbindung der Anfrage:* Hierzu wurde gemessen, wie viele der Anfragen genehmigt und wie viele abgelehnt wurden.

Abseits des Konfigurationsvergleichs wurden zur Bewertung der Planungsunterstützung weitere Evaluierungskriterien erfasst:

- *Akzeptanz vorgeschlagener Lösungen:* Hierzu wurde quantifiziert, wie häufig die vorgeschlagenen Lösungen angenommen oder abgelehnt wurden. Eine übermäßige Ablehnungsrate würde darauf deuten, dass die Vorschläge entweder sehr schlecht auf den Entscheidungsprozess des Nutzers abgestimmt sind oder dass ein zu niedriges Vertrauen in den Planungsagenten vorherrscht. Im Gegensatz dazu kann ein übermäßig häufiges Annehmen der Vorschläge auf ein zu hohes bzw. blindes Vertrauen hindeuten.
- *Mehrwert der Planungsunterstützung:* Die Probanden sollten bewerten, ob sie die Bereitstellung von Lösungsoptionen bzw. einer Handlungsempfehlung als nützlich oder überflüssig erachten. Weiter wurde erfasst, ob die Evaluierung möglichen Optimierungspotenzials durch Umsortierung bzw. Abgabe von UAV-Aufgaben als nützlich erachtet wurde. Beide Bewertungen erfolgten über eine 7-Punkte Likert-Skala¹⁵.
- *Vertrauen:* Das Vertrauen in die Planungsunterstützung sollte zum einen durch eine subjektive Befragung mittels eines Trust-in-Automation Fragebogens (Schaefer et al. 2016) erfasst werden.
- *Gebrauchstauglichkeit:* Die empfundene Gebrauchstauglichkeit wurde über einen Post-Study System Usability Fragebogen (Lewis 1995) gemessen.

¹⁵ Hierbei waren die zugehörigen Fragen einmal positiv und einmal negativ formuliert, um eine Beeinflussung durch die Formulierung der Frage auszuschließen.

6.1.2.3. Kontrolle der Störvariablen

Störeinflüsse, die die Messergebnisse negativ beeinflussen könnten, wurden durch folgende Maßnahmen kontrolliert:

- einheitliches Training und Wissenskontrolle, um gleichmäßiges Wissensniveau über alle Probanden zu gewährleisten,
- gleichmäßig veränderte Konfigurations-Reihenfolge über alle Probanden, um einem Einfluss von Lerneffekten auf die Daten entgegenzuwirken¹⁶,
- Durchführung der Versuche in abgetrennter Simulationsumgebung, um Störungen durch andere Mitarbeiter im Tagesbetrieb zu vermeiden, und
- Durchführung zu gleichen Tageszeiten, um ähnliche Geräusch-, Licht- und Temperaturverhältnisse zu erhalten.

6.1.3. Durchführung

Aufbauend auf das allgemeine Training erhielten die Probanden vor Start des Experiments eine vertiefende Einführung in die zu verwendenden Funktionalitäten, die zu untersuchenden Konfigurationen und die genutzten Datenerhebungen. Ein ca. 30-minütiges Spezialtraining beinhaltete die Visualisierung und manuelle Bearbeitung von Fremdanfragen sowie die Interaktion mit Lösungsvorschlägen. Dieses begann mit einer theoretischen Einweisung durch Selbststudium eines Dokuments, gefolgt von einem Hands-On Training zur Wiederholung und einer Kontrolle des erlernten Wissens im Simulator. Innerhalb dieser Praxiseinheit absolvierten die Teilnehmer mehrere kurze Probesimulationen, in denen sie sich selbstständig mit den verschiedenen Versuchskonfigurationen vertraut machen und verbleibende Fragen klären konnten.

Im Anschluss an das Training durchlief jeder Teilnehmer sechs kurze Hubschrauber-Transportmissionen, in denen drei homogene UAVs (d.h. mit identischen Fähigkeiten) unterstellt waren. Nach einer vorher festgelegten Reihenfolge wurde die untersuchte Konfiguration nach jeweils zwei Missionen gewechselt. Jede Mission dauerte etwa 10 bis 15 Minuten. In einem Missionsbriefing wurde der Proband in die Lage und das Missionsziel eingeführt. Darüber hinaus wurden alle Einheiten im Einsatzgebiet vorgestellt, von denen mögliche Anfragen zu erwarten waren. Innerhalb jeder Mission erhielten die Teilnehmer drei zu bearbeitende UAV-Nutzungsanfragen. Je nach untersuchter Konfiguration wurde ihre Einbindung in die eigene Missionsplanung in unterschiedlichem Maße vom Planungsagenten unterstützt. Die Nutzung der Assistenzfunktionalität war dabei jedoch nicht zwingend

¹⁶ Eine Veränderung der Konfigurationsreihenfolge ist insbesondere bei einem Within-Subjects Design von großer Bedeutung, da der Lerneffekt einen erheblichen Einfluss auf die Messergebnisse und die Bewertung der Konfigurationen haben kann

vorgeschrieben. Den Teilnehmern stand jederzeit die Möglichkeit offen, Anfragen manuell zu integrieren. Abbildung 6-2 zeigt eine der Missionen. Hierbei war der Auftrag ein Materialtransportflug von der Operationsbasis zum Checkpoint „Spider“. Hierfür mussten die vorgegebenen, in schwarz dargestellten Routen durch die UAVs aufgeklärt werden. Zusätzlich befanden sich eine Patrouille und ein weiterer Checkpoint im Operationsgebiet. Während des Flugs musste der Proband die folgenden drei Anfragen bearbeiten:

1. Aufklärung der Marschroute durch die Patrouille
2. Aufklärung des Bereichs durch Checkpoint Spider
3. Temporäre UAV-Kontrolle (5 min) durch den zusätzlichen Checkpoint

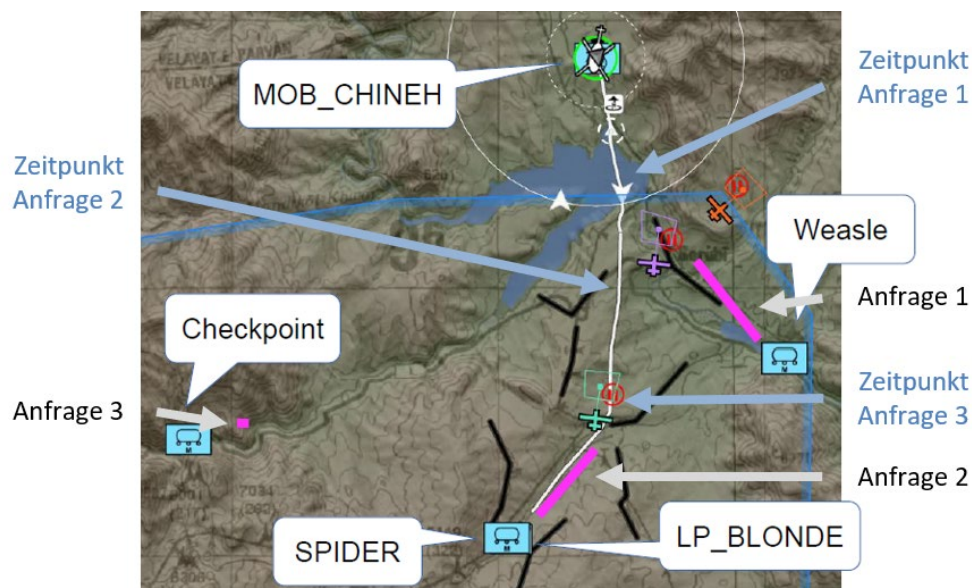


Abbildung 6-2 Missionsgebiet und chronologischer Ablauf einer Kurzmission

In jeder der sechs Missionen wurde die Simulation unangekündigt unterbrochen, um das Situationsbewusstsein zu messen. Nach Abschluss jeder Mission wurden die Probanden zu ihrer generellen Beanspruchung befragt. Dazu sollten die Probanden anhand der Bedford Mental Workload Skala bewerten, wie beanspruchend das erlebte Szenario empfunden wurde. Im Anschluss daran wurde die aufgabenspezifische Beanspruchung, die als Folge der Integration von Fremdanfragen empfunden wurde, über eine separate Einzelbewertung erfasst. Vor dem Wechsel der Konfiguration wurde ihr jeweiliger Nutzwert über die modifizierte Cooper-Harper Bewertungsskala bewertet.

Nach Beendigung aller Missionen wurde die Gebrauchstauglichkeit und das Vertrauen in die Assistenzfunktionalität mit Hilfe des Post-Study-System-Usability Fragebogens und des Trust-in-Automation Fragebogens gemessen. Beide Fragebögen eignen sich nicht nur zur Ermittlung einer Systembewertung, sondern auch zur Identifizierung einzelner Aspekte, um die Benutzerfreundlichkeit und das Vertrauen in das System zu verbessern. Außerdem wurde der Mehrwert durch die Planungsunterstützung erfasst. In einem abschließenden Interview wurde

weiteres Feedback zum Konzept, möglichen Verbesserungen und zusätzlichen Systemfunktionen gesammelt.

Eine objektive Validierung der allgemeinen Lösungsgenerierung erfolgte über eine Analyse zur Nutzung der generierten Lösungen. Dazu wurde ausgewertet, ob die bereitgestellte Entscheidungsunterstützung angenommen wurde oder ob die Probanden auf eine manuelle Integration zurückgriffen. Darüber hinaus liefert die Häufigkeit, mit der eine vorgeschlagene Lösung akzeptiert oder geändert wurde, Hinweise auf die Validität der multikriteriellen Lösungsbewertung. Entschied sich der Proband für eine andere Lösung als die vorgeschlagene, wurden diese Fälle analysiert und zusätzliches Feedback über die Gründe gesammelt.

6.1.4. Ergebnisse und Diskussion

Die Auswertung des Experiments teilt sich auf in die Betrachtung mehrerer Aspekte. Erstens soll das entwickelte Nutzungskonzept, inklusive der hierarchischen Nutzerstruktur und dem Anfrage-Konzept ausgewertet werden. Zweitens sollen die untersuchten Konfigurationen hinsichtlich ihres Einflusses auf Situationsbewusstsein, Performance und Workload gegeneinander verglichen werden. Zuletzt soll das Unterstützungskonzept evaluiert werden.

6.1.4.1. Konzept des nutzerübergreifenden UAV-Einsatzes

Die hierarchische Rollenverteilung wurde von den Probanden gut angenommen. Vor dem Hintergrund der militärischen Luftfahrt entsprach eine hierarchisch geprägte Struktur ebenfalls ihrem gewohnten Arbeitsumfeld. Da es sich bei den Probanden maßgeblich um Piloten mit Erfahrung in der Kommandanten-, respektive Schwarmführerrolle¹⁷ handelte, fiel es ihnen auch leicht, die Rolle des Hosts als Entscheidungsträger anzunehmen. Das Vorgehen, dass eine Fremdnutzung von einem Client zunächst angefragt und anschließend durch den Host genehmigt werden musste, wurde ebenfalls befürwortet. Insbesondere die durchgängige Entscheidungshoheit wurde von den Probanden als essenziell empfunden, um die Durchführung des eigenen Auftrags jederzeit gewährleisten zu können.

Grundsätzlich herrschte ein hohes Vertrauen in das Handeln der Clients. Die Probanden hatten prinzipiell keine Bedenken, dass Anfragen unnötigerweise gestellt werden könnten, dass UAVs unter temporärer Kontrolle unsachgemäß genutzt würden oder dass ein Client falsche Angaben zur Notwendigkeit einer Fremdnutzung machen würde.

¹⁷ Ein Schwarmführer ist für die Koordinierung mehrerer (i.d.R. zwischen 4 und 6) Luftfahrzeuge innerhalb einer gemeinsamen Formation (dem Schwarm) verantwortlich

6.1.4.2. Konfigurationsvergleich

Nachfolgend wird der Einfluss der Entscheidungsunterstützung in den verschiedenen Konfigurationen auf die abhängigen Variablen ausgewertet.

Mentale Beanspruchung:

Über den Bedford Mental Workload Fragebogen wurde die generelle Beanspruchung über die gesamte Mission erfasst, d.h. sowohl die Planung und Durchführung der eigenen Transportmission als auch die Einbindung von UAV-Nutzungsanfragen externer Einheiten. Dabei lassen die Ergebnisse laut Abbildung 6-3 keine Veränderung der empfundenen Beanspruchung über die verschiedenen Konfigurationen erkennen. Im Mittel wurde die Beanspruchung über alle Missionen mit einer Wertung zwischen 2 und 3 bewertet. Demzufolge empfanden die Probanden die mentale Beanspruchung als niedrig und hatten stets ausreichend Kapazität, um alle Aufgaben zu erfüllen. Daraus lässt sich schließen, dass sie in den Missionen nicht überbeansprucht waren.

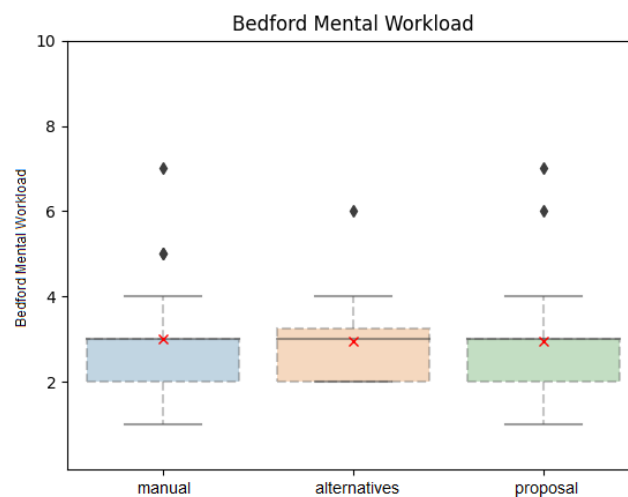


Abbildung 6-3 Ergebnisse Beanspruchung im Konfigurationsvergleich

Aufgabenspezifische Beanspruchung:

Im Unterschied zur generellen Beanspruchung zeigen sich konfigurationsbedingte Unterschiede in der aufgabenspezifischen Beanspruchung, die als Folge der Integration von Anfragen empfunden wurde (siehe Abbildung 6-4). Dabei wurde eine Senkung infolge der Entscheidungsunterstützung erwartet, weil eine Lösung nicht selbst erarbeitet werden musste, sondern aus einem bereitgestellten Portfolio ausgewählt werden konnte. Entgegen dieser Annahme ist zwischen den Konfigurationen manuelle Integration (M: 2.05; SD: 0.97)¹⁸ und Alternativenauswahl (M: 2.30; SD: 1.00) jedoch ein Anstieg zu beobachten. Dieser könnte auf eine erhöhte visuelle Belastung infolge der Darstellung eines selektierten Lösungsplans auf der

¹⁸ Jeweils Mittelwert (engl. Mean – M) und Standardabweichung (engl. Standard Deviation – SD)

Karte und der Zeitleiste zurückgeführt werden. Sowohl die visuelle Aufnahme der Lösung als auch der Abgleich, ob die dargestellte Lösung der gewünschten entspricht, erfordern mentale Ressourcen. Mit einem häufigen Abändern der Lösung per „Durchschalten“ durch die verschiedenen Lösungspläne, potenziert sich dieser Aufwand. Denn mit jeder Änderung der Lösung verändert sich auch die Darstellung des resultierenden Missionsplans auf der taktischen Karte, die zunächst visuell aufgenommen und anschließend mental verarbeitet werden muss. Damit würden das Inspizieren und Überprüfen der bereitgestellten Lösungen eine zusätzliche Belastung induzieren, die einem beanspruchungssenkenden Effekt durch die Lösungsbereitstellung entgegenwirkt.

Eine weitere Ursache könnte sein, dass sich die Menge zu evaluierender Lösungen mit der Bereitstellung durch den Agenten erhöht. Immerhin werden durch den Planungsagenten auch stets Lösungen bereitgestellt, bei denen das Einfügen einer Anfrage zur Umsortierung bestehender Aufträge führt. Derartige Lösungen wurden bei der manuellen Integration seltener in Erwägung gezogen, weil sie mit einem deutlichen Mehraufwand verbunden wären. Insbesondere ergeben sich durch das Einfügen einer Anfrage komplexere Auswirkungen auf alle nachfolgenden Aufträge, die bei der Bewertung evaluiert werden müssen. Wesentlich einfacher gestaltete es sich, eine Anfrage ans Ende der Auftragssequenz anzuhängen. Werden solche Lösungen jedoch zur Auswahl bereitgestellt, erhöht sich wiederum die Anzahl potenzieller Möglichkeiten, die der Mensch für sich evaluieren muss, und infolgedessen auch die Komplexität der Lösungsfindung.

Mit einer Handlungsempfehlung (M: 1.80; SD: 1.25) wurde die Beanspruchung durch eine Anfrage am niedrigsten bewertet. Hier zeigt sich insbesondere im Vergleich zur Konfiguration Alternativenauswahl ein positiver Effekt, der maßgeblich auf die Selektion und den Vorschlag der ausgewählten Handlungsoption zurückzuführen ist. Je besser die vorgeschlagene Lösung der Vorstellung des Nutzers entsprach, desto seltener war es erforderlich, den Entscheidungsprozess vollständig zu durchlaufen und die Lösung anzupassen. Gleichzeitig senkte sich also möglicherweise die Notwendigkeit zum Vergleich verschiedener Optionen und infolgedessen auch die Aufgabenkomplexität.

Da die aufgabenspezifische Beanspruchung auch im Vergleich zur manuellen Integration (M: 2.05; SD: 0.97) niedriger bewertet wurde, kann man davon ausgehen, dass die Handlungsempfehlung nicht nur eine Kompensation des Anstiegs durch die Alternativenauswahl, sondern auch eine zusätzliche Vereinfachung der Aufgabe bewirken konnte.

Die Messung ergab demnach einen konfigurationsbedingten Effekt auf die Beanspruchung in Bezug auf die Einbindung von Fremdanfragen, der in der Bewertung der Gesamt-Beanspruchung nicht auftrat. Dabei kann die aufgabenspezifische Beanspruchung als initialer Effekt infolge einer Anfrage interpretiert werden, der durch die Entscheidungsunterstützung

beeinflusst wurde. Demgegenüber stellt die Erfassung der allgemeinen Beanspruchung den Langzeiteffekt auf die gesamte Mission dar, der von den Probanden auf einem ähnlichen Level gehalten werden konnte. Daraus ließe sich ableiten, dass der Belastungssprung, der infolge einer Anfrage auftrat, mit einer Handlungsempfehlung weniger stark kompensiert werden musste als in den anderen Konfigurationen.

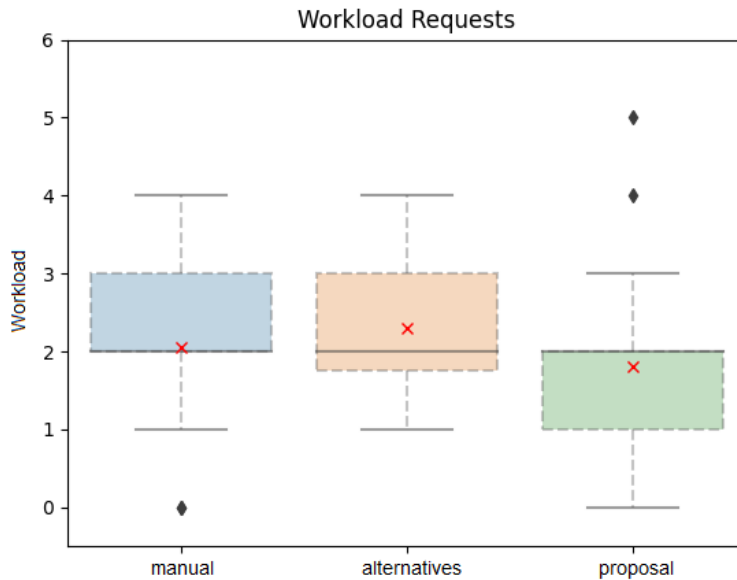


Abbildung 6-4 Ergebnisse aufgabenspezifische Beanspruchung im Konfigurationsvergleich

Situationsbewusstsein:

Die Auswertung der Positionsbestimmung (in km) ergab, dass die Abweichungen zwischen den angegebenen und den tatsächlichen UAV-Positionen bei manueller Integration (M: 1.91; SD: 0.72) und Alternativenauswahl (M: 1.86; SD: 0.70) deutlich niedriger ausfielen als mit einer Handlungsempfehlung (M: 2.39; SD: 1.16). Abbildung 6-5 zeigt die Ergebnisse.

