



der Bundeswehr
Universität  *München*

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

Dissertation

Taktische Analyse- und Aufklärungsassistentin (TakARA)
- Ein auf Influence Maps basierendes Assistenzsystem zur Situations- und
Entscheidungsanalyse bei taktischen Lagen –

Matthias A. Frey

Taktische Analyse- und Aufklärungsassistentin (TakARA)
- Ein auf Influence Maps basierendes Assistenzsystem zur Situations- und
Entscheidungsanalyse bei taktischen Lagen -

Eine Dissertation

von

M.Sc. M.Sc. Matthias A. Frey

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

Doktor-Ingenieurs (Dr.-Ing.)

angenommenen Dissertation.

Vorsitzender: Univ.-Prof. Dr.-Ing. habil. Michael Schultz
1. Berichterstatter: Univ.-Prof. Dr.-Ing. Axel Schulte
2. Berichterstatter: Univ.-Prof. Dr.-Ing. Dirk Söffker

Die Dissertation wurde am 07. Juni 2023 bei der Universität der Bundeswehr München eingereicht und durch die Fakultät für Luft- und Raumfahrttechnik am 21. Februar 2024 angenommen. Die mündliche Prüfung fand am 25. April 2024 statt.

In Gedenken an meine Eltern, Sonja Edeltraud Frey und Matthäus Anton Frey.

DANKSAGUNG

Diese Arbeit entstand während meiner beruflichen Tätigkeit als wissenschaftlicher Mitarbeiter an der Universität der Bundeswehr an der Professur für Flugmechanik und Flugführung. Da eine solche Arbeit meist nie ohne Mithilfe entsteht, möchte ich diese Stelle nutzen, um mich bei einem Teil jener zu bedanken, die mich im Laufe meiner Forschungsarbeit und der Anfertigung dieser Arbeit unterstützt haben.

Großer Dank gebührt meinem Doktorvater Prof. Dr.-Ing. Axel Schulte, der mich über die Jahre betreut und meine Arbeit begleitet hat. Mit seinen hilfreichen Anregungen, Motivation und konstruktiven Kritik hat er mich stets in die richtige Bahn gelenkt und damit maßgeblich zum Gelingen dieser Arbeit beigetragen. Darüber hinaus hat er mir wertvolle Tipps für die persönliche Weiterentwicklung gegeben, wofür ich ebenfalls sehr dankbar bin.

Gleicher Dank gilt Dr.-Ing. Diana Donath, die zusammen mit Prof. Schulte viele organisatorische Dinge im Hintergrund erledigt hat und so dafür gesorgt hat, dass ich mich auf meine Forschungsarbeit fokussieren konnte. Besonders möchte mich bei ihr für die Gespräche bedanken, die mir im Laufe meiner Zeit auch persönlich viel geholfen haben.

Besonderer Dank gilt auch Juniorprof. Dr. Jean Jane Kiam, die sich um meine Hündin Amy gekümmert hat, wenn ich sie einmal nicht mitnehmen konnte, sowie Prof. Dr.-Ing. Dirk Söffker, der sich als Zweitgutachter dieser Arbeit bereit erklärt hat!

Bedanken möchte mich auch bei allen Beteiligten, die im Transporthubschraubersimulator mitgewirkt haben, insbesondere das Team zu CASIMUS II und das Vorgängerteam zu CASIMUS. Die gemeinsame Zeit im Simulator war nicht nur produktiv, sondern bot eine einladende, entspannte Atmosphäre mit zahlreichen lustigen als auch bereichernden Momenten und Gesprächen! Die Entdeckung des Rootlers und die kulinarischen Kaffee-Highlights des empfehlenswerten Supremo-Kaffees sind nur zwei dieser unvergesslichen Momente!

Dank gilt auch meiner treuen Gefährtin Amy, die für lustige, wenn auch manchmal für anstrengende, Momente gesorgt hat und mit den gemeinsamen Gasszeiten auf der Hundemeile die ein oder andere Schreibblockade gelöst hat und mich auf Ideen kommen ließ!