Die Probanden konnten die tatsächlichen Positionen der UAVs demzufolge schlechter wiedergeben, wenn sie einen Lösungsvorschlag zur Integration einer Anfrage erhielten. Dieses Ergebnis deutet darauf hin, dass eine eigenständige Lösungsfindung, wie sie bei der manuellen Integration und der Alternativenauswahl erforderlich ist, zuträglich zum Situationsbewusstsein zu sein scheint. Durch den Prozess der Entscheidungsfindung prägen sich der resultierende Lösungsplan und die Gründe für die entsprechende Entscheidung möglicherweise besser in das Bewusstsein ein. Wird dieser Prozess durch Vorgabe einer Handlungsempfehlung abgekürzt, werden Charakteristiken einer Lösung möglicherweise nicht mehr so umfangreich evaluiert und verankern sich damit nicht so stark im Situationsbewusstsein. Demzufolge erweist es sich im Nachhinein evtl. als schwieriger, die Entscheidung zu rekonstruieren und sich daraus die UAV Positionen abzuleiten.

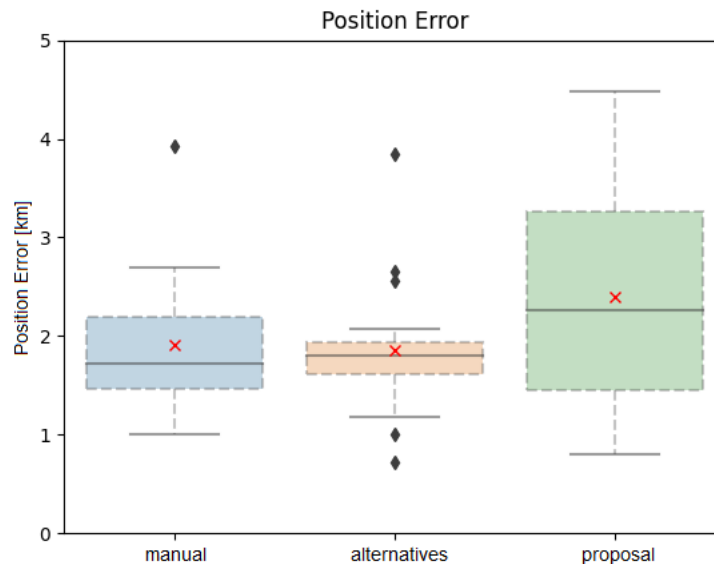


Abbildung 6-5 Ergebnisse Situationsbewusstsein im Konfigurationsvergleich

Ebenso fiel der angegebene Aufenthaltsbereich (in km²), den die Probanden um die angenommenen UAV-Positionen einzeichnen sollten, größer aus, wenn sie durch eine Handlungsempfehlung (M: 3.23; SD: 2.20) unterstützt wurden. Folglich schien die Unsicherheit über die tatsächliche Position eines UAV größer zu sein als bei der manuellen Integration (M: 2.48; SD: 1.47) und der Alternativenauswahl (M: 1.97; SD: 1.22). Die Ergebnisse sind in Abbildung 6-6 dargestellt. Trotz dessen es sich hierbei um eine rein subjektive Einschätzung der Piloten handelt, deckt sich das Ergebnis mit den objektiven Daten aus der Positionsbestimmung. Offenbar war es den Probanden also bewusst, dass sie die UAV-Positionen schlechter wiedergeben konnten als in den anderen beiden Konfigurationen. Dieses Ergebnis kann auch durch einzelne Aussagen der Piloten gestützt werden, in denen die Wahrnehmung eines reduzierten Situationsbewusstseins hinsichtlich der UAV Positionierung und der Auftragsvergabe geäußert wurde.

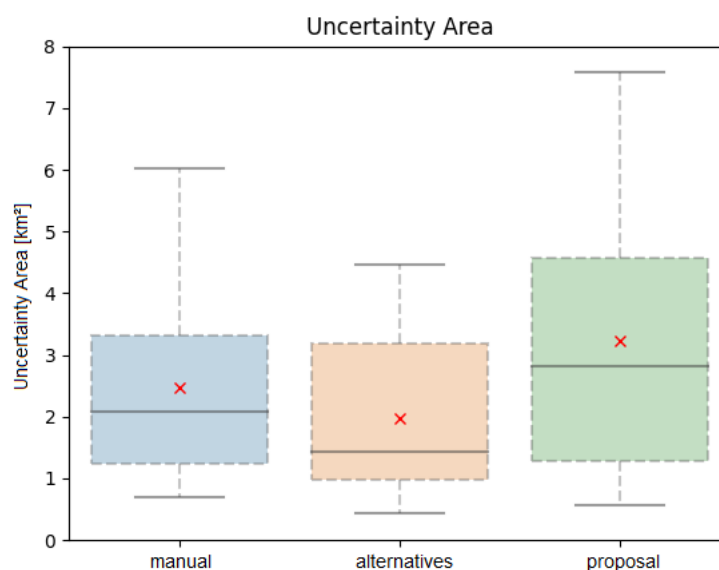


Abbildung 6-6 Ergebnisse Unsicherheit des Aufenthaltsbereichs im Konfigurationsvergleich

Leistung:

Die Bearbeitungszeit (in s) von Anfragen fiel bei manueller Integration (M: 25.15; SD: 17.55) höher aus als bei den Vergleichskonfigurationen der Alternativenauswahl (M: 17.93; SD: 6.36) sowie der Handlungsempfehlung (M: 16.67; SD: 6.10). Demnach konnte die Bereitstellung von Lösungen dazu beitragen, dass Anfragen in mehreren Fällen schneller beantwortet und insbesondere starke Ausreißer eliminiert werden konnten (siehe Abbildung 6-7).

Diese Zeitersparnis könnte auf einen verringerten mentalen Aufwand bei der Anfragebearbeitung zurückzuführen sein. Da die zu erwartenden Auswirkungen einer spezifischen Lösung durch den Planungsagenten ermittelt und dem Nutzer visualisiert wurden, mussten Auswirkungen auf die Auftragssequenzen und den Zeitplan nicht selbst erarbeitet werden. Dementsprechend konnten potenzielle Lösungen ggf. zügiger bewertet und eine Entscheidung schneller getroffen werden. Auch die vereinfachte Bearbeitung innerhalb des Anfragedialogs sowie die Auswahl einer Lösung aus einem gegebenen Portfolio können einen zeitlichen Vorteil gegenüber der manuellen Integration einer Anfrage bewirkt haben.

Zwischen den Konfigurationen Alternativenauswahl und Handlungsempfehlung fielen die Bearbeitungszeiten ähnlich aus. Trotzdem konnten mit der Vorgabe einer Handlungsempfehlung vereinzelt noch schnellere Entscheidungen getroffen werden. Auch hierfür kann die Beschleunigung des Entscheidungsprozesses durch eine Handlungsempfehlung als mögliche Ursache angebracht werden. Denn je besser die vorgeschlagene Lösung der Vorstellung des Nutzers entspricht, desto geringer fällt der zeitliche Aufwand für die Selektion oder den Vergleich alternativer Lösungen aus.

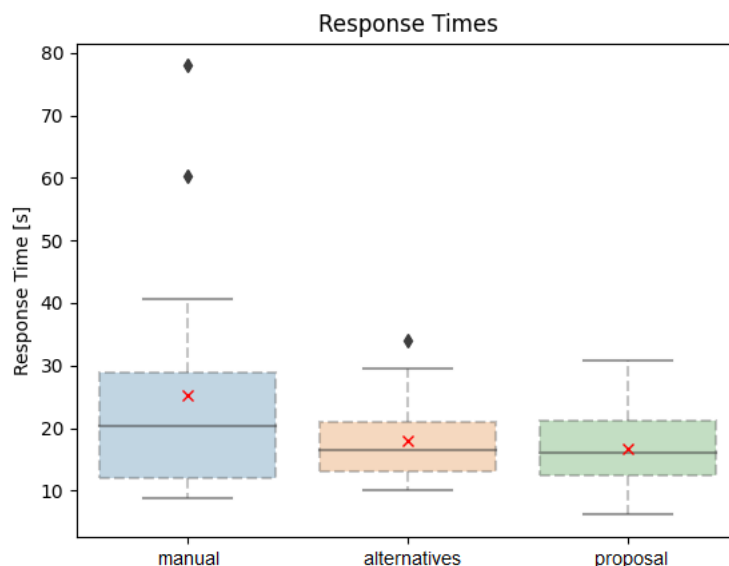


Abbildung 6-7 Ergebnisse Konfigurationsvergleich Bearbeitungszeiten

Nutzwert:

Der Nutzwert der Einbindungsmodalität wurde über eine modifizierte Cooper-Harper Bewertungsskala von 1 (sehr hoher Nutzwert) bis 10 (sehr niedriger Nutzwert) bewertet, wobei sich die durchschnittlichen Bewertungen generell im Bereich von 2 und 3 bewegten. Dabei bedeutet eine Bewertung von 3, dass die Einbindungsmodalität von Anfragen die menschliche Entscheidungsfindung unterstützt, aber gelegentlich zusätzlichen Bearbeitungs- bzw. Zeitaufwand erfordert. Eine Bewertung von 2 sagt aus, dass die Probanden geringere zusätzliche Belange an die Einbindungsmodalität hatten, welche der Leistung jedoch nicht abträglich waren, sondern eher eine Frage der Präferenzen einzelner Nutzer darstellten. Damit wurde der Nutzen des Systems in allen drei Konfigurationen prinzipiell als gut bewertet. Dennoch lässt sich auch hierbei eine Abstufung zwischen ihnen beobachten. Dabei erhielt die manuelle Integration den niedrigsten Nutzwert (M: 3.5; SD: 1.5), gefolgt von der Alternativenauswahl (M: 3.0; SD: 1.67). Die Handlungsempfehlung wurde am besten bewertet (M: 2.5; SD: 1.02). Hieraus lässt sich ableiten, dass beide Konfigurationen Alternativenauswahl und Handlungsempfehlung zur Senkung des Bearbeitungs- und Zeitaufwands beitragen konnten. Die Wertungen sind in Tabelle 6-2 aufgeführt.

Tabelle 6-2 Ergebnisse Nutzwert

Konfiguration	Nutzwert									
	Niedrig									Hoch
	10	9	8	7	6	5	4	3	2	1
Manuell				•		•	••	•••	•••	
Alternativenauswahl					••		•	•	•••••	•
Handlungsempfehlung							••	•••	•••	••

Einbindung der Anfrage:

Generell lag die Einbindungsquote in allen untersuchten Konfigurationen sehr hoch und nur wenige Anfragen wurden abgelehnt. In der manuellen Einbindung wurden 94,7% der Anfragen eingebunden. In der Konfiguration mit Alternativenauswahl steigerte sich dieser Wert auf 96,7% und in den Missionen mit Handlungsempfehlung erreichte die Einbindungsquote sogar 100%. Die Gründe für Ablehnungen von Anfragen lagen laut Aussage der Probanden hauptsächlich in den damit verbundenen zusätzlichen Missionskosten. Aufgrund der eher niedrig bewerteten Beanspruchung ist generell auch nicht davon auszugehen, dass Anfragen aufgrund fehlender mentaler Kapazitäten abgelehnt wurden.

Obwohl die Einbindungsquote damit generell sehr hoch war, ist dennoch ein Anstieg mit zunehmender Unterstützung zu verzeichnen. Ein Grund hierfür könnte sein, dass den Probanden die Missionskosten der präsentierten Lösungen geringer erschienen als die der manuell entwickelten Lösungen. Ein weiterer Grund könnte sein, dass die Probanden mit

bereitgestellten Lösungen eher gewillt waren eine Anfrage zu akzeptieren, weil der Arbeitsaufwand durch die automatisierte Einbindung in den Missionsplan niedriger ausfiel.

6.1.4.3. Evaluation der Lösungs- und Vorschlagsgenerierung

Dieser Teil der Auswertung stellt eine separate Evaluierung der Handlungsempfehlung dar, die nicht den Vergleich zu den anderen Konfigurationen sucht. Hierbei sollen einerseits die objektive Nutzung und andererseits der subjektiv empfundene Mehrwert der Handlungsempfehlung ausgewertet werden.

Akzeptanz vorgeschlagener Lösungen:

Insgesamt erhielten die 10 Probanden jeweils 6 Fremdanfragen mit dazu generierten Lösungsvorschlägen. Davon wurden 74,20% der Empfehlungen akzeptiert. Bei 17,74% wurde das vorgeschlagene UAV beibehalten aber die Einsortierung der Anfrage in der UAV-Auftragssequenz verschoben. In den restlichen 8,06% der Fälle wurde ein anderes UAV gewählt als vorgeschlagen. In keinem der Fälle wurde eine Anfrage manuell eingebunden.

Die Änderung der Position innerhalb der Auftragssequenz eines vorgeschlagenen UAV kann zum Großteil darauf zurückgeführt werden, dass es die Probanden nach eigener Aussage vorgezogen, angefragte Aufträge an das Ende eines UAV-Plans anzuhängen, anstatt sie zwischen bestehende Aufgaben einzufügen. Eine mögliche Schlussfolgerung hierfür wäre, dass dies in erster Linie der Verringerung des mentalen Aufwands diene. Denn auf diese Weise blieben bereits geplante Aufgaben unbetroffen und mussten nicht berücksichtigt oder angepasst werden. Stattdessen musste die Anfrage nur bei der weiteren Planung berücksichtigt werden.

Der häufigste Grund für die Änderung des vorgeschlagenen UAV war, dass der Proband abweichende Absichten für dieses UAV hegte. In einigen Fällen sollte ein bestimmtes UAV z.B. nicht durch eine Anfrage vom derzeitigen Aufenthaltsbereich abgezogen, sondern bewusst und vorsorglich dort belassen werden. Dabei handelte es sich zum einen um Gebiete, in denen noch Aufklärungsaufgaben zu erledigen waren, die bisher keinem UAV zugewiesen worden waren. Somit konnten diese Aufgaben zu einem späteren Zeitpunkt an das dort befindliche UAV vergeben werden, ohne dass dann ein anderes UAV in diesen Bereich beordert werden musste. Außerdem wurde Gebieten mit bereits aufgedecktem Feind eine höhere Priorität zugeschrieben als solchen ohne entdeckten Feind. Dies machte sich insbesondere darin bemerkbar, dass UAVs im Bereich identifizierter Bedrohungen belassen wurden, um dort nach weiteren Feinden zu suchen. Ein weiterer Grund zur Abänderung des empfohlenen UAVs war die Nutzung der Anfrage, um ein bestimmtes UAV neu zu positionieren. Dabei war das gewählte UAV objektiv gesehen häufig nicht am besten geeignet, um die Anfrage zu übernehmen. Teilweise wurde anstelle des vorgeschlagenen UAV eines aus dem rückwärtigen Raum für eine Anfrage herangezogen, um es dadurch in den Bereich vor dem Hubschrauber zu

positionieren. Da die Aufklärung potenzieller Bedrohungen im vorausliegenden Raum i.d.R. deutlich relevanter als im bereits passierten Raum ist, wurde damit eine Verbesserung der taktischen UAV Positionierung erreicht.

Mehrwert der Planungsunterstützung:

Die Bereitstellung von Lösungen wurde im Allgemeinen als nützlich erachtet, wobei einige Teilnehmer die Bereitstellung und Auswahl von Alternativen als wertvoller im Vergleich zum Vorschlag einer spezifischen Lösung empfanden (siehe Tabelle 6-3). Die Möglichkeit der Darstellung einer Lösung wurde häufig genutzt, um durch die potenziellen Lösungen zu schalten und die jeweiligen Auswirkungen auf der Karte und in der Zeitleiste zu inspizieren. Dies ermöglichte es den Piloten, potenzielle Handlungsoptionen visuell gegeneinander zu vergleichen und die individuellen räumlichen und zeitlichen Auswirkungen besser zu erfassen.

Der Vorschlag einer expliziten Lösung löste ein geteiltes Meinungsbild hinsichtlich seiner Nützlichkeit aus, wurde aber dennoch von der Mehrheit der Teilnehmer als hilfreich bewertet. Generell kann man davon ausgehen, dass die Akzeptanzrate direkt mit der wahrgenommenen Nützlichkeit zusammenhängt. Denn insbesondere solche Probanden, die die Empfehlungen häufiger modifizierten, gaben i.d.R. eine schlechtere Bewertung ab. Dennoch herrschte über alle Probanden weitestgehend Einigkeit darüber, dass es nützlicher ist, einen Vorschlag zu erhalten, der manchmal abgeändert werden muss, als gar keinen Vorschlag zu erhalten. Möglicherweise hatte auch die geringe Arbeitsbelastung einen schädlichen Einfluss auf die wahrgenommene Nützlichkeit des Vorschlags, denn die Versuchspersonen wurden in den Missionen nie in stark beanspruchende Situationen gebracht. Da sie somit stets über die erforderlichen mentalen Ressourcen verfügten, um die Anfrage zu bearbeiten und eine eigene Lösung zu finden, kann die Akzeptanz gegenüber der Unterstützung gelitten haben. Dementsprechend könnte die wahrgenommene Nützlichkeit in Situationen mit hoher Beanspruchung auch höher ausfallen. Zur Erzeugung stärker beanspruchender Situationen sollte die Funktionsdemonstration im zweiten Erprobungsabschnitt dienen.

Tabelle 6-3 Ergebnisse Mehrwert von Alternativen (oben) und Handlungsempfehlung (unten)

Stimme überhaupt nicht zu	Stimme nicht zu	Stimme eher nicht zu	neutral	Stimme eher zu	Stimme zu	Stimme voll zu
Die Angabe von möglichen Alternativen war nützlich.						
		•	•	••	••	••••
Die Angabe von möglichen Alternativen war überflüssig.						
•••	•••	••	••			
Die Angabe einer Handlungsempfehlung war nützlich.						
	•	••		••	••	•••
Die Angabe einer Handlungsempfehlung war überflüssig.						
••	•	•••	•	•	•	

Auch die Befähigung des Agenten, mögliche Optimierungen im Zusammenhang mit der Lösungsgenerierung zu identifizieren, wurde generell als sinnvoll erachtet. Entsprechend der Ergebnisse aus Tabelle 6-4 gab es dabei aber keine Präferenz, ob Aufgaben eher innerhalb der UAV-Auftragssequenz umsortiert oder an andere UAVs abgegeben werden sollten. Beide Möglichkeiten wurden als valide Optionen bewertet. Daraus lässt sich die grundsätzliche Akzeptanz ableiten, dass der Agent den Missionsplan ggf. anpassen darf, auch wenn dies für den Piloten mit zusätzlichem Aufwand verbunden sein kann.

Tabelle 6-4 Mehrwert der Umstrukturierung (oben) und Abgabe von Aufträgen (unten)

Stimme überhaupt nicht zu (0)	Stimme nicht zu	Stimme eher nicht zu	neutral	Stimme eher zu	Stimme zu	Stimme voll zu (6)
Vorschläge zur Umstrukturierung von Aufgaben eines UAVs finde ich im Zusammenhang mit einer Anfrage sinnvoll.						
		
Eine Umstrukturierung von Aufgaben eines UAVs im Zusammenhang mit einer Anfrage halte ich für überflüssig.						
...	
Vorschläge zur Abgabe von Aufgaben an ein anderes UAV finde ich im Zusammenhang mit einer Anfrage sinnvoll.						
	
Eine Abgabe von Aufgaben an ein anderes UAV im Zusammenhang mit einer Anfrage halte ich für überflüssig.						
	

Vertrauen:

Das Vertrauen in den entwickelten Agenten wurde mit 8,33 (SD 1,32) auf einer Skala von 1 (sehr niedriges Vertrauen) bis 10 (sehr hohes Vertrauen) bewertet. Zwar geben die Autoren der Skala keinen absoluten Maßstab, ab welchem Wert das Vertrauen als niedrig oder hoch einzustufen ist. Jedoch liegt der Wert im oberen Bereich der Vergleichsstudien von Schaefer et al. (2016). Hierbei lagen die Ergebnisse für hohe Zuverlässigkeit bei 6,1 und 8,2 und für niedrige Zuverlässigkeit bei 3,0 und 5,7. Eine Analyse der spezifischen Fragestellungen des Trust-in-Automation Fragebogens sollte aufzeigen, welche Aspekte einen besseren oder schlechteren Einfluss auf das Vertrauen hatten. Dabei wurden insbesondere diejenigen Gesichtspunkte näher untersucht, deren Bewertungen verhältnismäßig schlecht ausfielen oder eine große Streuung aufwiesen. Die Einzelbewertungen sind in Abbildung 6-8 dargestellt.

Die Bewertung der Frage, ob die Planungsunterstützung konsistent und erfolgreich funktionierte, fiel gut aus. Dies bestätigt, dass es grundsätzlich möglich war, gut mit dem Agenten zu arbeiten und dass es den Arbeitsablauf der Probanden nicht negativ beeinträchtigte. Die Bewertung über ausreichend System-Feedback ist hingegen weit gestreut und liegt im Mittelwert unter der Gesamtbewertung. Ein möglicher Grund dafür ist, dass das System wenig textuelles oder auditives Feedback liefert, wie es einer menschlichen Kommunikation nahekommen würde. Stattdessen ist der Agent eher auf visuelles Feedback ausgelegt. So wird

z.B. eine bestätigte Lösung zur Integration einer Anfrage direkt umgesetzt, was sich vor Allem in der Änderung des Missionsplans auf der taktischen Karte und der Zeitleiste widerspiegelt. Das System liefert demnach nur ein passives Feedback und keine aktive Rückmeldung im Sinne einer Systemmeldung über die erfolgreiche Umsetzung.

Ob die Missionsanforderungen durch den Agenten ausreichend berücksichtigt wurden, bewerteten die Probanden ebenfalls sehr differenziert. Die Lösungsgenerierung berücksichtigt zwar diverse Kriterien, um Konflikte mit der eigenen Missionsdurchführung zu minimieren. Jedoch wurden im Feedback zur Akzeptanzrate von Vorschlägen bereits Merkmale identifiziert, die nicht in die Lösungsbewertung eingingen. Offenbar wurde dies von manchen Probanden als unzureichende Berücksichtigung von Missionsanforderungen interpretiert. Eine weitere Erklärung könnte sein, dass eine angefragte UAV-Nutzung zum Teil als Störung der eigenen Mission wahrgenommen wurde. Da die Planungsunterstützung immer im direkten Zusammenhang mit einer Anfrage auftritt, lässt sich mutmaßen, dass dieser störende Einfluss auf den Agenten projiziert wurde.

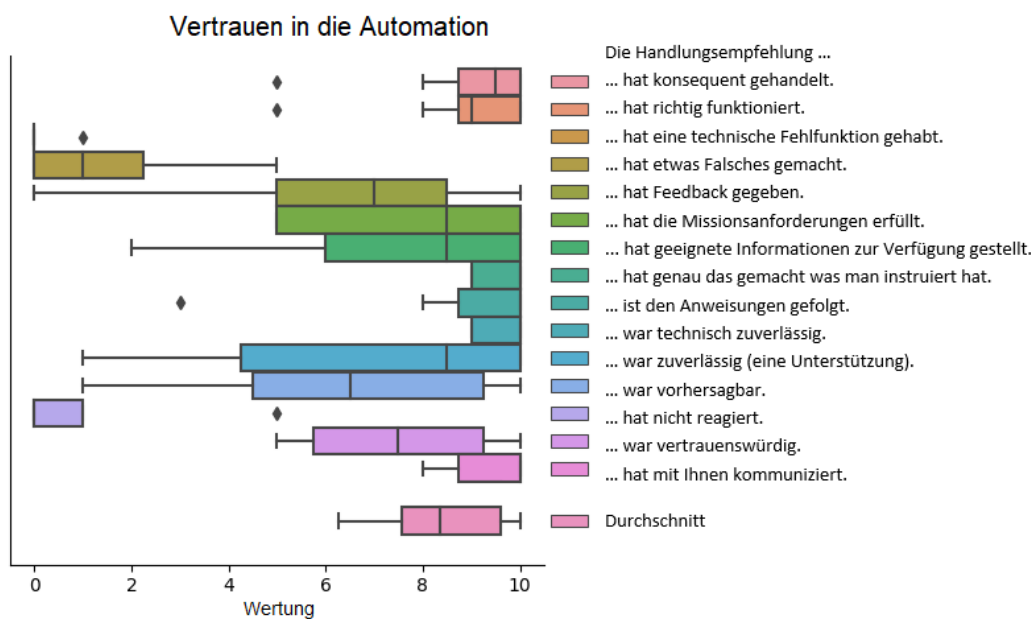


Abbildung 6-8 Ergebnisse Vertrauen in die Automation

Auch die Bewertung der Zuverlässigkeit der Assistenzfunktion ist weit gestreut. Es ist naheliegend, dass diese als weniger unterstützend wahrgenommen wird, wenn eine vorgeschlagene Lösung angepasst werden muss, weil sie nicht exakt den Erwartungen des Nutzers entspricht. Es ist somit davon auszugehen, dass Probanden, die häufig Alternativen zu einem Vorschlag wählten, das System als weniger verlässlich bewertet haben.

Die Vorhersagbarkeit des Systems weist die niedrigste Bewertung unter allen abgefragten Vertrauenskriterien auf. Dies liegt jedoch in der Natur der Anwendung, da Anfragen von außen initiiert werden und ihr Auftreten schlichtweg nicht vorhersehbar ist. Da Anfrage und Systemvorschlag gleichzeitig präsentiert werden, ist folglich auch der Zeitpunkt der Interaktion

durch den Agenten für den Nutzer nicht vorhersehbar. Darüber hinaus kann auch nicht vorhergesagt werden, welche unmittelbare Lösung das System vorschlagen wird, da neben dem Zeitpunkt der Intervention auch der Inhalt der Anfrage nicht im Vorhinein bekannt ist. Mit Sicherheit ist nur bekannt, dass das System eine Handlungsempfehlung liefert, wenn es eine Anfrage erhält und eine valide Lösung dafür findet.

Gebrauchstauglichkeit:

Neben der Ermittlung einer allgemeinen Bewertung für die Gebrauchstauglichkeit der Planungsunterstützung erlaubt der Post-Study-System-Usability Fragebogen auch eine separate Analyse der einzelnen Fragestellungen. Sie ermöglicht eine Aufschlüsselung der Bewertung, um die Systemnutzung, die Informationsqualität und die Interaktionsqualität im Detail zu beurteilen. Die einzelnen Bewertungen sind in Abbildung 6-9 dargestellt. Die zugehörigen Fragestellungen finden sich in Tabelle 6-5.

Die Auswertung ergab eine Bewertung von 2,67 (SD 0,91) auf einer Skala von 1 (sehr gut) bis 7 (sehr schlecht). Die spezifischen Bewertungen waren 2,48 (SD 1,14) für die Systemnutzung, 2,60 (SD 0,98) für die Informationsqualität und 2,42 (SD 0,91) für die Interaktionsqualität. Damit übersteigen diese Werte die Ergebnisse repräsentativer Vergleichsstudien (Sauro und Lewis 2016). Insbesondere die Bewertung der Systemnutzung ist deutlich besser als der Vergleichswert von 2,8.

Die Bewertung, ob sich ein Fehler einfach beheben ließ, weist das niedrigste Ergebnis aber auch die größte Streuung auf. Dies hängt vermutlich mit der allgemeinen Auftragsvergabe an die UAVs zusammen, welche in erster Linie für die Vorwärtsplanung konzipiert und weniger für die individuelle Umplanung von Aufgaben geeignet ist. Diesbezüglich hätten sich einige Probanden eine flexiblere Möglichkeit zur manuellen Aufgabenumstrukturierung gewünscht, beispielsweise durch Verschieben der UAV-Aufträge in der Zeitleiste. Im Gegensatz zu den eigens geplanten UAV-Aufträgen war es zwar möglich, genehmigte Anfragen über eine separate Funktionalität in ihren Anfragezustand zurückzusetzen und sie mit geringem Aufwand neu zuzuweisen. Da diese Funktion jedoch kaum genutzt wurde, muss hierbei von einem Trainingsmangel ausgegangen werden.

Darüber hinaus wurde der Planungsunterstützung bescheinigt, dass sie zur Produktivität und zu einer schnellen Aufgabenerledigung beiträgt. Dabei waren die bereitgestellten Informationen und die Intention des Systems leicht zu verstehen. Eine schnelle und produktive Bearbeitung externer UAV-Anfragen ist dabei umso wertvoller, je stärker man durch andere Aufgaben gebunden ist. Obwohl die Assistenzfunktionalität also bereits in Situationen mit angemessener Beanspruchung zu einer Aufgabenerleichterung beiträgt, wäre davon auszugehen, dass sich ihr Nutzen in stärker beanspruchenden Situationen noch einmal steigern dürfte.

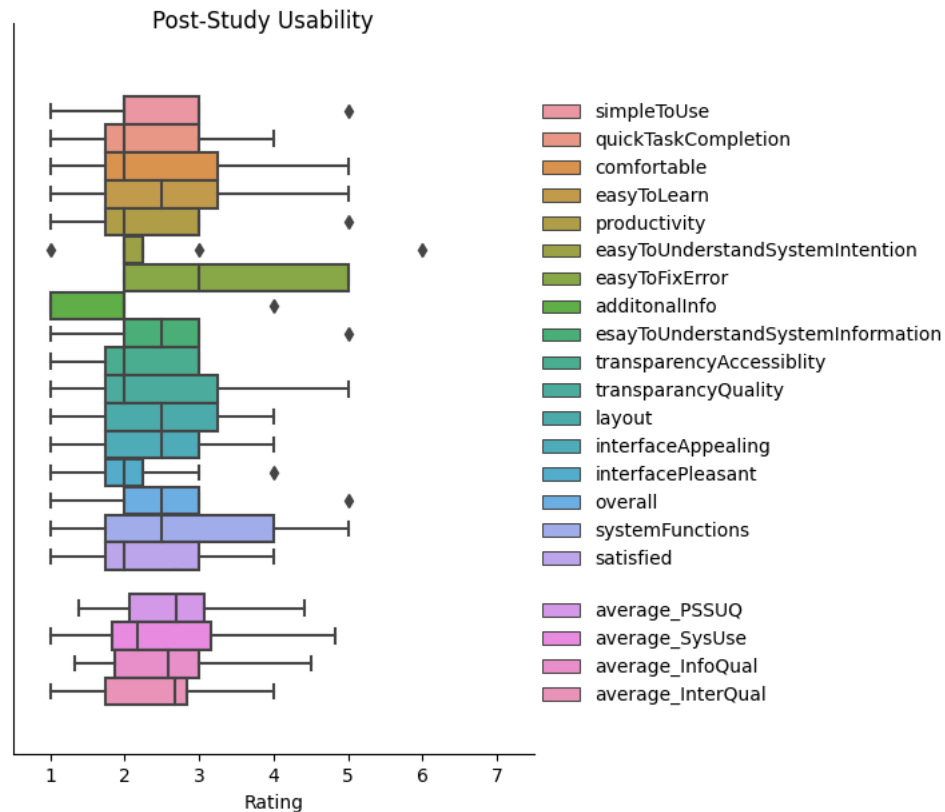


Abbildung 6-9 Ergebnisse Gebrauchstauglichkeit

Tabelle 6-5 Fragestellungen zur Gebrauchstauglichkeit

simpleToUse	Es war einfach das System zu nutzen.
quickTaskCompletion	Ich konnte die Aufgaben / Missionen schnell erledigen mit dem System.
comfortable	Das System zu bedienen war angenehm.
easyToLearn	Es fiel mir leicht, die Bedienung des Systems zu lernen.
productivity	Ich denke, ich kann das System schnell produktiv nutzen.
complexity	Ich empfinde das System als unnötig komplex.
systemIntention	Wenn das System mich auf etwas aufmerksam machen wollte, konnte ich schnell verstehen, um was es ging.
easyToFixError	Wenn ich etwas falsch gemacht habe, war es einfach den Fehler zu beheben.
additonalInfo	Die zu dem System herausgegebenen Informationen (z.B. Quick-Reference) war gut verständlich und hilfreich.
systemInformation	Die dargestellten Informationen, die das System gegeben hat, waren klar verständlich.
accessibility	Die benötigten Informationen / Daten zur Bedienung oder Entscheidungsfindung sind einfach zugänglich.
transparency	Die dargestellten Informationen haben mir effektiv bei der Erfüllung meiner Aufgaben geholfen.
layout	Die Anordnung der Informationen auf dem Bildschirm ist einleuchtend.
interfaceAppealing	Die Benutzerschnittstelle des Systems ist ansprechend.
interfacePleasant	Ich habe die Benutzerschnittstelle des Systems gerne bedient.
overall	Im Großen und Ganzen ist die Nutzbarkeit einfach genug.
satisfied	Ich bin mit dem System als Ganzes zufrieden.
systemFunctions	Das System bietet alle Funktionen und Möglichkeiten, die ich erwarten würde.

6.1.5. Diskussion

Die hierarchische Rollenverteilung in Verbindung mit der Anfrage und Genehmigung einer Fremdnutzung wurde als geeignete Herangehensweise für einen nutzerübergreifenden Einsatz unbemannter Systeme bewertet. Da die Probanden aber ausschließlich die Rolle des Hosts eingenommen haben, muss hierbei einschränkend angemerkt werden, dass diese Bewertung ggf. Tendenzen aufgrund der einseitigen Perspektive aufweist. Eine heterarchische

Rollenverteilung mit gleichberechtigten Nutzern ohne designierten Verantwortlichen wurde durch alle befragten Probanden abgelehnt.

Vor Allem weil die Ressourcen knapp bemessen waren, resultierte die Entscheidung über eine Anfrage häufig in der Problematik, ob mit der Abgabe das Risiko in der eigenen Missionsdurchführung im Gegenzug für die Unterstützung einer alliierten Einheit erhöht werden soll. Einige Piloten sahen die eigene Kompetenz zum Treffen dieser Entscheidung z.T. als eingeschränkt, da sie wenig Einblick in den Missionsablauf oder das Missionsziel des Gegenübers besaßen. Manche äußerten daher den Wunsch zur Abgabe dieser Entscheidung an eine hierarchisch übergeordnete Instanz, die einen besseren Überblick über alle beteiligten Missionen besitzt. Alternativ könnte eine Entscheidungshilfe anhand der Prioritäteneinstufung erfolgen.

Die Ergebnisse des Konfigurationsvergleichs zeigen auf, dass sowohl die Alternativenauswahl als auch die Handlungsempfehlung hinsichtlich der Performance gegenüber der manuellen Integration zu bevorzugen sind. Auch die Nutzwertanalyse ergab, dass die Probanden diese beiden Konfigurationen der manuellen Integration vorzogen. Dabei scheint es zwischen der Alternativenauswahl und der Handlungsempfehlung einen Trade-Off hinsichtlich der aufgabenspezifischen Beanspruchung und des Situationsbewusstseins zu geben. Während die Empfehlung einer expliziten Lösung zwar die Beanspruchung im Zusammenhang mit der Bearbeitung einer Anfrage senken kann, offenbarte sich ein Defizit im Situationsbewusstsein. Dies wurde durch die Probanden z.T. auch aktiv wahrgenommen, aber nicht als wesentliche Einschränkung empfunden.

Aufgrund der moderaten Belastung und Missionskomplexität empfanden mehrere Piloten eine Handlungsempfehlung zwar als nützlich aber nicht unbedingt als notwendig. Dennoch erzielten sowohl die Gebrauchstauglichkeit als auch das Vertrauen in die Empfehlungen des Planungsagenten Bewertungen im guten Bereich. Ebenfalls die Häufigkeit, mit der Handlungsempfehlungen modifiziert wurden, lässt auf ein kalibriertes Vertrauen schließen. Aus einer Analyse modifizierter Handlungsempfehlungen konnten außerdem drei wesentliche Motivatoren identifiziert werden, weshalb ein UAV absichtlich in einem bestimmten Bereich positioniert oder belassen wurde: die Berücksichtigung ungeplanter Aufgaben, potenzieller Bedrohungen und des Bereichs vor dem Hubschrauber. Diese Erkenntnisse können wiederum in eine Verbesserung der Generierung und Bewertung von Lösungen einfließen.

6.2. Funktionsdemonstration im komplexen Anwendungsfeld

Während die Einzelmissionen eine spezifische Untersuchung unter vereinfachten Bedingungen darstellte, sollte mit den Gesamtmissionen demonstriert werden, dass das System auch in

hochdynamischen, komplexen Missionsszenarien und in Kombination mit anderen Assistenzfunktionalitäten funktioniert. Im Unterschied zu den Einzelexperimenten wurde der Kommandant darin mit mehreren Problemstellungen und diesbezüglichen Assistenzfunktionen konfrontiert. So erforderte der Einsatz u.a. eine intensivere Analyse der taktischen Situation und es konnte Funkverlust zu den UAVs auftreten. Während sich die Probanden vorher also auf das spezifische Problem der geteilten UAV-Nutzung konzentrieren konnten, musste die Aufmerksamkeit in den Gesamtmissionen auf unterschiedliche Themen verteilt werden. Neben einer höheren Arbeitsbelastung sollten damit auch Präsenz und Immersion gesteigert werden.

6.2.1. Untersuchungsschwerpunkte

Um zu untersuchen, ob die Komplexität der Missionsszenarien einen Einfluss auf die Interaktion mit der Planungsunterstützung besitzt, erfolgte ein Abgleich mit den Ergebnissen des Einzelexperiments, in denen der Agent einen Lösungsvorschlag bereitstellte. Dabei wurden die folgenden Fragestellungen betrachtet:

- Ändert sich die Einbindung von Anfragen in komplexeren Missionsszenarien?
- Ändert sich die Akzeptanz vorgeschlagener Lösungen in komplexeren Missionsszenarien?
- Ist die Einbindung von Anfragen abhängig davon, wie stark Host und Client in einem gemeinsamen Missionsgeschehen involviert sind?

6.2.2. Experimentelles Design

Um eine erhöhte Szenarienkomplexität zu erzielen, wurde das Operationsgebiet für die Gesamtmissionen gegenüber den Einzelmissionen deutlich ausgeweitet. Entsprechend ergaben sich größere Distanzen, die sowohl von den UAVs als auch vom Hubschrauber zurückgelegt werden mussten sowie ein größeres Gebiet, welches durch sensorische Aufklärung abgedeckt werden musste. Durch umfassendere und komplexere Handlungsstränge verlängerte sich die Missionsdauer auf 45-60 min. Dabei waren die Missionsabläufe derart gestaltet, dass sie infolge eines unerwarteten Ereignisses eine umfassende Änderung erforderten. Auch ein intensiverer Funkverkehr machte es notwendig, dass die Probanden mehr mentale Ressourcen auf die verbal-auditive Kommunikation verwenden mussten.

Hierzu dienten die zwei Missionen „Goldmember“ und „Blue Thunder“, die zur gemeinsamen Untersuchung aller Forschungsthemen entworfen wurden. Im Hinblick auf die Planungsunterstützung zur Anfragenbearbeitung unterschieden sie sich maßgeblich im Grad der gemeinsamen Beteiligung von Host und Client innerhalb des Missionsgeschehens. Dabei war die Mission „Goldmember“ derart gestaltet, dass sich die Aktionen von Host und Client gegenseitig unterstützten und z.T. aufeinander abgestimmt werden mussten. Daraus sollte sich

eine intensivere Zusammenarbeit und ein stärkeres Gefühl der Symbiose ergeben. In der Mission „Blue Thunder“ waren die Aktionen von Host und Client deutlich stärker voneinander entkoppelt und Anfragen wurden vorwiegend von Einheiten gestellt, die anderweitig nicht am Missionsgeschehen des Hosts beteiligt waren.

Analog zum Einzelexperiment erhielt der Kommandant im Verlauf der Missionsdurchführung mehrere UAV-Anfragen von externen Einheiten. Während die Planungsunterstützung im Einzelexperiment über unterschiedliche Konfigurationen skaliert war, intervenierte der Planungsagent in den Gesamtmissionen jedoch ausschließlich mit einer Handlungsempfehlung. Diese Konfiguration sollte aufgrund der gesteigerten Missionskomplexität vorrangig betrachtet werden. Die restlichen Konfigurationen konnten aufgrund der begrenzten Experimentalzeit im Gesamtexperiment nicht separat untersucht werden.