Es gäbe noch vielen weiteren Menschen zu danken, die ich allerdings nicht alle aufzählen kann. Ich danke euch allen, die mich beim Gelingen dieser Arbeit unterstützt haben!

Matthias A. Frey

München, 21.12.2022

ABSTRACT

This thesis presents an agent system, which supports a user in situation analysis and tactical decision making in a military context. The main issues of this work are the conception of the agent, the implementation of the agent in an application domain, and the evaluation in human-machine experiments.

The core of the conception of the agent is the creation of a machine situation awareness. For this purpose, the agent processes the situation knowledge of an environment and integrates it into an internal model based on influence maps. Based on this knowledge, the agent applies algorithms for tactical decision-making to generate appropriate courses of action for specific situations that arise. These courses of action are communicated to the user in the form of recommendations. The generation of suggestions for the tactical approach is adapted to the situation and the user has the possibility to edit or modify the suggestions via system interactions and/or to make requests to the agent.

Furthermore, the work includes the implementation of the concept for the domain of Manned-Unmanned Teaming, as well as the integration in a research simulator for transport helicopter missions at the Institute of Flight Systems at the University of the Bundeswehr Munich.

Finally, the implemented agent system is evaluated in human-machine experiments in which subjects completed dynamic mission scenarios, among others. The results show that an intelligent agent for tactical support in military missions increases the effectiveness of the available means of operation and enhances the users' sense of security. The results also reveal potential for improvements and further research directions. Overall, the chosen approach of an intelligent agent system to support situation analysis and tactical decision making is very well suited.

KURZFASSUNG

In dieser Arbeit wird ein Agentensystem vorgestellt, welches einen Nutzer bei der Situationsanalyse und taktischen Entscheidungsfindung im militärischen Kontext situationsangepasst unterstützt. Wesentliche Punkte der Arbeit sind die Konzeption des Agenten, die Implementierung des Agenten in einer Anwendungsdomäne, sowie die Evaluierung in Mensch-Maschine Experimenten.

Kernpunkt der Konzeption des Agenten ist die Nachempfingung eines Situationsbewusstseins. Dazu verarbeitet der Agent das Situationswissen einer Umgebung und integriert es in einem auf Influence Maps basierenden internen Modell. Auf Grundlage dieses Wissens wendet der Agent Algorithmen zur taktischen Vorgehensweise an, um für bestimmte auftretende Situationen entsprechende Handlungsoptionen zu generieren. Diese Handlungsoptionen werden dem Nutzer in Form von Empfehlungen kommuniziert. Die Vorschlagsgenerierung zur taktischen Vorgehensweise ist dabei situationsangepasst und der Nutzer hat die Möglichkeit über Systeminteraktionen die Vorschläge zu bearbeiten bzw. zu modifizieren und/oder Anfragen an den Agenten zu stellen.

Weiterhin umfasst die Arbeit die Implementierung des Konzepts für die Domäne des Manned-Unmanned Teaming, sowie die Integration in einem Forschungssimulator für Transporthubschraubermissionen am Institut für Flugsysteme der Universität der Bundeswehr München.

In Mensch-Maschine Experimenten, in denen Probanden u.a. dynamische Missionsszenarien absolviert haben, wird das implementierte Agentensystem schließlich evaluiert. Die Ergebnisse zeigen, dass ein intelligenter Agent zur taktischen Unterstützung in militärischen Missionen die Effektivität der zur Verfügung stehenden Einsatzmittel erhöht und das Sicherheitsgefühl der Nutzer steigert, teilweise zeigen sich auch Verbesserungspotentiale und weitere Forschungsrichtungen auf. Insgesamt ist der gewählte Ansatz eines intelligenten Agentensystems zur Unterstützung der Situationsanalyse und taktischen Entscheidungsfindung sehr gut geeignet.