6.2.2.1. Mission „Goldmember“

In der Mission „Goldmember“ hatten die Probanden den Auftrag zur koordinierten Festsetzung eines lokal ansässigen Warlords. Hierzu sollte ein Team von Spezialkräften am Startpunkt der Mission in den Hubschrauber aufgenommen und zum vermuteten Aufenthaltsort der Zielperson verbracht werden. Der Anflug sollte unauffällig und verdeckt erfolgen und vorab durch die UAVs aufgeklärt werden. Weiterhin war eine Patrouille in die Mission eingebunden, die kurz vor Eintreffen des Hubschraubers am Zielpunkt ein Ablenkungsmanöver durchführen sollte, um die Wachen der Zielperson wegzulocken. Während die Wachen mit der Patrouille im Feuergefecht gebunden waren, sollte der Hubschrauber die Spezialkräfte absetzen, um die Zielperson in Gewahrsam zu nehmen. Anschließend sollten Zielperson und Spezialkräfte in ein nahegelegenes Gefängnis verbracht werden. Während des Rückflugs zur Heimatbasis wurden die Probanden über einen Abbruch der Verbindung zur Patrouille informiert und erhielten einen neuen Auftrag zur Rückkehr ins Missionsgebiet. Unter Nutzung der UAVs sollte die Patrouille entlang ihrer geplanten Marschroute ausfindig gemacht werden. Ursache für den Kommunikationsverlust war ein an der Route platzierter Jammer, der bei Ankunft des Hubschraubers durch die Patrouille deaktiviert werden konnte. Nach dem Rückflug zum Zielflughafen war die Mission beendet. Abbildung 6-10 zeigt das Missionsgebiet und den zeitlichen Ablauf der Mission. Während ihrer Durchführung traten folgende Anfragen auf:

- Anfrage 1: Aufklärung der Anmarschroute durch die Patrouille
- Anfrage 2: Aufklärung Gefecht mit Wachen durch die Patrouille
- Anfrage 3: Temporäre UAV-Kontrolle durch die Patrouille
- Anfrage 4: Aufklärung der Umgebung des Übergabeorts durch das Gefängnis

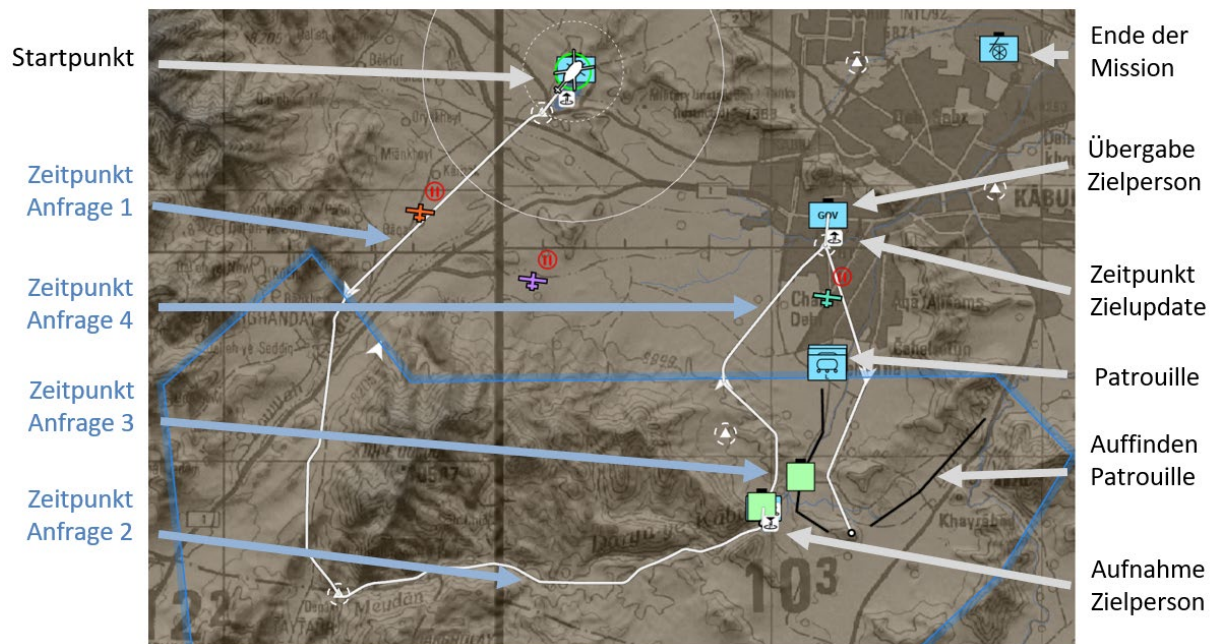


Abbildung 6-10 Missionsgebiet und zeitlicher Ablauf der Mission „Goldmember“

6.2.2.2. Mission „Blue Thunder“

Bei der Mission „Blue Thunder“ handelte es sich um eine spontane SAR-Mission. Dabei hatten die Probanden zunächst das Missionsziel, sich in die Nähe eines Gefechts zwischen Aufständischen und befreundeten Einheiten (Cobra) zu begeben, um sich dort für einen potenziellen Medical Evacuation Einsatz bereit zu halten. Auch hier sollte der Anflug durch die UAVs aufgeklärt werden. Die befreundeten Einheiten bestanden aus einer Patrouille sowie einem Kampfhubschrauber (Blue Thunder). Kurz nach dem Abflug der Probanden meldete der im Gefecht involvierte Kampfhubschrauber Triebwerksprobleme und wich aus, um eine nahegelegene Basis zu erreichen. Dabei verschwand er aufgrund topografischer Gegebenheiten im Funkverlust. Kurz vor Erreichen des Reserve-Raums erhielten die Probanden eine Auftragsänderung zum Auffinden des möglicherweise havarierten Kampfhubschraubers unter Nutzung der UAVs. Entlang dessen Flugroute konnten das brennende Wrack und die unverletzten Piloten ausfindig gemacht werden. Nach ihrer Rettung sollten sie in ein nahegelegenes Lazarett geflogen werden. Abbildung 6-11 stellt das Missionsgebiet und den Missionsablauf dar. Während ihrer Durchführung traten folgende Anfragen auf:

- Anfrage 1: Aufklärung des Feuergefechts durch Cobra
- Anfrage 2: Temporäre UAV-Kontrolle durch Blue Thunder
- Anfrage 3: Aufklärung der Marschroute durch Patrouille
- Anfrage 4: Temporäre UAV-Kontrolle durch Cobra

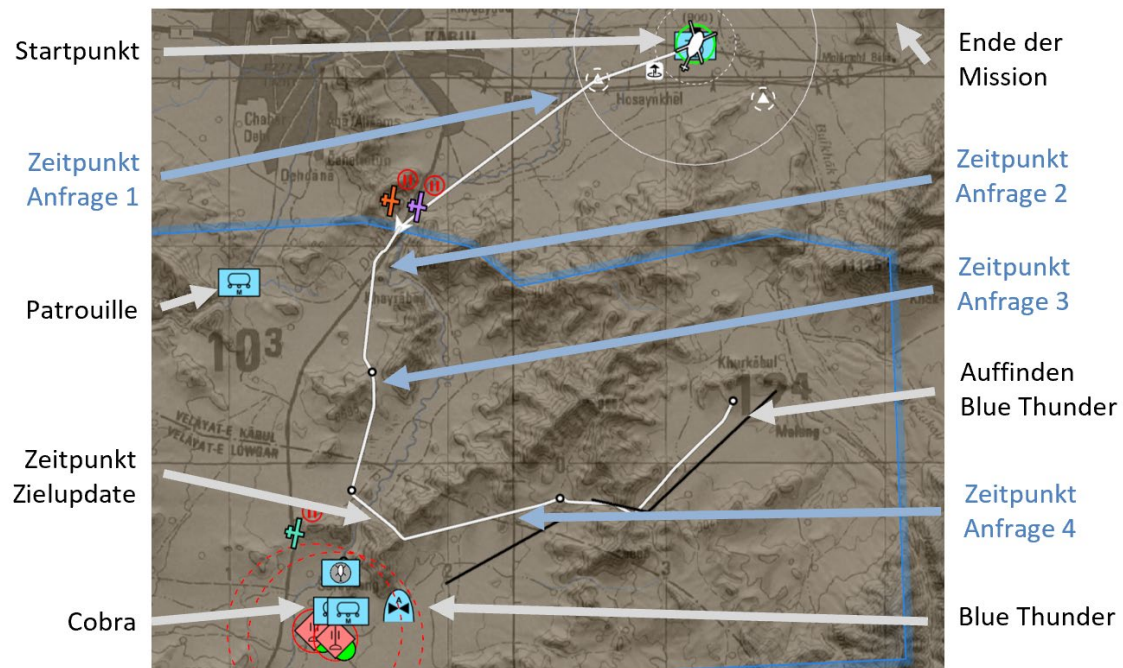


Abbildung 6-11 Missionsgebiet und zeitlicher Ablauf der Mission „Blue Thunder“

6.2.3. Durchführung

Die beiden Gesamtmissionen waren nach den Einzelexperimenten in die bereits beschriebene Experimentalwoche eingebettet. Entsprechend waren die Probanden bereits mit der Simulation und dem Umgang mit den Assistenzfunktionalitäten vertraut und benötigten kein separates Training. Zu ihrer Durchführung bildeten die beiden Probanden ein gemeinsames Team und nahmen wechselseitig jeweils einmal die Rolle des Kommandanten und einmal die des fliegenden Piloten an. Da sich jedoch alle untersuchten Assistenzfunktionen ausschließlich an den Kommandanten richteten, waren die Missionen in mehrere Zeitslots separiert, die zur Untersuchung der individuellen Forschungsthemen vorgesehen waren. Indem die jeweiligen Assistenzfunktionen nur in den ihnen zugewiesenen Zeitslots aktiv geschaltet wurden, konnte ausgeschlossen werden, dass der Kommandant gleichzeitig mit unterschiedlichen Assistenzsituationen konfrontiert war. Dies war den Probanden gegenüber nicht kommuniziert, um die Komplexität aufrecht zu erhalten.

6.2.4. Ergebnisse und Diskussion

Mit einer Einbindungsquote von 86,1% wurden Anfragen in den Gesamtmissionen deutlich öfter abgelehnt als im Einzelexperiment (vgl. 100%). Dies kann auf die komplexeren Missionsszenarien und eine damit verbundene erhöhte mentale Beanspruchung zurückzuführen sein. Es ist davon auszugehen, dass sich die Probanden stärker auf ihre eigene Missionsdurchführung konzentrieren mussten und ihre UAVs als nicht so abkömmlich betrachteten wie im Einzelexperiment. Im Vergleich zu den Einzelexperimenten trug die

Handlungsempfehlung dabei essenziell zur Annahme von Anfragen bei. Sowohl eine manuelle Integration als auch eine Bearbeitung per Alternativenauswahl hätte nach Aussage der Probanden in vielen Fällen die mentalen Kapazitäten überstiegen und zu einer deutlich höheren Ablehnungsquote geführt. Während die Handlungsempfehlung im Einzelexperiment also als nützlich aber nicht unbedingt als notwendig angesehen wurde, änderte sich diese Ansicht in den Gesamtexperimenten.

Betrachtet man das Verhältnis zwischen angenommenen und modifizierten Handlungsempfehlungen, zeigt sich, dass die Probanden die Vorschläge mit 6,9% insgesamt seltener modifizierten als im Einzelexperiment (vgl. 25,8%). Ein Grund dafür könnte sein, dass die Probanden in den komplexeren Missionen weniger Kapazität zur Entwicklung einer eigenen Lösung besaßen und Vorschläge entsprechend seltener modifizierten. Demnach ist es möglich, dass Vorschläge häufiger angenommen oder auch abgelehnt wurden, die die Probanden im Einzelexperiment ggf. modifiziert hätten. Es ist also auch möglich, dass Anfragen mit nicht zufrieden stellendem Lösungsvorschlag abgelehnt wurden, weil eine Modifikation zu viel Aufwand bedeutet hätte.

Ablehnungen von Anfragen traten dabei ausschließlich gegenüber den weniger involvierten Einheiten in der Mission „Blue Thunder“ auf. Während die anfragenden Einheiten in der Mission „Goldmember“ stark in den Missionsablauf eingebunden waren, kamen die Anfragen in „Blue Thunder“ eher von Einheiten, die nicht direkt in den eigenen Missionsverlauf involviert waren. Ihre Anfragen wurden von den Probanden daher vermutlich niedriger priorisiert und entsprechend eher abgelehnt.

7. Zusammenfassung und Ausblick

Das folgende Kapitel fasst die vorliegende Arbeit zusammen und liefert Empfehlungen im Zusammenhang mit dem Nutzungskonzept und der Planungsassistenten. Abschließend wird ein Ausblick für mögliche Folgeuntersuchungen gegeben.

7.1. Zusammenfassung

Im Rahmen dieser Arbeit wurde untersucht, wie Hochwertressourcen mit weiteren Nutzern geteilt werden können und wie dies in ihrer Ausplanung berücksichtigt bzw. unterstützt werden kann. In einem ersten Schritt wurde diesbezüglich ein hierarchisches Nutzungskonzept ausgearbeitet, das die Autorität und die Nutzungshoheit über eine gemeinsam genutzte Ressource anhand von zwei dedizierten Rollen definiert. Über ein Anfragekonzept zur Ressourcennutzung kann dabei der Client als Bedarfsträger an den Host als bereitstellenden Nutzer herantreten. Anhand einer Interoperabilitätsskala kann die Kontrolle über eine Ressource mittels mehrerer Ebenen vom Host an den Client übertragen werden. Dazu können durch den Client Anfragen zum passiven Datenempfang, zur Durchführung spezifischer Aufgaben oder zur temporären Kontrolle eines unbemannten Systems an den Host gestellt werden.

Die Kommunikationsinfrastruktur basiert auf einem Middle-Agent Ansatz, der mit drei verteilten Agenten modelliert wurde. Ein R-Agent ist dabei auf der Seite des Clients und ein P-Agent auf Seite des Hosts angesiedelt. Ein Middle-Agent fungiert als Bindeglied und wurde auf Basis eines Broker-Verhaltens zur nutzwertorientierten Einbindung von Anfragen modelliert.

Eingebettet in die Struktur aus P-Agent und Broker wurde zur Unterstützung der Missionsplanung eine prototypische Assistentenfunktion entwickelt. Hierzu werden unterschiedliche Lösungen zur Integration einer Anfrage in die Ausplanung geteilter Ressourcen generiert und mittels eines multikriteriellen Bewertungsansatzes evaluiert. Diese Lösungen können dem Host dann zur Entscheidungsfindung bereitgestellt werden. Hierzu wurde die Interaktion des Planungsagenten über verschiedene Automationslevel modelliert.

Die Assistentenfunktion wurde in den institutseigenen MUM-T Forschungssimulator integriert, der die Untersuchung am Beispiel eines Teams aus Hubschrauber und UAVs ermöglicht. Zur Initiierung von Anfragen dient ein mobiles Interface, das auch als Arbeitsplatz zur Simulation eines bodengebundenen Nutzers verwendet werden kann. Die entwickelten Ansätze zum nutzerübergreifenden Ressourceneinsatz und zur Planungsassistenten wurden in Mensch-Maschine Experimenten mit militärischen Hubschrauberpiloten evaluiert.

Die Ergebnisse eines Konfigurationsvergleichs weisen u.a. einen höheren Nutzwert und eine beschleunigte Anfragebearbeitung mit steigendem Automationslevel auf. Jedoch zeigten sich auch damit einhergehende Einbußen im Situationsbewusstsein. Anhand einer Gebrauchstauglichkeitsanalyse konnte weiteres Verbesserungspotenzial identifiziert werden. Die Probanden schätzten eine Handlungsempfehlung bei moderater Beanspruchung größtenteils zwar als hilfreich aber nicht als unbedingt notwendig ein. In dynamischeren und komplexeren Szenarien wurde die Handlungsempfehlung von der überwiegenden Mehrheit hingegen als essenziell notwendig zur Bearbeitung von Anfragen empfunden. Auch die Akzeptanz vorgeschlagener Lösungen erhöhte sich hierbei. Sowohl die empfundene Nützlichkeit als auch das Vertrauen in die Lösungen scheinen daher stark mit der Beanspruchung bzw. der Komplexität des Szenarios zusammenzuhängen.

7.2. Empfehlungen

7.2.1. Empfehlungen zum Nutzungskonzept

Hinsichtlich des gemeinsamen Einsatzes einer Ressource erscheint eine hierarchische Rollenverteilung zwischen den Nutzern zweckmäßiger als ein heterarchisches Verhältnis. Ohne einen designierten Entscheidungsträger kann es zu Problemen bei der Verantwortlichkeit und zu Hemmnissen bei der Koordinierung der Ressourcennutzung kommen. Entsprechend hat sich auch das entwickelte Nutzungskonzept vornehmlich an einer hierarchischen Struktur orientiert, wie sie sich bereits im Militär und in der Luftfahrt bewährt hat. Auch haben sich sämtliche Probanden der Experimentalkampagne, als Vertreter einer potenziellen Nutzergruppe, für eine hierarchische Rollenverteilung ausgesprochen. Weiterhin ist es möglich, im Rahmen der hierarchischen Rollenverteilung eine heterarchische Beziehung zwischen zwei Bedarfsträgern zu bilden. Ein umgekehrtes Erzeugen einer hierarchischen Rollenverteilung aus einer heterarchischen Struktur heraus ist hingegen nicht möglich.

Von den unterschiedlichen Ebenen der gemeinsamen Nutzung bevorzugten die Piloten die Ausführung eines angefragten Auftrags durch ein UAV. Demgegenüber wurde die temporäre Abgabe der Kontrolle über ein UAV zum Teil als größere Einschränkung der UAV-Verfügbarkeit empfunden. Obwohl die Transparenz während einer Fremdnutzung an sich gegeben war und die Kontrolle jederzeit wiedererlangt werden konnte, herrschte eine größere Unsicherheit darüber, ob und wie schnell das UAV im Bedarfsfall wieder verfügbar wäre. Dennoch wurde auch festgestellt, dass eine temporäre Abgabe zur Senkung der Arbeitsbelastung beitragen kann. Insbesondere dann, wenn damit die wiederholte Bearbeitung von Auftragsanfragen ersetzt werden kann. Entsprechend wird der Einsatz beider Möglichkeiten empfohlen.

7.2.2. Empfehlungen zur Kommunikationsinfrastruktur

Um eine Anfrage zwischen Host und Client zu verhandeln, wurde ein Middle-Agent eingesetzt, der grundsätzlich über ein Matchmaker- oder ein Broker-Verhalten modelliert werden kann. Beide Ansätze sind an sich geeignet, um eine Anfrage von einem Client an einen Host zu übermitteln. Dabei liegt die Fähigkeit eines Matchmakers darin, durch einen Abgleich von angefragten und bereitgestellten Fähigkeiten die initiale Verbindung zwischen ihnen herzustellen. Für eine progressive Verhandlung über die Nutzung einer Ressource ist hingegen der Einsatz eines Brokers prädestiniert, da dieser als permanentes Bindeglied den Informationsfluss kontinuierlich beobachten und koordinieren kann. Im Hinblick auf eine Multi-Host-Multi-Client Umgebung wird daher der kombinierte Einsatz beider Modellierungsformen empfohlen. Dabei kann ein zentraler Matchmaker zum initialen Herstellen einer Verbindung dienen, damit ein Client erfährt, welche Hosts seine Anfrage überhaupt bedienen könnten. Mit diesem Wissen kann der Client anschließend mit dem Broker des ausgewählten Hosts in Verbindung treten, um die spezifische Umsetzung der Anfrage auszuhandeln.

7.2.3. Empfehlungen zur Planungsunterstützung

Zwar bietet eine zentralisierte Planungsarchitektur den Vorteil einer geringeren Komplexität und weniger Datenkommunikation innerhalb des Netzwerks aus Teilnehmern. Jedoch entsteht dadurch eine Abhängigkeit aller Nutzer von der permanenten Verfügbarkeit und der dauerhaften Datenverbindung zu dieser zentralen Planungsinstanz, die in einer realitätsnahen Implementierung nicht uneingeschränkt gewährleistet werden kann. Eine unabhängige Planung einzelner Teilnehmer kann mit einem zentralisierten Ansatz somit nicht unter allen Umständen gewährleistet werden. Des Weiteren muss festgelegt werden, wo der zentrale Planer lokalisiert ist. Unter der Annahme einer hierarchischen Nutzerstruktur wäre es naheliegend, diesen beim hierarchisch übergeordneten Nutzer, dem Host, anzusiedeln. Jedoch kann es auch mehrere Hosts geben. In einer heterarchischen Struktur müsste der Planer einem der gleichberechtigten Nutzer zugewiesen werden, woraus sich wiederum die Frage nach den Auswahlkriterien ergibt. Alternativ könnte der Planer auch einer externen, unabhängigen Instanz zugeordnet werden, damit wäre aber auch jegliche physische Kollokation zwischen dem Planer und wenigstens einem der Nutzer nicht mehr gegeben. Der in dieser Arbeit verfolgte dezentralisierte Ansatz unterliegt einer weniger starken Abhängigkeit von der Datenverbindung zwischen den Nutzern. Statt der generellen Planungsfähigkeit ist nur die Koordinierung bzgl. der geteilten Ressourcen auf eine Verbindung zwischen den Nutzern angewiesen. Dieser Ansatz erlaubt somit auch die unabhängige Planung mehrerer Nutzer. Entsprechend wird der Einsatz eines dezentralisierten Ansatzes empfohlen.

Im Rahmen der Implementierung wurden verschiedene Mechanismen beschrieben, anhand derer ein vom Client vorgegebener Nutzwert bei der Integration einer Anfrage berücksichtigt werden kann. In einer Variante wurde dieser unmittelbar in der Kostenmetrik der Planungsfunktion verrechnet. Voraussetzung für dessen Anwendbarkeit ist jedoch, dass Kostenmetrik und Nutzwert gleich skaliert sind und miteinander verrechnet werden können. In einer weiteren Variante werden unabhängig vom mitgelieferten Nutzwert zunächst mehrere mögliche Lösungen ermittelt und anschließend anhand verschiedener Kriterien evaluiert. In einem darauffolgenden multikriteriellen Vergleich werden schließlich die evaluierten Kriterien sowie der Nutzwert einbezogen, um die Lösungen qualitativ gegeneinander zu vergleichen. Da bei der nachträglichen Berücksichtigung des Nutzwerts mehrere Lösungen generiert und gegenübergestellt werden müssen, ist dieser Ansatz mit einem erhöhten Rechen- und Zeitaufwand verbunden. Soll also nur eine einzelne Handlungsempfehlung generiert werden, besitzt dieser Ansatz einen Nachteil in der Performanz. Dieser erübrigt sich jedoch, sobald auch Alternativen zur Handlungsempfehlung generiert werden sollen. Demgegenüber hat die nachträgliche Berücksichtigung des Nutzwerts den Vorteil einer universellen Anwendbarkeit, wenn z.B. Kostenfunktion des Planungsalgorithmus und Nutzwert der Anfrage nicht aufeinander abgestimmt sind. Außerdem ist dieser Ansatz unabhängig von einer Neuskalierung der Kostenmetrik oder des Nutzwerts. Es wird daher die Verwendung der multikriteriellen Planbewertung empfohlen.

Die Ergebnisse zeigen, dass sowohl die Bereitstellung mehrerer Alternativen ohne Wertung als auch eine Handlungsempfehlung durch den Planungsagenten gegenüber der manuellen Einbindung zu bevorzugen ist. Da bei der Handlungsempfehlung eine Leistungssteigerung unter Einbußen des Situationsbewusstseins beobachtet wurde, wäre eine adaptive Anpassung des Automationslevels empfehlenswert. Bei niedriger Beanspruchung des Piloten sollte eine Entscheidungsunterstützung durch Auswahl aus mehreren Alternativen erfolgen, um das Situationsbewusstsein hoch und die Aufgabenlast auf einem moderaten Level zu halten. Bei einer hohen Beanspruchung sollte hingegen eine Handlungsempfehlung bereitgestellt werden, da die Anfrage sonst zu einer Überbeanspruchung oder zu Defiziten in der eigenen Missionsdurchführung führen könnte. Als weitere Folge könnten nachfolgende Anfragen unbeantwortet bleiben oder abgelehnt werden, obwohl eine Durchführung ressourcentechnisch möglich wäre. Darauf deuten auch die Präferenzen einiger Piloten, die eine Handlungsempfehlung im Einzelexperiment zum Teil als nicht notwendig empfanden. In den komplexeren Gesamtmissionen hingegen wurde die Handlungsempfehlung infolge der gestiegenen Dynamik von nahezu allen Piloten als essenziell notwendig angesehen. Eine adaptive Wahl des Automationslevels wäre somit auch im Hinblick auf die Präferenz von Vorteil. Dementgegen steht der Wunsch mehrerer Piloten nach einem konstanten

Systemverhalten, um *Mode Confusion*¹⁹ zu vermeiden. Um dem nachzukommen, müsste die Wahl wiederum auf die ständige Bereitstellung einer Handlungsempfehlung fallen, um die Unterstützung in Situationen höherer Beanspruchung zu gewährleisten.

Bei der vorliegenden Anwendung wird von einer weiteren Steigerung des Automationslevels mit automatischer Umsetzung der Handlungsempfehlung (nach dem Konzept „*management-by-exception*“ oder einer Vollautomatisierung) abgeraten. Da die Einbindung von Anfragen auch stets einen Nachteil für die eigene Missionsdurchführung mit sich bringen kann, sollte eine Einbindung immer unter sorgfältiger Abwägung der damit verbundenen Missionskosten erfolgen. Insbesondere dann, wenn unter hoher Beanspruchung eine Anfrage automatisiert und ggf. unbemerkt in den Missionsplan eingebunden wird, kann dies sowohl Nachteile im Situationsbewusstsein als auch der Missionsleistung nach sich ziehen. Ist die Einbindung dabei nicht im Interesse des Piloten erfolgt, so kann die nachträgliche Modifikation oder Ablehnung der Anfrage zu einer weiteren Erhöhung der Beanspruchung führen. Im schlechtesten Fall wird die automatisierte Einbindung so spät realisiert, dass sie nur noch unter Einbußen in der Missionsleistung oder der eigenen Sicherheit wieder rückgängig gemacht werden kann.

7.3. Ausblick

In der vorliegenden Arbeit wurde ein kleiner Baustein hinsichtlich einer gemeinsamen Ressourcennutzung in sog. *Joint-Multi-Domain-Operations* betrachtet. Dabei wird das Ziel verfolgt, einzelne domänenspezifische Fähigkeiten zu einem gesamtheitlichen Leistungsspektrum zu fusionieren. Um eine solch intensive Vernetzung mehrerer Domänen zu erreichen, müssen unterschiedliche land-, wasser- und luftgestützte Systeme sowohl für die bemannten als auch für die unbemannten Komponenten berücksichtigt werden. Dabei sollte auch eine intensivere Betrachtung von kooperativen Missionen erfolgen, in denen mehrere Nutzer ein gemeinsames Missionsziel verfolgen und stark verzahnt an dessen Erreichung arbeiten. Eine solche Ausweitung ist erforderlich, um zusätzliche domänen-, vehikel- und missionsspezifische Anforderungen zu identifizieren und das Spektrum an heterogenen Fähigkeiten zu erhöhen.

Während diese Arbeit schwerpunktmäßig die Seite des Bereitstellers untersuchte, muss für eine vollumfängliche Auslegung auch die Seite des Bedarfsträgers intensiver betrachtet werden. Auch hier kann durch maschinelle Planung eine Unterstützung beim Einsatz von Ressourcen geleistet werden, die zwar nicht der eigenen Kontrolle unterliegen aber angefragt werden können. Hierzu wurden die Untersuchungen bereits ausgeweitet (Helbig 2022).

¹⁹ Mode Confusion beschreibt die Verwirrung darüber, in welchem Modus (z.B. in welchem Automationsgrad) sich ein System gerade befindet, wenn dieses häufig den Modus wechselt und dieser Wechsel nicht transparent kommuniziert wird. Diese Verwirrung kann zu Fehlern und Unsicherheit im erwarteten Systemverhalten führen.

Im Hinblick auf die Vernetzung mehrerer Domänen sollte außerdem die Ressourcenteilung zwischen mehreren Bereitstellern und mehreren Bedarfsträgern untersucht werden, die in dieser Arbeit lediglich konzeptionell betrachtet wurde. Auch die dynamische Veränderung der Verfügbarkeiten geteilter Ressourcen bietet relevante Untersuchungsmöglichkeiten. Da in der Konzeptentwicklung eine mögliche Skalierbarkeit bereits berücksichtigt wurde, sind sowohl das Nutzungskonzept als auch die vorgeschlagene dezentrale Planungsarchitektur zur Untersuchung beider Forschungspunkte geeignet.

Literaturverzeichnis

- APP-6 (2011): NATO Joint Military Symbology. Hg. v. NATO.
- Araújo, José Alberto; Villafañez, Félix Antonio; García, David Poza; Pajares, Javier; Pavón, Juan (2018): Agent based modelling and simulation of an auction market for airport slots allocation. In: Highlights of Practical Applications of Agents, Multi-Agent Systems, and Complexity: The PAAMS Collection: International Workshops of PAAMS 2018, Toledo, Spain, June 20-22, 2018, Proceedings 16. Springer, S. 456–467.
- Arisha, Khaled; Ozcan, Fatma; Ross, Robert; Kraus, Sarit; Subrahmanian, V. S. (1998): IMPACT: The interactive Maryland platform for agents collaborating together. In: *Proceedings - International Conference on Multi Agent Systems, ICMAS 1998*, S. 385–386.
- Arisha, Khaled A.; Ozcan, Fatma; Ross, Robert; Subrahmanian, V. S.; Eiter, Thomas; Kraus, Sarit (1999): Impact: A Platform for Collaborating Agents. In: *IEEE Intelligent Systems and Their Applications* 14 (2), S. 64–72.
- Billings, Charles E. (1991): Human-centered aircraft automation: A concept and guidelines: National Aeronautics and Space Administration, Ames Research Center (103885).
- Blumrosen, Liad; Nisan, Noam (2007): Combinatorial auctions. In: *Algorithmic Game Theory* 9780521872 (January), S. 267–300.
- Böhm, Florian; Schulte, Axel (2012): Scalable COTS Based Data Processing and Distribution Architecture for UAV Technology Demonstrators. In: European Telemetry and Test Conference.
- Brafman, Ronen I.; Domshlak, Carmel; Engel, Yagil; Tennenholtz, Moshe (2009): Planning Games. In: *IJCAI. Citeseer*, S. 73–78.
- Brand, Yannick; Schulte, Axel (2018): Design and evaluation of a workload-adaptive associate system for cockpit crews. In: Engineering Psychology and Cognitive Ergonomics: 15th International Conference, EPCE 2018, Held as Part of HCI International 2018, Las Vegas, NV, USA, July 15-20, 2018, Proceedings 15. Springer, S. 3–18.
- Brewer, Ralph W.; Cerame, Eduardo; Pursel, E. Ray; Zimmermann, Anthony; Schaefer, Kristin E. (2019): Manned-unmanned teaming: US army robotic wingman vehicles. In: *Advances in Intelligent Systems and Computing* 780, S. 89–100.
- Bühlmann, Hans; Loeffel, Hans; Nievergelt, Erwin (2013): Entscheidungs- und Spieltheorie: Ein Lehrbuch für Wirtschaftswissenschaftler: Springer-Verlag.
- Carsten Meyer; Matthias Frey; Gunar Roth; Axel Schulte (06.12.2019): CASIMUS II Cognitive Automated Sensor Integrated Unmanned Mission System. Statusbericht 2019. Neubiberg.
- Carsten Meyer; Matthias Frey; Gunar Roth; Axel Schulte (09.12.2020): CASIMUS II Cognitive Automated Sensor Integrated Unmanned Mission System. Statusbericht 2020. Neubiberg.
- Carsten Meyer; Matthias Frey; Gunar Roth; Axel Schulte (30.12.2021): CASIMUS II Cognitive Automated Sensor Integrated Unmanned Mission System. Statusbericht 2021. Neubiberg.
- Carsten Meyer; Matthias Frey; Gunar Roth; Diana Donath; Axel Schulte (14.09.2022): CASIMUS II Cognitive Automated Sensor Integrated Unmanned Mission System, Teil II. Abschlussbericht. Neubiberg.

- Cashmore, Michael; Fox, Maria; Long, Derek; Magazzeni, Daniele (2016): A compilation of the full PDDL+ language into SMT. In: Proceedings of the international conference on automated planning and scheduling, Bd. 26, S. 79–87.
- Chen, Jessie Y. C.; Barnes, Michael J.; Qu, Zhihua (2010): RoboLeader: An agent for supervisory control of multiple robots. In: 2010 5th ACM/IEEE International Conference on Human-Robot Interaction (HRI). 2010 5th ACM/IEEE International Conference on Human-Robot Interaction (HRI). Osaka, Japan, 02.03.2010 - 05.03.2010: IEEE, S. 81–82.
- Chevaleyre, Yann; Dunne, Paul E.; Endriss, Ulle; Lang, Jérôme; Lemaître, Michel; Maudet, Nicolas et al. (2006): Issues in Multiagent Resource Allocation. In: *Informatica (Ljubljana)* 30 (1), S. 3–31.
- Craik, Kenneth J. W. (1943): The Nature of Explanation: Cambridge University Press.
- Cummings, M. L.; Meyers, Kevin; Scott, Stacey D. (2006): Modified cooper harper evaluation tool for unmanned vehicle displays. In: *Proceedings of UVS Canada: conference on unmanned vehicle systems Canada*, S. 1–8.
- Decker, Keith; Sycara, Katia; Williamson, Mike (1997): Middle-agents for the internet. In: *IJCAI* (1), S. 578–583.
- Decker, Keith; Williamson, Mike; Sycara, Katia (1996): Matchmaking and Brokering. In: *2nd International Conference on Multiagent Systems* 15213, S. 10–13.
- Dekker, Sidney W. A.; Woods, David D. (2002): MABA-MABA or abracadabra? Progress on human-automation co-ordination. In: *Cognition, Technology & Work* 4, S. 240–244.
- DesJardins, Marie E.; Durfee, Edmund H.; Ortiz, Charles L.; Wolverson, Michael J. (1999): A Survey of Research in Distributed, Continual Planning 20 (4), S. 13–22.
- Dunne, Paul E.; Kraus, Sarit; Manisterski, Efrat; Wooldridge, Michael (2010): Solving coalitional resource games. In: *Artificial Intelligence* 174 (1), S. 20–50.
- Durfee, Edmund H. (2001): Distributed Problem Solving and Planning, S. 118–149.
- Edwards, W. (2001): Decision Technology, S. 581–606.
- Endsley, M. R. (1988): Situation awareness global assessment technique (SAGAT).
- Endsley, Mica R. (1987): The Application of Human Factors to the Development of Expert Systems for Advanced Cockpits. In: *Proceedings of the Human Factors Society Annual Meeting* 31 (12), S. 1388–1392.
- Endsley, Mica R. (1995): Toward a theory of situation awareness in dynamic systems. In: *Human factors* 37, S. 85–104.
- Endsley, Mica R.; Kiris, Esin O. (1995): The out-of-the-loop performance problem and level of control in automation. In: *Human factors* 37 (2), S. 381–394.
- Ferguson, George; Allen, James; Miller, Brad (1996): TRAINS-95: Towards a Mixed-Initiative Planning Assistant. In: *Aips 1996*, S. 70–77.
- Fewell, M. P.; Hazen, M. G. (2005): Cognitive issues in modelling network-centric command and control.
- Finzi, Alberto; Orlandini, Andrea (2005): Human-robot interaction through mixed-initiative planning for rescue and search rovers. In: *Lecture Notes in Computer Science (including subseries Lecture Notes in Artificial Intelligence and Lecture Notes in Bioinformatics)* 3673 LNAI, S. 483–494.

- Fischer, Andreas; Greiff, Samuel; Funke, Joachim (2012): The Process of Solving Complex Problems. In: *The Journal of Problem Solving* 4 (1).
- Fišer, Daniel; Štolba, Michal; Komenda, Antonín (2015): MAPlan. In: *Proceedings of the Competition of Distributed and Multi-Agent Planners (CoDMAP-15)*, S. 8–10.
- Fitts, Paul M. (1951): Human engineering for an effective air-navigation and traffic-control system. FM 4-02.2 (2007): Medical Evacuation. Hg. v. Department of the Army.
- FM 6-135 (1944): Field Artillery - Forward Observation. Hg. v. War Department.
- Geldermann, J.; Lerche, Nils (2014): Leitfaden zur Anwendung von Methoden der multikriteriellen Entscheidungsunterstützung, S. 44–48.
- Genesereth, Michael R.; Ketchpel, Steven P. (1994): Software agents. In: *Communications of the ACM* 37 (7), S. 48.
- Gerevini, Alfonso; Saetti, Alessandro; Serina, Ivan; Toninelli, Paolo (2004): Lpg-td: a fully automated planner for pddl2. 2 domains. In: *ICAPS*.
- Ghallab, Malik; Howe, Adele; Knoblock, Craig; McDermott, Drew; Ram, Ashwin; Veloso, Manuela et al. (1998): Pddl - The planning domain definition language. In: *Technical Report, Tech. Rep.*
- Ghallab, Malik; Nau, Dana; Traverso, Paolo (2004): Automated Planning: Theory and Practice. In: *Automated Planning: Theory and Practice*, S. 1–635.
- Ghallab, Malik; Nau, Dana; Traverso, Paolo (2016): Automated Planning and Acting. In: *Automated Planning and Acting*, S. 1–354.
- Grünig, Rudolf; Kühn, Richard (2013): Entscheidungsverfahren für komplexe Probleme. Berlin, Heidelberg: Springer Berlin Heidelberg.
- Hartline, Jason D.; Karlin, Anna R. (2007): Combinatorial Auctions. In: *Algorithmic Game Theory*, S. 331–362.
- Heilemann, Felix; Schulte, Axel (2020): Experimental evaluation of an adaptive planning assistance system in manned unmanned teaming missions. In: *Lecture Notes in Computer Science (including subseries Lecture Notes in Artificial Intelligence and Lecture Notes in Bioinformatics)*, S. 371–382.
- Helbig, Willi (2021): Multi-Agenten Planung zur Modellierung von Multi-Operateur MUM-T Missionen. Bachelorarbeit. Universität der Bundeswehr München, München. Institut für Flugsysteme.
- Helbig, Willi (2022): Erweiterung einer Multi-UAV Planungsstruktur zur Berücksichtigung einer Anfrage und Nutzung von Fremd-UAVs für die eigene Missionsdurchführung. Masterarbeit. Universität der Bundeswehr München, München. Institut für Flugsysteme.
- Hope, Thomas; Marston, Richard; Richards, Dale (2004): Decision support for decision superiority: Control strategies for multiple UAVS. In: *Human Performance Situation Awareness and Automation: Current Research and Trends* 1-2, S. 290–294.
- Hopgood, Adrian A. (2000): Intelligent Systems for Engineers and Scientists, Second Edition.
- Hopgood, Adrian A. (2005): The State of Artificial Intelligence. In: *Advances in Computers* 65 (05), S. 1–75.
- Hou, Ming; Banbury, Simon; Burns, Catherine (2014): Intelligent adaptive systems: An interaction-centered design perspective: CRC Press.

- IBM (1987): IBM ILOG CPLEX Optimization Studio CPLEX User's Manual. In: *Version 12* (1987-2018), S. 1.
- Jordán, Jaume; Bajo, Javier; Botti, Vicent; Julian, Vicente (2019): An abstract framework for non-cooperative multi-agent planning. In: *Applied Sciences* 9 (23), S. 5180.
- JP 3-09 (2019): Joint Fire Support. Hg. v. Joint Chiefs of Staff.
- JP 3-50 (2015): Personnel Recovery. Hg. v. Joint Chiefs of Staff.
- Kantowitz, Barry H.; Casper, Patricia A. (1988): Human workload in aviation. In: *Human factors in aviation*: Elsevier, S. 157–187.
- Klein, Heinz-Karl (2013): Heuristische Entscheidungsmodelle: Neue Techniken des Programmierens und Entscheidens für das Management: Springer-Verlag.
- Klusch, Matthias; Sycara, Katia (2001): Brokering and Matchmaking for Coordination of Agent Societies: A Survey. In: *Coordination of Internet Agents* 2 (1), S. 197–224.
- Koubâa, Anis; Qureshi, Basit; Sriti, Mohamed-Foued; Allouch, Azza; Javed, Yasir; Alajlan, Maram et al. (2019): Dronemap Planner: A service-oriented cloud-based management system for the Internet-of-Drones. In: *Ad Hoc Networks* 86, S. 46–62.
- Kuokka, D.; Harada, L. (1995): Matchmaking for information agents. In: *Fourteenth International Joint Conference on Artificial Intelligence* 1, S. 20–25.
- Laux, Helmut; Gillenkirch, Robert M.; Schenk-Mathes, Heike Y. (2005): *Entscheidungstheorie*: Springer (4).
- Lewis, James R. (1995): IBM computer usability satisfaction questionnaires: Psychometric evaluation and instructions for use. In: *International Journal of Human-Computer Interaction* 7 (1), S. 57–78.
- Likert, Rensis (1932): A technique for the measurement of attitudes. In: *Archives of psychology*.
- Little, John D. C. (1970): Models and managers: The concept of a decision calculus. In: *Management Science* 16 (8), B-466-B-485.
- Mahmoud, Sara; Mohamed, Nader; Al-Jaroodi, Jameela (2015): Integrating UAVs into the Cloud Using the Concept of the Web of Things. In: *Journal of Robotics* 2015.
- Miller, Christopher A.; Funk, Harry B.; Dorneich, Michael; Whitlow, Stephen D. (2002): A playbook interface for mixed initiative control of multiple unmanned vehicle teams. In: *AIAA/IEEE Digital Avionics Systems Conference - Proceedings* 2.
- Neumann, John von; Morgenstern, Oskar (2007): *Theory of games and economic behavior*. In: *Theory of games and economic behavior*: Princeton university press.
- Nils Johan Nilsson (1998): *Artificial intelligence: a new synthesis*.
- Office of the Secretary of Defense (2018): *Unmanned Systems Integrated Roadmap 2017-2042*.
- Onken, Reiner; Schulte, Axel (2010): System-ergonomic design of cognitive automation: dual-mode cognitive design of vehicle guidance and control work systems. In: *Studies in Computational Intelligence* 235.
- Opricovic, Serafim; Tzeng, Gwo Hshiung (2004): Compromise solution by MCDM methods: A comparative analysis of VIKOR and TOPSIS. In: *European Journal of Operational Research* 156 (2), S. 445–455.
- Parasuraman, Raja; Barnes, Michael; Cosenzo, Keryl; Mulgund, Sandeep (2007): Adaptive automation for human-robot teaming in future command and control systems. Army research lab aberdeen proving ground md human research and engineering directorate.