INHALTSVERZEICHNIS

DANKSAGUNG	6
ABSTRACT	8
KURZFASSUNG	9
Inhaltsverzeichnis	11
Abbildungsverzeichnis	17
Tabellenverzeichnis	21
Abkürzungsverzeichnis	22
1 Einführung und Motivation	1
1.1 Problemstellung und Zielsetzung	3
1.2 Aufbau der Arbeit.....	4
2 Grundlagen	5
2.1 Situation und Situationsbewusstsein (SA)	5
2.1.1 Situationsbewusstsein aus kognitionswissenschaftlicher Sicht.....	6
2.1.2 Zusammenhang zwischen SA und Entscheidungsfindung.....	9
2.1.3 Situationsbewusstsein aus technischer Sicht.....	10
2.1.4 Team-SA	13
2.2 Human-Agent Teaming (HAT).....	15
2.2.1 Kernpunkte des HAT	15
2.2.2 Agent	15
2.2.3 Zusammenarbeit zwischen Mensch und Maschine	18
2.2.4 SA aus Sicht der Mensch-Maschine Kooperation.....	19
2.2.5 Austausch von Informationen	21
2.2.6 Effekte in HAT	23
2.2.7 Designgrundsätze von HAT-Systemen	24

2.2.8	HAT-Systementwurf	28
2.3	Entscheidungsfindung in militärischen Kontexten	30
2.3.1	Rapid Decision-Making and Synchronization Process (RDSP)	30
2.3.2	OODA-Loop.....	32
2.3.3	METT-TC.....	33
2.4	Aufklärung	35
2.5	Bedrohungsanalyse.....	36
2.6	Systemarchitekturen zu SA und Einordnung	38
2.6.1	Agentenarchitekturen zu SA	38
2.6.2	Grundlegende Komponenten der Agentenarchitekturen.....	40
2.6.3	Einordnung	40
3	Konzept des Assistenten zur Situationsanalyse und Entscheidungsunterstützung	42
3.1	Problemfeldanalyse	42
3.1.1	Charakterisierung der Umgebung	42
3.1.2	Analyse der taktischen Entscheidung.....	43
3.1.3	Betrachteter Missionstyp und Annahmen	43
3.1.4	Ziele und Anforderungen am Agentenentwurf	44
3.2	Agentendesign und Komponentenentwurf.....	46
3.3	Object Assessment - Informationserfassung und -aufbereitung	48
3.4	Situation Assessment - Situationsrepräsentation.....	50
3.4.1	Bedrohungsbewertung.....	50
3.4.2	Situationsrepräsentationsmodell.....	64
3.4.3	IM-Tree	78
3.5	Impact Assessment - Situationsinterpretation	80
3.5.1	Modellierung von Assistenzsituationen	81

3.6	Decision Making - Taktisches Vorgehen	83
3.6.1	Modellierung taktischer Entscheidungsfindung	85
3.6.2	Zielobjektbestimmung.....	86
3.6.3	Aufgabenverteilung - Planbestimmung.....	87
3.6.4	Einheitenpositionierung über ein Leistungsmaß	90
3.6.5	Markov Decision Process (MDP)	91
3.6.6	MDP-Modellierung	93
3.7	Human-Machine-Interaction - Mensch-Maschine-Kollaboration.....	100
3.7.1	Interventionsmechanismus und Agentenzustand	100
3.7.2	Mitteilungen und Eingabeverarbeitung	101
3.8	Agentensystementwurf.....	102
3.8.1	Datenaufbereitung und Situationsüberwachung.....	104
3.8.2	Wissensmanagement	104
3.8.3	Folgeabschätzung und Entscheidungsfindung	105
3.8.4	Mensch-Maschine-Kommunikation.....	105
4	Implementierung in der Domäne Manned-Unmanned Teaming	107
4.1	Manned-Unmanned-Teaming (MUM-T).....	107
4.1.1	Task-Based-Guidance (TBG).....	108
4.1.2	UAV-Einsatzzwecke	109
4.1.3	Betrachtete Missionsszenarien	110
4.1.4	Einbindung von TacARA in das Arbeitssystem	111
4.2	Forschungssimulator	112
4.3	TacARA: Tactical Analysis and Reconnaissance Assistant	116
4.3.1	Datenaufbereitung und Situationsüberwachung.....	117
4.3.2	Datenanfragen	119

4.3.3	Wissensmanagement - Bedrohungsmodul	119
4.3.4	Wissensmanagement - Situationsrepräsentation	122
4.3.5	Folgenabschätzung - Assistenzsituationen	127
4.3.6	Taktische Entscheidung - Aufklärungsschwerpunkte	129
4.3.7	Taktische Entscheidung - UAV-Einsätze	133
4.3.8	Mensch-Maschine Dialogs- und Interventionssteuerung	137
4.3.9	Grafische Benutzeroberfläche	138
4.4	Integration im Hubschraubersimulator	139
4.4.1	Manuelle Anfragemöglichkeiten	140
4.4.2	Automatisierte Unterstützungsleistung	144
4.4.3	Darstellung der Bedrohungsbewertung	147
5	Experimentelle Evaluierung	150
5.1	Technische Auswertung	150
5.1.1	Zellauflösung	150
5.1.2	Parametrisierung der Aufklärungsziele	152
5.1.3	Evaluierung der Bedrohungsbewertung durch das DBN	158
5.1.4	Parametrisierung des MDPs zur Bestimmung des taktischen Vorgehens	164
5.2	Kollaborationsanalyse zwischen Piloten und Assistenzsystem	168
5.2.1	Versuchspersonen	168
5.2.2	Versuchsaufbau und Durchführung	168
5.2.3	Experimentalergebnisse und Diskussion	172
5.3	Bedrohungs- und UAV-Feindbeobachtungsanalyse von Assistenzsystem und Pilot ..	188
5.3.1	Versuchspersonen	189
5.3.2	Versuchsaufbau und Durchführung	190
5.3.3	Experimentalergebnisse und Diskussion	191

6	Fazit und Ausblick	196
6.1	Schlussfolgerungen und Empfehlungen.....	196
6.2	Weiterführende Forschungsrichtungen	198
6.3	Erweiterungen und Verbesserungen.....	199
	Literaturverzeichnis.....	201
A.1	Implementierungsdetails zum DBN.....	217
A.1.1	Knotenindexierung	217
A.1.2	Grenzwerte	217
A.2	Matrix zur Beschreibung möglicher Verwechslungen von Einheitentypen	219
A.3	Implementierter IM-Tree	219
A.4	Tabelle für die Berechnung des Waffenschweregrads bei historischen Konflikten	220
A.5	Algorithmen	222
A.5.1	Propagierungsfunktion	222
A.5.2	Bestimmung Zellposition für Pfadsuche von Aufklärungszielen	223
A.5.3	Bestimmung von UAV-Positionen.....	224
A.5.4	Bestimmung von Aufklärungsplänen.....	224
B	Experiment - Bedrohungs- und Feindanalyse	225
B.1	Missionsszenarien.....	225
B.1.1	Missionsszenarien für Experiment Teil 1.....	225
B.1.2	Missionsszenarien für Experiment Teil 2.....	228
B.2	Fragebögen.....	232
C	Experiment - Bewertung des Assistenzsystems	237
C.1	Missionsvignetten	237
C.1.1	Trainingsmission	237
C.1.2	Mission M-1-1: Basic Instinct.....	237

C.1.3	Mission M-1-2: Blue Airwolf	238
C.1.4	Mission M-2-1: Fire Bee	239
C.1.5	Mission M-2-2: Blue Arrow	240
C.1.6	Mission M-3-1: Heat	242
C.1.7	Mission M-3-2: Blue Angel	243
C.2	Allgemeines Briefing	244
C.3	Beispielbriefing	246
C.4	Fragebogen - Nach Abschluss einer Mission	248
C.5	Fragebogen – Debriefing	250
C.6	INTUI-Auswertung	254