- Parasuraman, Raja; Riley, Victor (1997): Humans and automation: Use, misuse, disuse, abuse. In: *Human factors* 39 (2), S. 230–253.
- Phister, P. W.; Cherry, J. D. (2006): Command and Control Concepts within the Network-Centric Operations Construct. In: 2006 IEEE Aerospace Conference. 2006 IEEE Aerospace Conference. Big Sky, MT, USA, 04-11 March 2006: IEEE, S. 1–9.
- Ramezani, Sara; Endriss, Ulle (2010): Nash social welfare in multiagent resource allocation. In: Agent-Mediated Electronic Commerce. Designing Trading Strategies and Mechanisms for Electronic Markets: AAMAS Workshop, AMEC 2009, Budapest, Hungary, May 12, 2009, and IJCAI Workshop, TADA 2009, Pasadena, CA, USA, July 13, 2009, Selected and Revised Papers. Springer, S. 117–131.
- 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* 13 (3), S. 257–266.
- Roscoe, A. H. (1984): Assessing pilot workload in flight.
- Roth, Gunar; Schulte, Axel (2020): A concept on the shared use of unmanned assets by multiple users in a manned-unmanned-teaming application. In: Engineering Psychology and Cognitive Ergonomics. Cognition and Design: 17th International Conference, EPCE 2020, Held as Part of the 22nd HCI International Conference, HCII 2020, Copenhagen, Denmark, July 19-24, 2020, Proceedings, Part II 22. Springer, S. 189–202.
- Roth, Gunar; Schulte, Axel (2021): A Distributed Mission-Planning Framework for Shared UAV Use in Multi-operator MUM-T Applications. In: International Conference on Applied Human Factors and Ergonomics. Springer, S. 25–32.
- Roth, Gunar; Schulte, Axel (2022a): A Prototype to Support Mission-Planning with Shared Unmanned Systems in Multi-User Manned-Unmanned Teaming Applications. In: AIAA SCITECH 2022 Forum.
- Roth, Gunar; Schulte, Axel (2022b): Experimental evaluation of missionplanning support in multi-user manned-unmanned teaming applications with shared unmanned systems. In: *Human Factors in Robots, Drones and Unmanned Systems* 57, S. 46–53.
- Rudnick, Georg; Schulte, Axel (2016): Scalable autonomy concept for reconnaissance UAVs on the basis of an HTN agent architecture. In: 2016 International Conference on Unmanned Aircraft Systems (ICUAS). IEEE, S. 40–46.
- Rudnick, Georg; Schulte, Axel (2017): Implementation of a responsive human automation interaction concept for task-based-guidance systems. In: Engineering Psychology and Cognitive Ergonomics: Performance, Emotion and Situation Awareness: 14th International Conference, EPCE 2017, Held as Part of HCI International 2017, Vancouver, BC, Canada, July 9-14, 2017, Proceedings, Part I 14. Springer, S. 394–405.
- Russell, Stuart; Norvig, Peter (2012): Künstliche Intelligenz: München: Pearson Studium.
- Russell, Stuart; Norvig, Peter (2013): Artificial Intelligence - A Modern Approach.
- Sarter, N. B.; Woods, David D.; Billings, C. E. (1997): Automation surprises: New York Wiley (2).
- Sauro, Jeff; Lewis, James R. (2016): Quantifying the user experience: Practical statistics for user research: Morgan Kaufmann.
- Schaefer, K. E.; Chen, J. Y.; Szalma, J. L.; Hancock, P. A. (2016): A meta-analysis of factors influencing the development of trust in automation: Implications for understanding autonomy in future systems. In: *Human factors* 58 (3), S. 377–400.
- Schmitt, Fabian (2021): Adaptive Mixed-Initiative Missionsplanung für Multi-Vehikel Szenarien.

- Schmitt, Fabian; Roth, Gunar; Schulte, Axel (2017): Design and evaluation of a mixed-initiative planner for multi-vehicle missions. In: *Engineering Psychology and Cognitive Ergonomics: Cognition and Design: 14th International Conference, EPCE 2017, Held as Part of HCI International 2017, Vancouver, BC, Canada, July 9-14, 2017, Proceedings, Part II 14*. Springer, S. 375–392.
- Schmitt, Fabian; Schulte, Axel (2015): Mixed-initiative mission planning using planning strategy models in military manned-unmanned teaming missions. In: *2015 IEEE International Conference on Systems, Man, and Cybernetics*. IEEE, S. 1391–1396.
- Schmitt, Fabian; Schulte, Axel (2018): Experimental evaluation of a scalable mixed-initiative planning associate for future military helicopter missions. In: *Engineering Psychology and Cognitive Ergonomics: 15th International Conference, EPCE 2018, Held as Part of HCI International 2018, Las Vegas, NV, USA, July 15-20, 2018, Proceedings 15*. Springer, S. 649–663.
- Schulte, Axel; Donath, Diana; Lange, Douglas S. (2016): Design patterns for human-cognitive agent teaming. In: *Engineering Psychology and Cognitive Ergonomics: 13th International Conference, EPCE 2016, Held as Part of HCI International 2016, Toronto, ON, Canada, July 17-22, 2016, Proceedings 13*. Springer, S. 231–243.
- Sheridan, T. B.; Verplank, W. L. (1978): Human and computer control of undersea teleoperators.
- Sheridan, Thomas B. (2002): *Humans and automation: System design and research issues: Human Factors and Ergonomics Society Santa Monica, CA (280)*.
- Shoham, Yoav; Tennenholtz, Moshe (1995): On social laws for artificial agent societies: off-line design. In: *Artificial Intelligence 73 (1-2)*, S. 231–252.
- Smith, Reid G. (1980): The Contract Net Protocol: High-Level Communication and Control in a Distributed Problem Solver. In: *IEEE Transactions on Computers C-29 (12)*, S. 1104–1113.
- Song, Wen; Kang, Donghun; Zhang, Jie; Xi, Hui (2016): Decentralized multi-project scheduling via multi-unit combinatorial auction. In: *Proceedings of the International Joint Conference on Autonomous Agents and Multiagent Systems, AAMAS*, S. 836–844.
- STANAG 4586 (2017): *Standard Interfaces of UAV Control System (UCS) for NATO UAV Interoperability - AEP-84 Edition A*. Hg. v. NATO.
- Strenzke, Ruben; Schulte, Axel (2011): Mixed-initiative multi-UAV mission planning by merging human and machine cognitive skills. In: *Lecture Notes in Computer Science (including subseries Lecture Notes in Artificial Intelligence and Lecture Notes in Bioinformatics)*, S. 608–617.
- Torreño, Alejandro; Onaindia, Eva; Komenda, Antonín; Štolba, Michal (2017): Cooperative multi-Agent planning: A survey. In: *ACM Computing Surveys 50 (6)*.
- Tzeng, Gwo-Hshiung; Huang, Jih-Jeng (2011): *Multiple attribute decision making: methods and applications*: CRC Press.
- Uhrmann, Johann (2013): *Auftragsbasierte Multi-UAV-Führung aus dem Helikoptercockpit durch kognitive Automation*. Universitätsbibliothek der Universität der Bundeswehr.
- Uhrmann, Johann; Schulte, Axel (2011): Task-based guidance of multiple UAV using cognitive automation. In: *COGNITIVE 2011, The Third International Conference on Advanced Cognitive Technologies and Applications*, S. 47–52.
- Uhrmann, Johann; Strenzke, Ruben; Rauschert, Andreas; Meitinger, Claudia; Schulte, Axel (2009): Manned-unmanned teaming: Artificial cognition applied to multiple UAV guidance. In:

- NATO RTO SCI-202 Symposium on Intelligent Uninhabited Vehicle Guidance Systems, S. 1–16.
- USAE, Rudy Novak (2020): Table Stakes of the Advanced Battle Management System. In: *Air & Space Power Journal* 34 (3), S. 81–86.
- Vincke, Jean Pierre; Brans, Philippe (1985): A preference ranking organization method. The PROMETHEE method for MCDM. In: *Management Science* 31 (6), S. 647–656.
- Wald, Abraham (1939): Contributions to the theory of statistical estimation and testing hypotheses. In: *The Annals of Mathematical Statistics* 10 (4), S. 299–326.
- Wang, Yingxu; Ruhe, Guenther (2007): The Cognitive Process of Decision Making. In: *Journal of Cognitive Informatics and Natural Intellegence* 1 (2), S. 73–85.
- Weerd, Mathijs de; Clement, Brad (2009): Introduction to planning in multiagent systems. In: *Multiagent and Grid Systems* 5 (4), S. 345–355.
- Wiederhold, Gio; Risch, Tore; Rathmann, Peter; DeMichiel, Linda; Chaudhuri, Surajit (1990): A mediator architecture for abstract data access. STANFORD UNIV CA DEPT OF COMPUTER SCIENCE.
- Wiener, Earl L.; Nagel, David C. (1988): Human factors in aviation: Gulf Professional Publishing.
- Wilson, Robert A.; Keil, Frank C. (2001): The MIT Encyclopedia of the cognitive sciences (MITECS). In: *Artificial Intelligence*.
- Wolf, Ingo (2015): Autonomes Fahren. In: *Autonomes Fahren*.
- Wooldridge, Michael; Jennings, Nicholas R. (1995): Intelligent Agents -Theory and Practice. In: *The knowledge engineering review* (10(2)), S. 115–152.
- Zachary, W.; Wherry, R.; Glenn, F.; Hopson, J. (1982): Decision situations, decision processes, and decision functions: Towards a theory-based framework for decision-aid design. In: *Proceedings of the 1982 Conference on Human Factors in Computing Systems*, S. 355–358.
- Zadeh, Lotfi A. (1965): Fuzzy sets. In: *Information and control* 8 (3), S. 338–353.

Abkürzungsverzeichnis

ABMS	Advanced Battle Management System
ASW	Anti Submarine Warfare
C2	Command-and-Control
CDU	Control and Display Unit
CSAR	Combat Search and Rescue
D-LBO	Digitalisierung Landbasierte Operationen
DCA	Defensive Counter Air
FAC	Forward Air Controller
FCAS	Future Combat Air System
HALE	High Altitude Long Endurance
HAT	Human-Agent Teaming
HMI	Human-Machine Interface
HOA	Helicopter Operating Area
HOB	Helicopter Operating Box
HUD	Head-Up Display
IKM	Internationales Krisenmanagement
IOT	Internet of Things
JADC2	Joint All Domain Command and Control
JTAC	Joint Terminal Attack Controller
KI	Künstliche Intelligenz
LOA	Level of Automation
LOI	Level of Interoperability
M	Mean
MABA-MABA	Men-Are-Better-At/Machines-Are-Better-At
MALE	Medium Altitude Long Endurance
MAP	Multi-Agenten Planung
MDO	Multi Domain Operation
MFD	Multifunctional Display
MGCS	Main Ground Combat System
MUM-T	Manned-Unmanned Teaming
OCA	Offensive Counter Air
P-Agent	Providing Agent
PDDL	Planning Domain Definition Language
PFD	Primary Flight Display
R-Agent	Requesting Agent
SAR	Search and Rescue
SD	Standard Deviation
SEAD	Suppression of Enemy Air Defense
TEN	Tactical Edge Networking
TOPSIS	Technique for Order of Preference by Similarity to Ideal Solution
UAV	Unmanned Aerial Vehicle
VBS	Virtual Battlespace

Anhang

Fragebögen

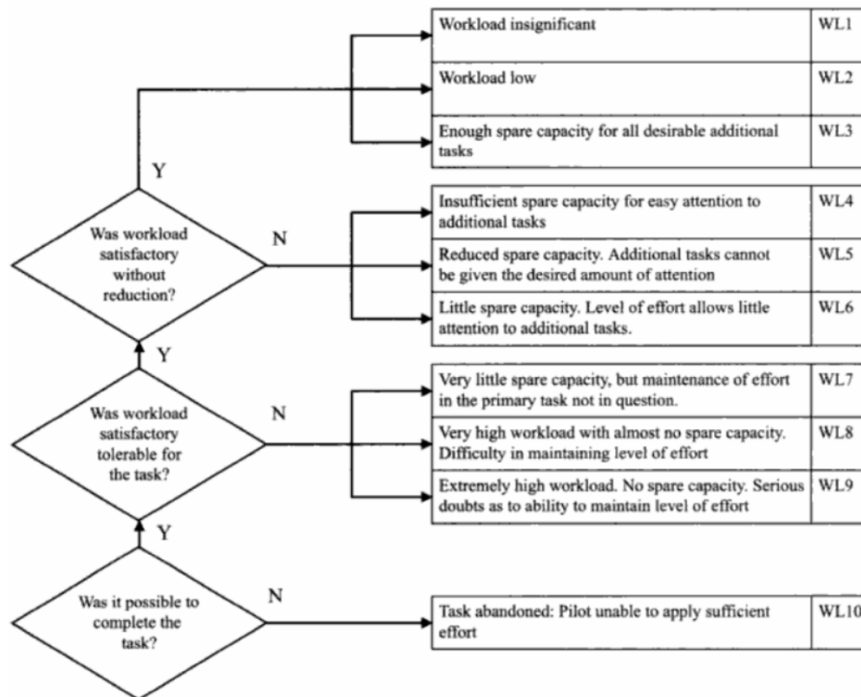


Abbildung 7-1 Bedford Mental Workload Skala

Zeichnen Sie die folgenden Einheiten mit Flugpfad und Unsicherheit ein:

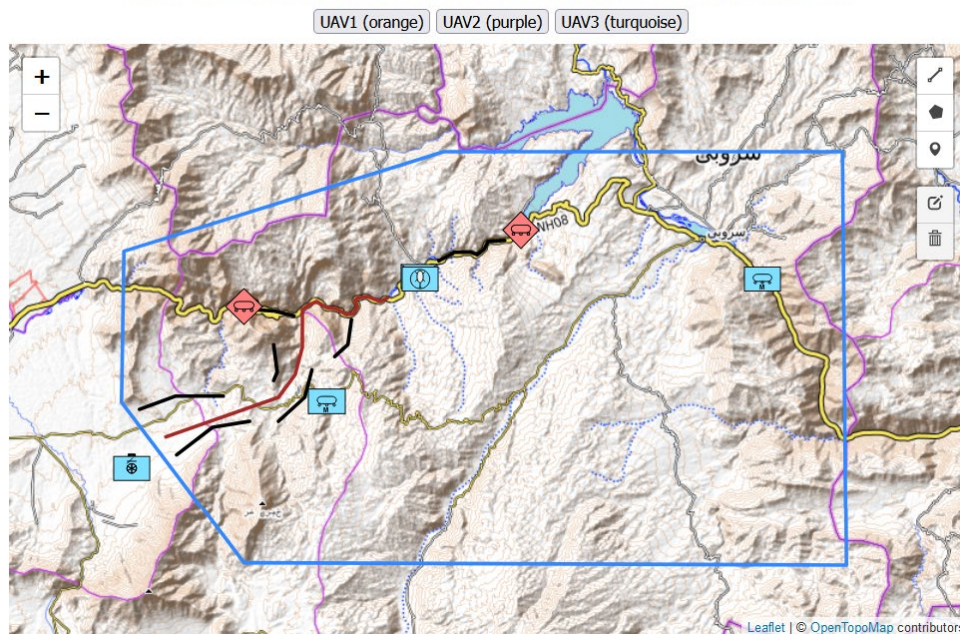


Abbildung 7-2 Befragung zur Messung des Situationsbewusstseins

Display Qualities Rating Scale

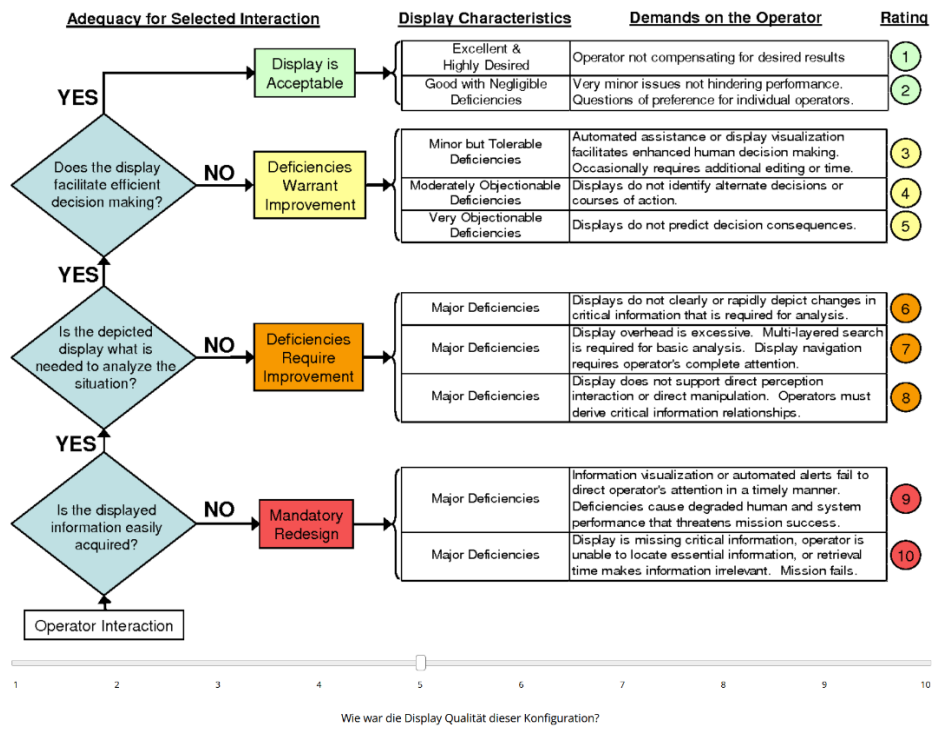


Abbildung 7-3 Modifizierte Cooper-Harper Bewertungsskala

Geben Sie eine prozentuale Einschätzung ab, in wie vielen Fällen sich die Planungsunterstützung (Handlungsempfehlung) entsprechend der folgenden Kriterien verhalten hat. Das System ...

... hat Feedback gegeben.

0 10 20 30 40 50 60 70 80 90 100

... war vorhersagbar.

0 10 20 30 40 50 60 70 80 90 100

... hat mit Ihnen kommuniziert.

0 10 20 30 40 50 60 70 80 90 100

... hat genau das gemacht, was man instruiert hat.

0 10 20 30 40 50 60 70 80 90 100

... hat die Missionsanforderungen erfüllt.

0 10 20 30 40 50 60 70 80 90 100

... hat nicht reagiert.

0 10 20 30 40 50 60 70 80 90 100

... war vertrauenswürdig.

0 10 20 30 40 50 60 70 80 90 100

... hat geeignete Informationen zur Verfügung gestellt.

0 10 20 30 40 50 60 70 80 90 100

... hat richtig funktioniert.

0 10 20 30 40 50 60 70 80 90 100

... war zuverlässig (technisch).

0 10 20 30 40 50 60 70 80 90 100

... hat eine Fehlfunktion (technisch) gehabt.

0 10 20 30 40 50 60 70 80 90 100

... war verlässlich (eine Unterstützung).

0 10 20 30 40 50 60 70 80 90 100

... hat konsequent gehandelt.

0 10 20 30 40 50 60 70 80 90 100

... ist den Anweisungen gefolgt.

0 10 20 30 40 50 60 70 80 90 100

... hat etwas Falsches gemacht.