ABBILDUNGSVERZEICHNIS

Abbildung 2-1: SA-Modell nach Endsley [21] (modifiziert)	10
Abbildung 2-2: JDL-Modell.....	11
Abbildung 2-3: Team SA-Modell nach [21] (modifiziert).....	13
Abbildung 2-4: Team SA-Modell nach [28] (modifiziert).....	14
Abbildung 2-5: Schematische Darstellung eines Agentensystems nach [39] (modifiziert)	16
Abbildung 2-6: Unified SA-Modell [40] (modifiziert)	19
Abbildung 2-7: Extended Unified SA-Modell [40] (modifiziert)	20
Abbildung 2-8: CWS-Konzept nach [41] (modifiziert)	21
Abbildung 2-9: Generische Kooperationsmodelle für Agenten-Kooperation nach [42] (modifiziert)	22
Abbildung 2-10: Beispiel eines Arbeitssystementwurfs	29
Abbildung 2-11: OODA-Loop (aus [60] nach [61]; modifiziert).....	32
Abbildung 3-1: Grundlegende Idee des Konzepts.....	47
Abbildung 3-2: Aktivitätsdiagramm zum Ablauf der Prüfung für das Auslösen einer Situationsbewertung. Der Startpunkt ist durch einen dunklen Kreis dargestellt.....	49
Abbildung 3-3: Beispiele zweier Graphen	52
Abbildung 3-4: Graphische Darstellung eines DBNs mit BN_1 (a), BN_{\rightarrow} (b) und des für fünf Zeitschritte ausgerollte BNs (c).....	55
Abbildung 3-5: Topologie des DBN mit durchnummerierten Knoten.....	57
Abbildung 3-6: Zeitlicher Zusammenhang zwischen Knoten des DBN	58
Abbildung 3-7: Harte Grenzwerte (links) gegenüber weichen Grenzübergängen (rechts) zwischen den Variablenwerten	64
Abbildung 3-8: Jede IM repräsentiert einen bestimmten Sachverhalt.....	66
Abbildung 3-9: Beispiel einer Kombination zweier IMs zu einer DM. Links die Ausgangssituation mit Positionsangaben von Einheiten, Mitte die jeweilige IM der militärischen Stärke der blauen und roten Einheiten; Rechts die resultierende DM nach Kombination der zwei IMs	67
Abbildung 3-10: Schematische Darstellung des IM-Tree-Modells.....	79
Abbildung 3-11: Schematische Darstellung des Prozessablaufs einer Assistenzsituation	82
Abbildung 3-12: Schematischer Prozessablauf der Kritikalitätsprüfung einer Assistenzsituation	83
Abbildung 3-13: Schematischer Aufbau der Komponente Tactical Decision-making	85
Abbildung 3-14: Prozessablauf für die Bestimmung von Zielobjekten	87
Abbildung 3-15: Graphische Darstellung des Aufklärungswerts mit $\alpha = \beta = 1$, $l_u = 0.35$, $l_m = 0.07$	97
Abbildung 3-16: Zustandsbeschreibung des Agenten zum Assistenzmodus	101

Abbildung 3-17: Systemarchitektur	103
Abbildung 4-1: Schematische Darstellung der Anwendung: TacARA in der Domäne des MUM-T für Transporthubschraubermissionen.....	111
Abbildung 4-2: Aufbau des Simulatorcockpits	113
Abbildung 4-3: Relevante Teilsysteme des Simulators, das TacARA-System ist in blau hervorgehoben	114
Abbildung 4-4: Moduldiagramm des Agenten.....	116
Abbildung 4-5: Verarbeitungsprozess der Bedrohungsbewertung. Die gepunkteten Pfeile deuten eingehende bzw. bereitgestellte Daten bzgl. der zu verwendeten Topologie an. Der gestrichelte Pfeil zeigt die Verwendung des Python-Moduls toolbox_engine.py an und die normale.....	120
Abbildung 4-6: Darstellung des verwendeten Zellgitters mit Beispielkoordinaten zur Verdeutlichung des Koordinatensystems	123
Abbildung 4-7: UML-Klassendiagramm für die Umsetzung des IM-Trees	124
Abbildung 4-8: Beispieldarstellung der Identifikation von Aufklärungszielen zur Absicherung der Landezone. Die Aufklärungsziele, die sich aus den Annäherungswegen der gegnerischen Einheiten ergeben sind nicht eingezeichnet, damit der Annäherungsweg zu erkennen ist	132
Abbildung 4-9: Grafische Benutzeroberfläche von TacARA	138
Abbildung 4-10: Taktische Kontrollschnittstelle im Hubschraubersimulatorcockpit	139
Abbildung 4-11: Schaltflächen für Anfragen an TacARA	140
Abbildung 4-12: Manuelle Anfrage an Aufklärungsroutenvorschlägen mit bereits selektierten Routenvorschlägen in grün (a) und den eingezeichneten Routenvorschlägen in der Karte, nachdem der Nutzer 'Accept' gedrückt hat (b).....	141
Abbildung 4-13: Darstellung der einblendbaren Informationsebenen; (a) Gefahrenbereiche (Hot-Spots), (b) Bewegungstendenzen von militärischen Gegnern (Movement), (c) UAV-Anforderungsbereiche (UAV-Demand)	143
Abbildung 4-14: Sequenzdiagramm für die Verdeutlichung des Kommunikationswegs der manuellen Anfrage der Aufklärungsroutenvorschlagsgenerierung.....	144
Abbildung 4-15: Vom Agenten automatisch an den Nutzer herangetragene Interaktionsdialoge; (a) Aufmerksamkeitslenkung auf eine gegnerische Bewegungstendenz zur Flugroute (Unterstützungsstufe 1), (b) Aufklärungsvorschläge zur Abdeckung der Bewegungstendenz (Unterstützungsstufe 2), (c) UAV-Auftragsvergebavorschläge (Unterstützungsstufe 3).....	146
Abbildung 4-16: Detailinformationen zu einem Hinweisdialog	147
Abbildung 4-17: Beispieldialoge des Bedrohungsgrads für die Kategorie (a) None, (b) Low, (c) Medium, (d) High, (e) Very High; (f) Für die Kategorie Very High ist der Bedrohungsindikator als dargestellt ...	148

Abbildung 5-1: Zellgitter mit unterschiedlichen Auflösungen für ein Missionsgebiet. Der Detaillierungsgrad ist insbesondere an den Tälern zu erkennen.....	151
Abbildung 5-2: Durchschnittliche Berechnungsdauer pro Iteration bei unterschiedlichen Zellgrößen	152
Abbildung 5-3: Visualisierung des Puffers (grünes Polygon) um eine geplante primäre Flugroute (durchgezogene Linie) mit $rP = 2000m$	153
Abbildung 5-4: Aufklärungsziele mit unterschiedlichen Parameterkonfigurationen bei jeweils gleichem Schwellwert $\tau_{rec} = 0.040$	155
Abbildung 5-5: Aufklärungsziele (gestrichelte, lilafarbene Pfeile) mit unterschiedlichen Aufklärungsschwellwerten bei gleicher Gewichtskonfiguration (Konfiguration 1 aus Tab. 5.1).....	157
Abbildung 5-6: Ermittelte Aufklärungspfade (lilafarbene Pfeile) bei unterschiedlichen maximalen Pfadlängen.....	158
Abbildung 5-7: Entwicklung der Bedrohungsverläufe für unterschiedliche CPTs.....	161
Abbildung 5-8: Auswertung der Dauer in Sekunden eines Durchlaufs für die Bestimmung der Bedrohungsgrade entsprechend der berücksichtigten Zeitschritte und der Anzahl der militärischen Gegner. Dabei wurde ebenfalls eine unterschiedliche Anzahl an zu berücksichtigten Referenzpunkten betrachtet. Jeder Funktionsverlauf steht repräsentativ für eine andere Anzahl an Referenzpunkten.....	163
Abbildung 5-9: Differenz des Bedrohungsgrads in Prozent bei unterschiedlicher Anzahl an gespeicherten Zeitschritten für den Einheitentyp "Jeep_Gunner" und der Gesinnung "Neutral". Die einzelnen Funktionsverläufe geben an, wie viele Zeitschritte gespeichert wurden. Die hier eingezeichneten gestrichelten Linien sollen dabei nur die Entwicklung verdeutlichen. Sie treffen keine Aussage über die Bereiche zwischen den Punkten.....	164
Abbildung 5-10: Entwicklung der Handlungsempfehlungen für unterschiedliche Belohnungskonfigurationen bei einem Diskontierungsfaktor $\gamma = 0.9$. Die Werte distance 1, distance 2, distance 3 geben die Entfernung für den militärischen Gegner 1, 2 bzw. 3 an. Die gestrichelten Verbindungslinien zwischen den Punkten verdeutlichen nur die Entwicklung. Sie treffen keine Aussage über die Bereiche zwischen den berechneten Punkten.....	166
Abbildung 5-11: Entwicklung der Handlungsempfehlung für unterschiedliche Diskontierungsfaktoren γ und der Belohnungskonfiguration 1. Die gestrichelten Verbindungslinien verdeutlichen nur die Entwicklung. Sie treffen keine Aussage über die Bereiche zwischen den markierten Punkten.....	167
Abbildung 5-12: Beispiel eines Missionspaars. Transparente Feindpositionen zeigen Markierungen an, an denen der Feind erscheint, sobald der Helikopter in ca. 2500 Meter Entfernung zu den jeweiligen Dreiecksmarkierungen (CROSS bzw. HAWKE) ist.....	170
Abbildung 5-13: Schematische Darstellung des Experimentablaufs.....	172