0 10 20 30 40 50 60 70 80 90 100

Abbildung 7-4 Trust in Automation Fragebogen

Bewerten Sie die allgemeine Bedien-/Benutzbarkeit der Planungsunterstützung

Ich denke, ich kann das System schnell produktiv nutzen.

stimme überhaupt NICHT zu
 stimme NICHT zu
 stimme eher NICHT zu
 neutral
 stimme eher zu
 stimme zu
 stimme voll zu
 (keine Angabe)

Die Anordnung der Informationen auf dem Bildschirm ist einleuchtend.

stimme überhaupt NICHT zu
 stimme NICHT zu
 stimme eher NICHT zu
 neutral
 stimme eher zu
 stimme zu
 stimme voll zu
 (keine Angabe)

Die dargestellten Informationen haben mir effektiv bei der Erfüllung meiner Aufgaben geholfen.

stimme überhaupt NICHT zu
 stimme NICHT zu
 stimme eher NICHT zu
 neutral
 stimme eher zu
 stimme zu
 stimme voll zu
 (keine Angabe)

Es war einfach das System zu nutzen.

stimme überhaupt NICHT zu
 stimme NICHT zu
 stimme eher NICHT zu
 neutral
 stimme eher zu
 stimme zu
 stimme voll zu
 (keine Angabe)

Das System bietet alle Funktionen und Möglichkeiten, die ich erwarten würde

stimme überhaupt NICHT zu
 stimme NICHT zu
 stimme eher NICHT zu
 neutral
 stimme eher zu
 stimme zu
 stimme voll zu
 (keine Angabe)

Wenn ich etwas falsch gemacht habe, war es einfach den Fehler zu beheben.

stimme überhaupt NICHT zu
 stimme NICHT zu
 stimme eher NICHT zu
 neutral
 stimme eher zu
 stimme zu
 stimme voll zu
 (keine Angabe)

Wenn das System mich auf etwas aufmerksam machen wollte, konnte ich schnell verstehen, um was es ging

stimme überhaupt NICHT zu
 stimme NICHT zu
 stimme eher NICHT zu
 neutral
 stimme eher zu
 stimme zu
 stimme voll zu
 (keine Angabe)

Die zu dem System herausgegebenen Informationen (z.B. Quick-Reference) war gut verständlich und hilfreich.

stimme überhaupt NICHT zu
 stimme NICHT zu
 stimme eher NICHT zu
 neutral
 stimme eher zu
 stimme zu
 stimme voll zu
 (keine Angabe)

Die Benutzerschnittstelle des Systems ist ansprechend.

stimme überhaupt NICHT zu
 stimme NICHT zu
 stimme eher NICHT zu
 neutral
 stimme eher zu
 stimme zu
 stimme voll zu
 (keine Angabe)

Ich empfinde das System als unnötig komplex.

stimme überhaupt NICHT zu
 stimme NICHT zu
 stimme eher NICHT zu
 neutral
 stimme eher zu
 stimme zu
 stimme voll zu
 (keine Angabe)

Ich konnte die Aufgaben / Missionen schnell erledigen mit dem System.

stimme überhaupt NICHT zu
 stimme NICHT zu
 stimme eher NICHT zu
 neutral
 stimme eher zu
 stimme zu
 stimme voll zu
 (keine Angabe)

Das System zu bedienen war angenehm.

stimme überhaupt NICHT zu
 stimme NICHT zu
 stimme eher NICHT zu
 neutral
 stimme eher zu
 stimme zu
 stimme voll zu
 (keine Angabe)

Ich bin mit dem System als Ganzes zufrieden.

stimme überhaupt NICHT zu
 stimme NICHT zu
 stimme eher NICHT zu
 neutral
 stimme eher zu
 stimme zu
 stimme voll zu
 (keine Angabe)

Ich habe die Benutzerschnittstelle des Systems gerne bedient.

stimme überhaupt NICHT zu
 stimme NICHT zu
 stimme eher NICHT zu
 neutral
 stimme eher zu
 stimme zu
 stimme voll zu
 (keine Angabe)

Die dargestellten Informationen, die das System gegeben hat, waren klar verständlich

stimme überhaupt NICHT zu
 stimme NICHT zu
 stimme eher NICHT zu
 neutral
 stimme eher zu
 stimme zu
 stimme voll zu
 (keine Angabe)

Es fiel mir leicht, die Bedienung des Systems zu lernen.

stimme überhaupt NICHT zu
 stimme NICHT zu
 stimme eher NICHT zu
 neutral
 stimme eher zu
 stimme zu
 stimme voll zu
 (keine Angabe)

Abbildung 7-5 Post-Study System Usability Fragebogen

Trainingsmaterial Spezialtraining



Aerospace Engineering Department
Institute of Flight Systems
 Universität Ulm · University of Ulm

Training



Einführung

- Im Folgenden soll die parallele Nutzung von UAVs durch zusätzliche Bedarfsträger untersucht werden.
- Die UAVs sind nun also nicht mehr exklusiv dem eigenen Hubschrauber zugehörig, sondern können von anderen Nutzern angefragt werden.
- Sie in der Rolle des Kommandanten sind für die Bearbeitung der Anfragen zuständig.

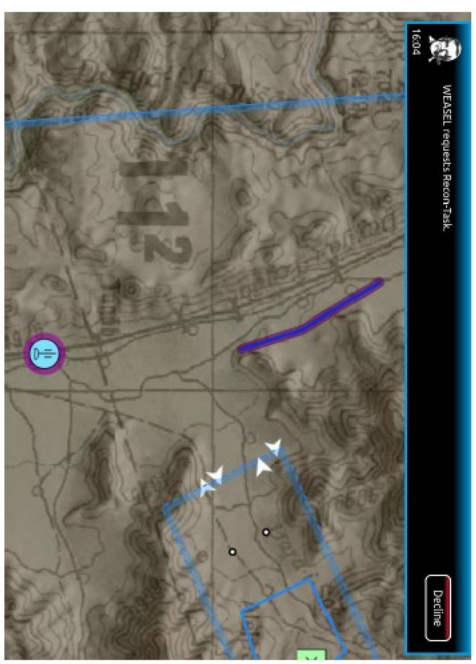


Aerospace Engineering Department
Institute of Flight Systems
 Universität Ulm · University of Ulm

Institute of Flight Systems
IFS
 Anfragen

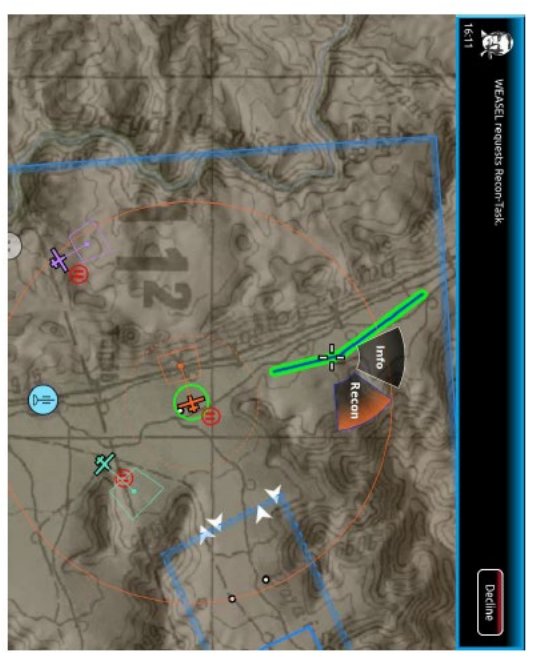
- Es gibt zwei Typen von Anfragen:
- Anfragen zur **Aufklärung** einer bestimmten Route
- Anfragen zur **temporären UAV-Nutzung**

- Die Anfragen erscheinen in Form eines Dialogs im oberen Bereich des MFDs und beinhalten:
 - Name der anfragenden Einheit
 - Anfrage-Typ
 - Ggf. Dauer der angefragten Nutzung



Institute of Flight Systems
IFS
 Beantwortung von Anfragen

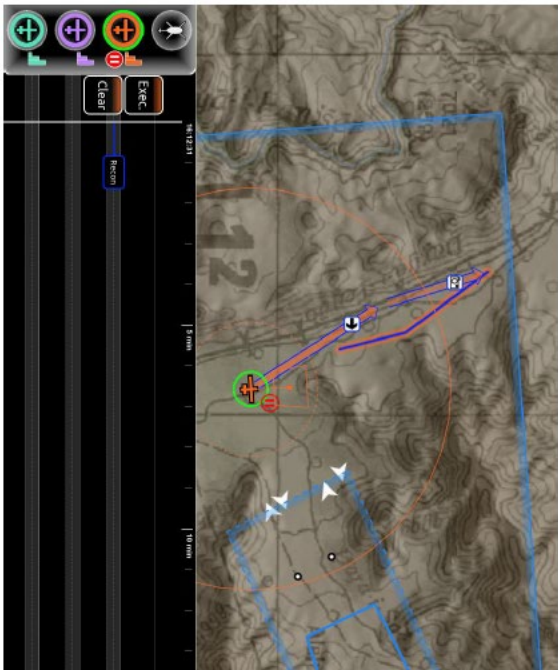
- Anfragen können gewährt werden, indem einem UAV der entsprechende Auftrag über das Kontextmenü zugewiesen wird



- Anfragen können abgelehnt werden, indem der Knopf "Decline" gedrückt wird

Institute of Flight Systems
IFS
 Beantwortung von Anfragen

- Die Auftragspfeile gewählter Anfragen werden in der taktischen Karte blau umrahmt dargestellt



- Ebenso werden diese in der Timeline blau dargestellt
- Nach Selection in der Timeline ist es über "Re-Open" auch möglich, bereits bewilligte Anfragen zurückzunehmen und wieder in den Anfragestatus zu überführen

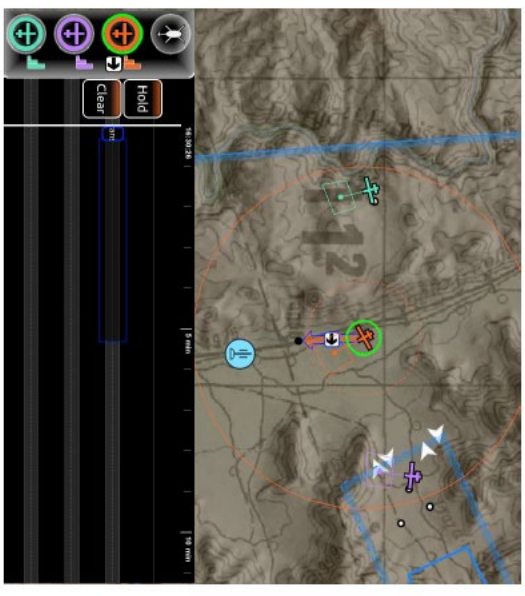
Institute of Flight Systems
IFS
 Beantwortung von Anfragen

- Anfragen zur temporären Nutzung der UAVs beinhalten zusätzlich die Dauer der angefragten Nutzung



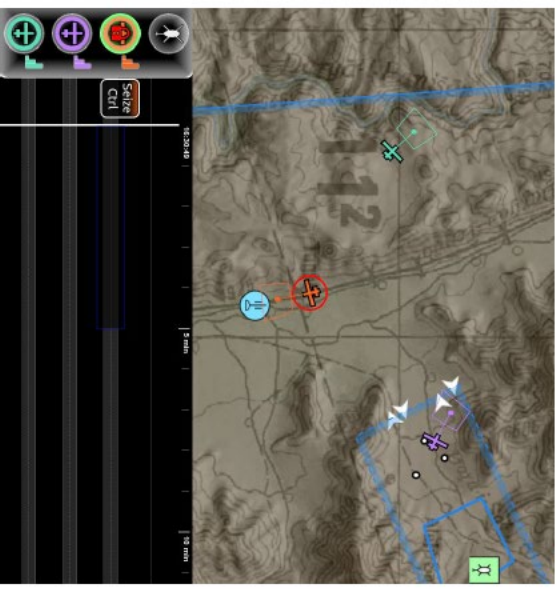
Beantwortung von Anfragen

- Gewählte Anfragen zur temporären Nutzung der UAVs tauchen ebenfalls in der Timeline auf und sind blau umrahmt



Beantwortung von Anfragen

- Während der temporären Nutzung eines UAVs ist dieses nicht bedienbar. Bei Bedarf kann die Kontrolle jedoch jederzeit über "Seize Ctrl" zurückgewonnen werden





Beantwortung von Anfragen

- Die Beantwortung von Anfragen soll im Folgenden durch zwei Arten unterstützt werden:
 - durch die Bereitstellung von Alternativen
 - durch die Bereitstellung einer Handlungsempfehlung



Bereitstellung von Alternativen

- Anfragen können gewährt werden, indem einem UAV der entsprechende Auftrag über das Kontextmenü zugewiesen wird



- Anfragen können abgelehnt werden, indem der Knopf "Decline" gedrückt wird



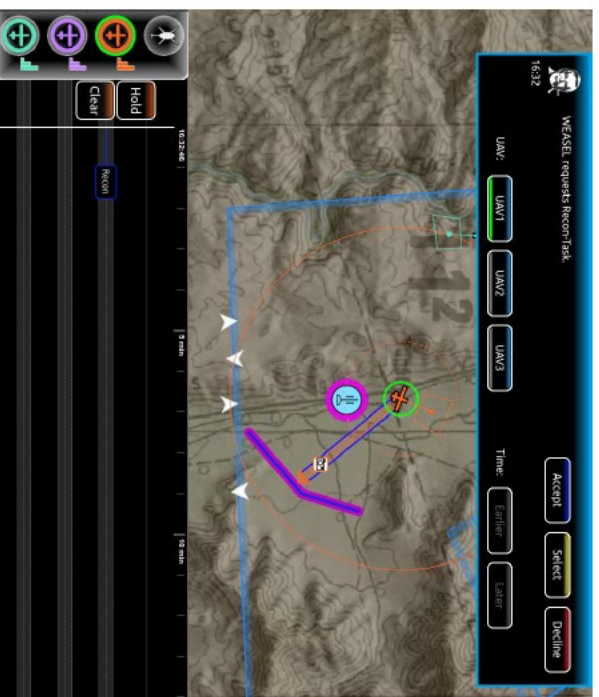
Bereitstellung von Alternativen:

- Der Anfrage-Dialog kann über den Button "Select" expandiert werden
- Es erscheinen zwei Auswahl-Menüs:
 1. Zuweisung eines UAVs ("UAV1", "UAV2", "UAV3")
 2. Zuweisung der Position im Plan ("Earlier", "Later")
- Durch entsprechende Selektierung kann die Anfrage beliebig im Plan zugewiesen werden.



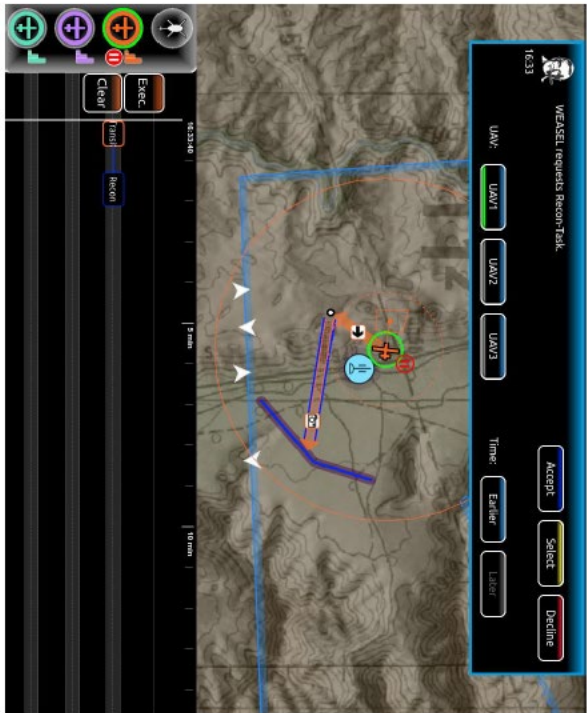
Bereitstellung von Alternativen:

- Nach Selektion ist die Zuweisung auf der Karte durch einen Pfeil ersichtlich
- Die jeweilige Auswirkung ist auch in der Timeline ersichtlich.
- Die ausgewählte Selektion kann durch "Accept" akzeptiert werden.



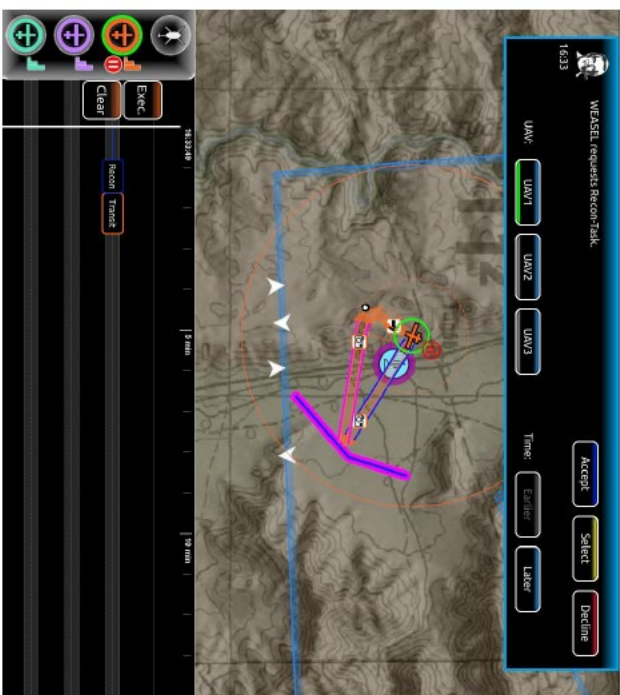
Bereitstellung von Alternativen:

- Besitz dieses UAV bereits Aufträge kann die Anfrage über "Earlier" und "Later" einsortiert werden.



Bereitstellung von Alternativen:

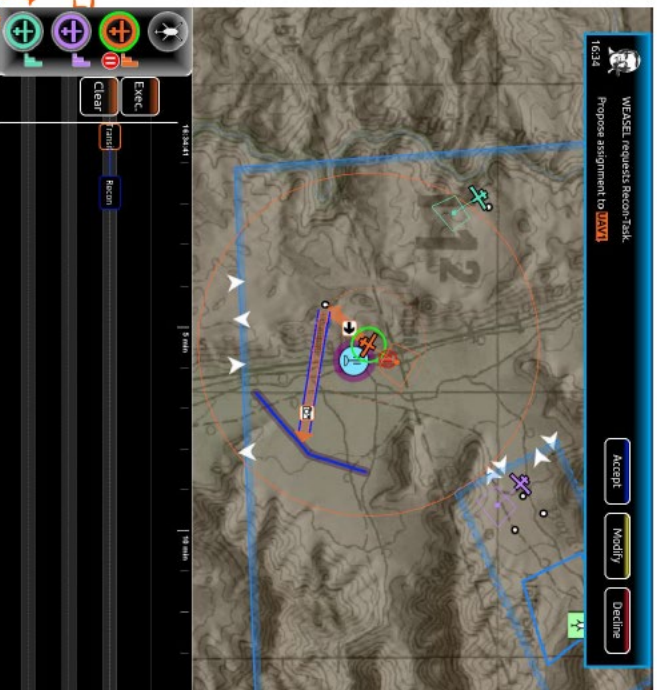
- Besitz dieses UAV bereits Aufträge kann die Anfrage über "Earlier" und "Later" einsortiert werden.
- Folgeaufträge werden durch Auftragspfeile in magenta auf der Karte dargestellt



Institute of Flight Systems
IFS
 Unterstützung von Anfragen

Bereitstellung einer Handlungsempfehlung:

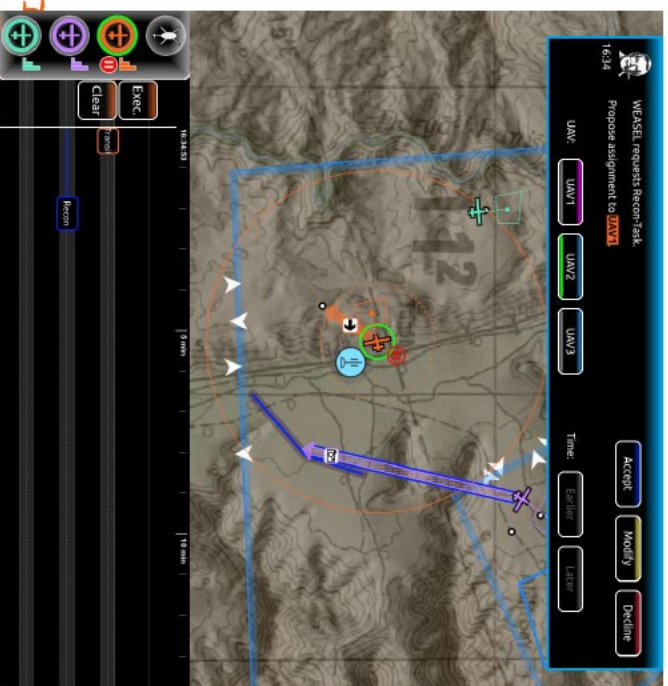
- Zusätzlich zur Alternativen-Auswahl wird nun eine Handlungsempfehlung bereitgestellt
- Der Dialog enthält nun zusätzlich die Empfehlung
- Die Empfehlung basiert u. a. auf folgenden Kriterien:
 - Entfernung der UAVs zur Anfrage
 - Auswirkungen auf den jetzigen Plan
 - Auswirkungen auf den zukünftigen Plan