Abbildung 5-14: Einschätzung der Probanden zur Realitätsnähe der Missionen und zum Einfühlen in die Situationen.....	173
Abbildung 5-15: Einschätzung der Probanden hinsichtlich des Schwierigkeitsgrads der Missionen. Die ermittelte Durchschnittsschwierigkeit pro Mission ist für die verwendete Skala von -3 (sehr schwer) bis +3 (sehr leicht) in der Spalte unter Durchschnitt angegeben.....	174
Abbildung 5-16: Durchschnittlich getätigte manuelle Anfragen	175
Abbildung 5-17: Anfragen und Akzeptanzrate zu Aufklärungsrouten	175
Abbildung 5-18: Prozentualer Anteil der Anfragen an höhere Unterstützungsstufe und der Akzeptanz vorgeschlagener Handlungsoptionen.....	177
Abbildung 5-19: Anzahl der vergebenen Aufklärungs- und Transitaufgaben an die UAVs in den jeweiligen Konfigurationen.....	178
Abbildung 5-20: Aufklärungsflächen in Missionssituation M-1-1	179
Abbildung 5-21: Aufklärungsflächen in Missionssituation M-1-2	180
Abbildung 5-22: Aufklärungsflächen in Missionssituation M-2-1	181
Abbildung 5-23: Aufklärungsflächen in Missionssituation M-2-2	182
Abbildung 5-24: Vergleich Aufklärungen durch UAVs in den verschiedenen Missionen mit und ohne TacARA	183
Abbildung 5-25: Auswertung der Bedfordbewertungen pro Probanden und geflogener Konfiguration. .	184
Abbildung 5-26: SUS-Auswertung. Negativ formulierte Fragen sind mit einem '(n)' gekennzeichnet...	185
Abbildung 5-27: Einschätzung der Probanden zur Intervention von TacARA.....	188
Abbildung 5-28: Übersicht der für die Teilnehmer relevanten Informationen für die Bedrohungsbewertung vor (a) und nach (b) den Lagebeurteilungen	191
Abbildung 5-29: Akzeptanzraten der vorgeschlagenen Bedrohungsbewertungen und Handlungsoptionen pro Situation, sowie die durchschnittliche Akzeptanzraten über alle Situationen hinweg	193
Abbildung A-6-1: IM-Tree.....	220
Abbildung B-6-2: Auswertung des modifizierten Fragebogens zur intuitiven Interaktion, Teil 1.....	255
Abbildung C6-3: Auswertung des modifizierten Fragebogens zur intuitiven Interaktion, Teil 2.....	256
Abbildung 6-4: Auswertung des modifizierten Fragebogens zur intuitiven Interaktion, Teil 3.....	257