Institute of Flight Systems
IFS
 Unterstützung von Anfragen

Bereitstellung einer Handlungsempfehlung:

- Die Empfehlung kann direkt mit "Accept" akzeptiert werden
- Andernfalls gelangt man durch "Modify" in die Alternativen-Auswahl
- Darin ist die Empfehlung auch in magenta hervorgehoben
- Mit "Accept" wird die Auswahl akzeptiert





Unterstützung von Anfragen

Bereitstellung einer Handlungsempfehlung:

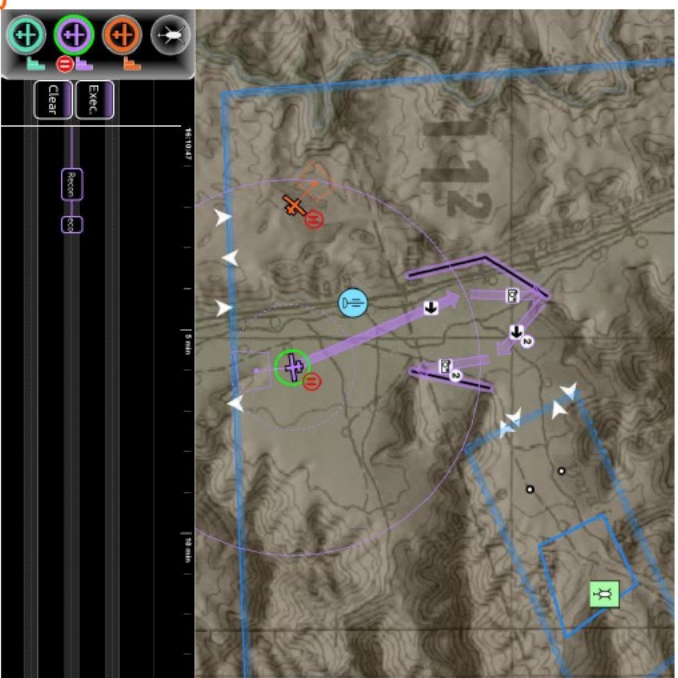
- Im Zusammenhang mit einer Anfrage kann das System außerdem vorschlagen,
 - Aufgaben eines einzelnen UAVs umzusortieren
 - Aufgaben von einem UAV an ein anderes UAV abzugeben
- Diese Vorschläge werden durch zusätzliche magenta-farbene Pfeile auf der Karte bzw. in der Timeline dargestellt



Unterstützung von Anfragen

Bereitstellung einer Handlungsempfehlung:

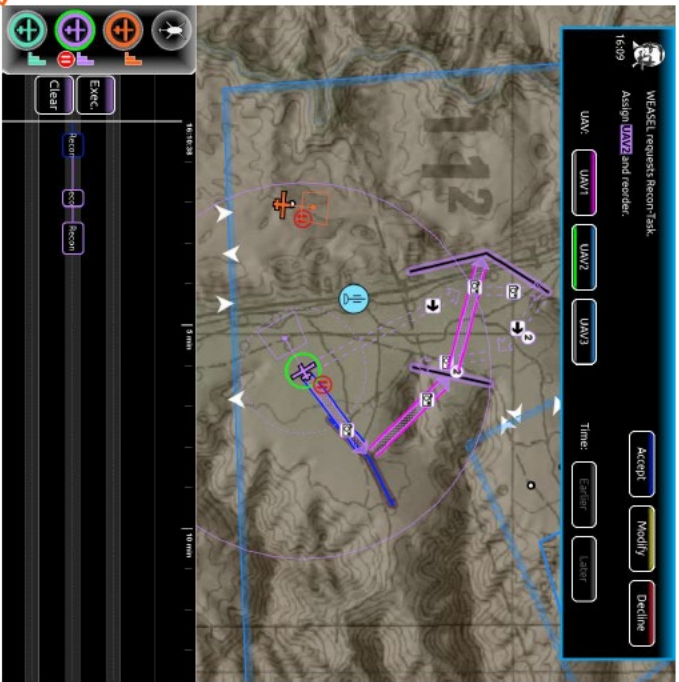
- Eine Handlungsempfehlung kann auch beinhalten, die Aufgaben eines UAVs umzusortieren, wenn es zur Bearbeitung der Anfrage günstig ist



Institute of Flight Systems
IFS
 Unterstützung von Anfragen

Bereitstellung einer Handlungsempfehlung:

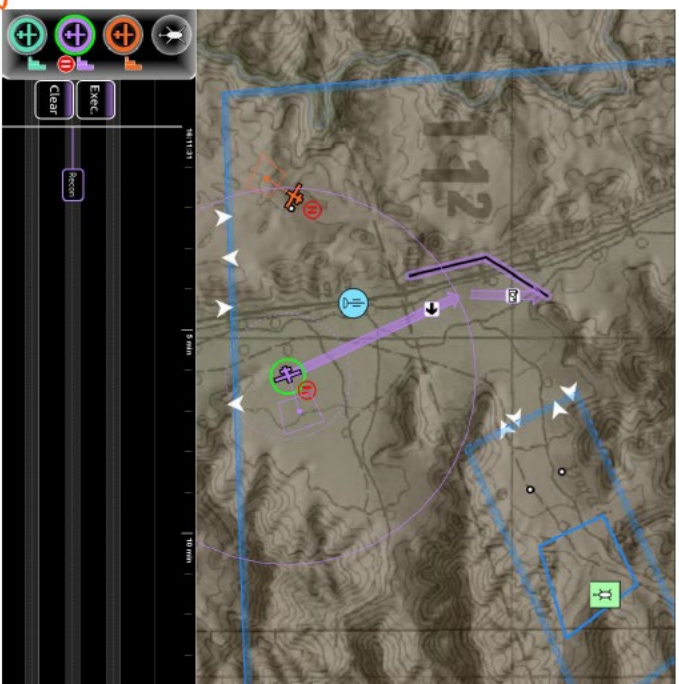
- Ein solcher Vorschlag wird durch zusätzliche magenta-farbene Pfeile auf der Karte dargestellt
- Die ursprünglichen Aufträge des UAVs werden transparent mit gestrichelter Kontur dargestellt

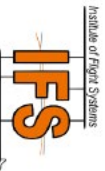


Institute of Flight Systems
IFS
 Unterstützung von Anfragen

Bereitstellung einer Handlungsempfehlung:

- Weiterhin kann eine Handlungsempfehlung auch beinhalten, die Aufgaben eines UAVs an ein anderes UAV abzugeben, wenn es zur Bearbeitung der Anfrage günstig ist

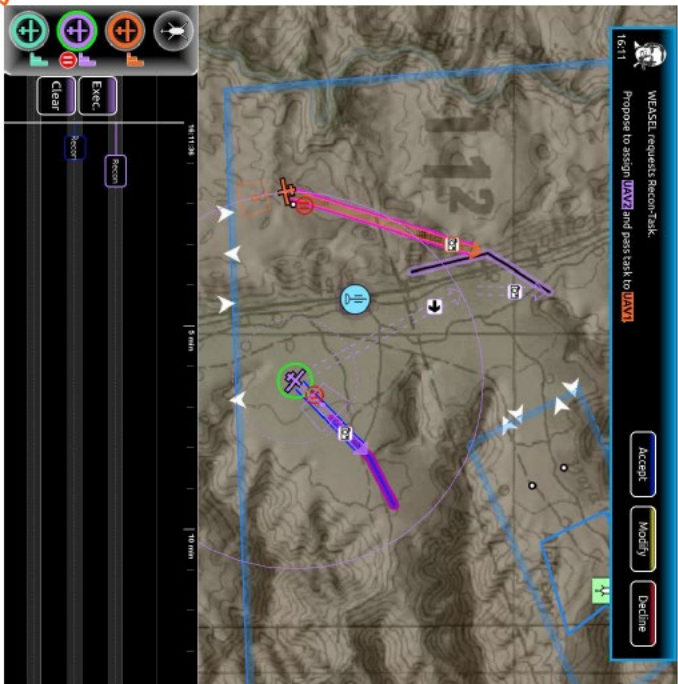




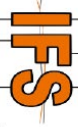
Unterstützung von Anfragen

Bereitstellung einer Handlungsempfehlung:

- Ein solcher Vorschlag wird durch zusätzliche magenta-farbene Pfeile auf der Karte dargestellt
- Die ursprünglichen Aufträge des UAVs werden transparent mit gestrichelter Kontur dargestellt



Missionsbriefings



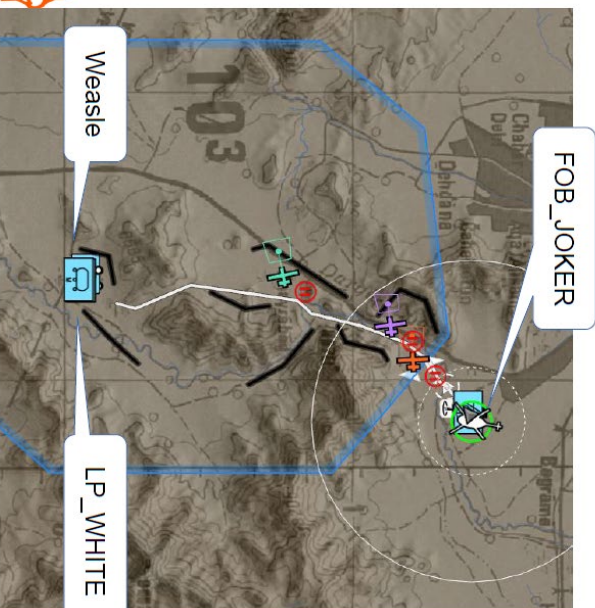
Auftrag und Eigene Lage

Lage:

- Die Patrouille **WEASLE** hat, etwa südlich von Kabul entlang ihrer Marschroute eine IED aufgeklärt

Auftrag:

- Transportieren Sie das EOD-Team **Turtle** vom Stützpunkt **FOB_JOKER** zum Landepunkt **LP_WHITE**
- Klären Sie möglichst alle gegebenen Aufklärungs-schwerpunkte auf, bevor Sie diese passieren
- Unterstützen Sie möglichst Anfragen von **Weasle** zur Sondierung der Lage im Bereich des Landepunktes



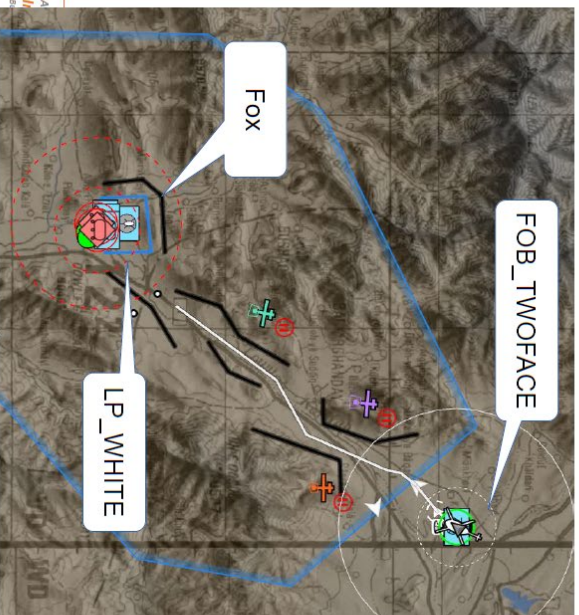
Auftrag und Eigene Lage

Lage:

- Die Patrouille **Fox** ist südwestlich von Kabul auf ihrer Marschroute in einen Hinterhalt geraten

Auftrag:

- Verlegen Sie vom Stützpunkt **FOB_TWOFACE** zum Landepunkt **LP_WHITE**
- Klären Sie möglichst alle gegebenen Aufklärungs-schwerpunkte auf, bevor Sie diese passieren
- Unterstützen Sie möglichst Anfragen von **befreundeten Einheiten** zur Sondierung der Lage im Missionsgebiet



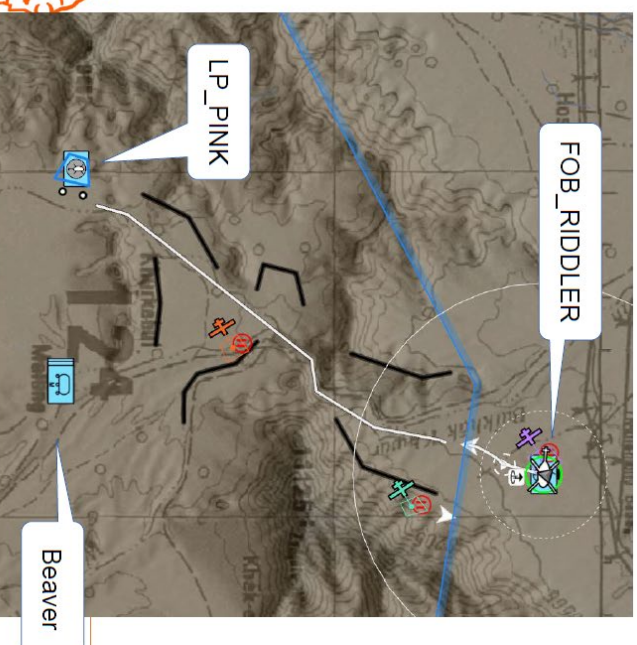
Auftrag und Eigene Lage

Lage:

- Südlich von Kabul ist ein Jet abgestürzt. Die Patrouille **Beaver** ist bereits auf dem Weg, um die Absturzstelle ausfindig zu machen und abzusichern.

Auftrag:

- Verlegen Sie vom Stützpunkt **FOB_RIDDLER** zur vermuteten Absturzstelle **LP_PINK**
- Klären Sie möglichst alle gegebenen Aufklärungs-schwerpunkte auf, bevor Sie diese passieren
- Unterstützen Sie möglichst Anfragen von **Beaver** zum Auffinden der Piloten und zur Sicherung der Absturzstelle



IFS

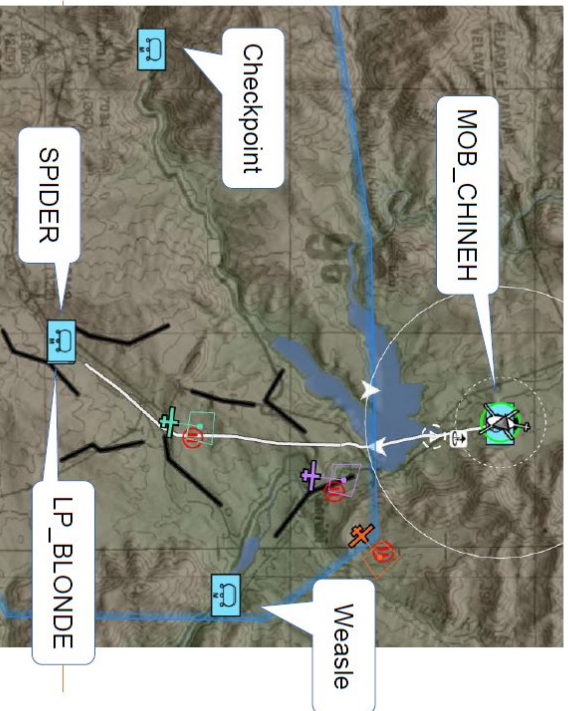
Auftrag und Eigene Lage

Lage:

- Südlich der Basis **MOB_CHINEH** wird der Checkpoint **SPIDER** aufgelöst. Weiterhin befinden sich die Patrouille **Weasle** und ein weiterer Checkpoint im Missionsgebiet.

Auftrag:

- Verlegen Sie vom Stützpunkt **MOB_CHINEH** zum Checkpoint **SPIDER** um Material abzutransportieren
- Klären Sie möglichst alle gegebenen Aufklärungs-schwerpunkte auf, bevor Sie diese passieren
- Unterstützen Sie möglichst Anfragen von **befreundeten Einheiten**



IFS

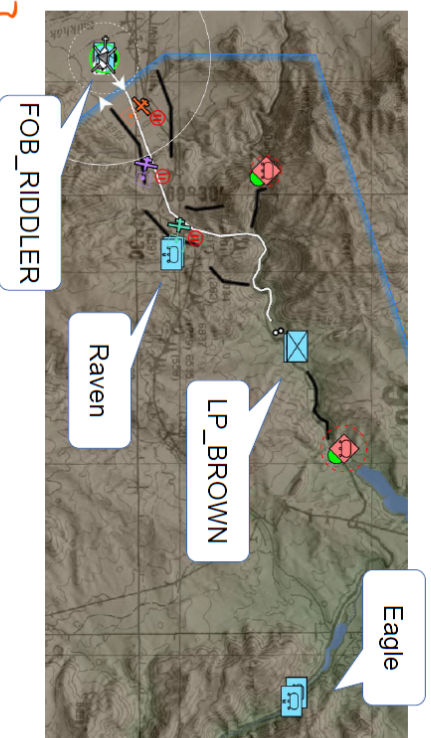
Auftrag und Eigene Lage

Lage:

- Zwei Soldaten wurden versprengt. Alle Ausweichrouten sind durch feindliche Einheiten blockiert. Außerdem befinden sich die Patrouillen **Eagle** und **Raven** im Missionsgebiet.

Auftrag:

- Verlegen Sie vom Stützpunkt **FOB_RIDDLER** zum **LP_BROWN**, um die Kameras zu evakuieren.
- Klären Sie möglichst alle gegebenen Aufklärungs-schwerpunkte auf, bevor Sie diese passieren
- Unterstützen Sie möglichst Anfragen von **befreundeten Einheiten**

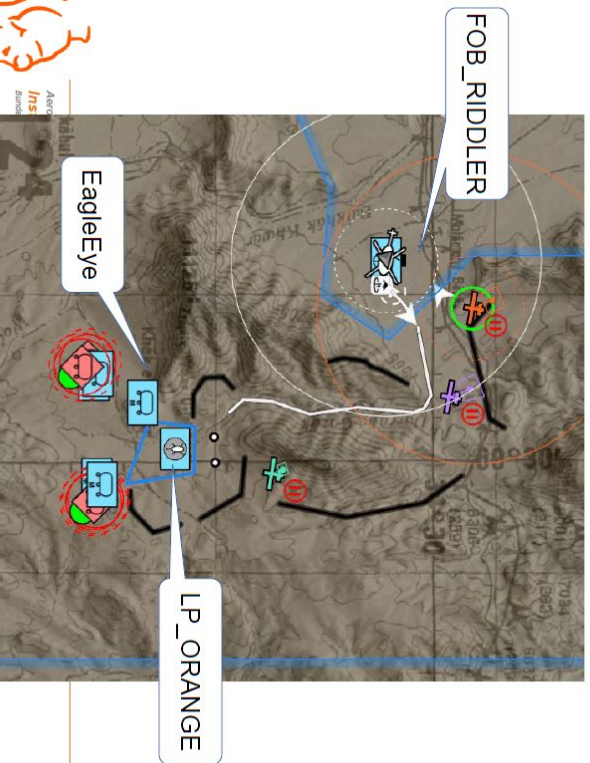


Lage:

- Der FAC **EagleEye** koordiniert zwei Gefechte im Missionsgebiet.

Auftrag:

- Verlegen Sie vom Stützpunkt **FOB_RIDDLER** zum **LP_ORANGE**, um sich dort für einen möglichen MedEvac Einsatz bereitzuhalten.
- Klären Sie möglichst alle gegebenen Aufklärungs-schwerpunkte auf, bevor Sie diese passieren
- Unterstützen Sie möglichst Anfragen von **EagleEye** zur Koordinierung der Gefechte.



Lage:

- Nördlich von Kabul kam es zu einem Unfall zwischen mehreren zivilen Fahrzeugen. Außerdem befinden sich die Patrouillen **Badger** und **Falcon** im Missionsgebiet.

Auftrag:

- Verlegen Sie vom Stützpunkt **FOB_SCARECROW** zum **LP_BLUE**, um die schwer verletzten Personen ins nächstgelegene Krankenhaus zu bringen.
- Klären Sie möglichst alle gegebenen Aufklärungs-schwerpunkte auf, bevor Sie diese passieren
- Unterstützen Sie möglichst Anfragen von **befreundeten Einheiten**.