TABELLENVERZEICHNIS

Tabelle 3-1: Diskretisierungswerte für die Variable distance	59
Tabelle 3-2: Diskretisierungswerte für die Variable speed	59
Tabelle 3-3: Diskretisierungswerte für die Variable direction	60
Tabelle 4-1: Assistenzsituationen.....	128
Tabelle 4-2: Tabellarische Darstellung des Beispielszustands (5, 0, 1, 4, 3, 2).....	136
Tabelle 4-3: Übersicht über verschiedene Aktionsräume. Ei steht für den i-ten militärischen Gegner i und RP steht für die Aktion Routen umplanen.....	137
Tabelle 4-4: Grenzen der Klassifizierung des Bedrohungsgrads ($a \leq \text{threat} \leq b$).....	148
Tabelle 5-1: Verwendete Konfigurationen für die Bestimmung von Aufklärungszielen.....	154
Tabelle 5-2: Beschreibung der diskreten Wertekombinationen für die generierten Fälle.....	159
Tabelle 5-3: Belohnungskonfigurationen.....	165
Tabelle 5-4: Abgebildete Situationen in Missionspaare.....	169
Tabelle 5-5: Anzahl der geflogenen Konfigurationen pro Mission.....	173
Tabelle 5-6: Anzahl der aufgetretenen Unterstützungsstufen	177
Tabelle 5-7 Auswertung der Bedrohungsbewertungen für jede gegnerische Einheit aus allen Situationen	192
Tabelle 5-8: Auswertung der gewählten Handlungsoptionen für jede Situation. Die Aktionen „Gegner 1/2/3 aufklären“ stehen für eine Handlungsoption, weswegen mehrere Robotersymbole dargestellt sein können	193
Tabelle A-6-1: Knotennummerierungen der im DBN verwendeten Knoten.....	217
Tabelle A-6-2: Grenzwerte für die einzelnen Knoten des DBN	218
Tabelle A-6-3: Matrix mit Angabe der Verwechslungsmöglichkeiten von Einheitentypen. Verwechslungsmöglichkeiten sind mit 1 gekennzeichnet, ansonsten 0.....	219
Tabelle A-6-4: Verwendete Tabelle zur Berechnung des Waffenschweregrads bei historischen Konflikten	221

ABKÜRZUNGSVERZEICHNIS

BN	Bayes'sches Netz (engl.: Bayesian Network)
CA	Combination Algorithm (dt.: Kombinerungsalgorithmus)
CCM	Cross-Country-Mobility
CCMM	Cross-Country-Mobility Model
CM	Calculation Model (dt.: Berechnungsmodell)
CPD	Conditional Probability Distribution (dt.: Bedingte Wahrscheinlichkeitsverteilung)
CPT	Conditional Probability Table (dt.: Bedingte Wahrscheinlichkeitstabelle)
DAG	Directed Acyclic Graph (dt.: Gerichteter, azyklischer Graph)
DBN	Dynamisches Bayes'sches Netz (engl.: Dynamic Bayesian Network)
DM	Desirability Map
HAT	Human-Autonomy Teaming
IM	Influence Map
MDP	Markov Decision Process
METT-TC	Mission, Enemy, Terrain & Weather, Troops, Time, Civil Considerations
MUM-T	Manned-Unmanned-Teaming
OODA	Observe-Orient-Decide-Act
RDSP	Rapid Decision-Making and Synchronization Process
SA	Situation Awareness
TacARA	Tactical Analysis and Reconnaissance Agent
TBG	Task-Based Guidance (dt.: Auftragsbasierte Führung)
UAV	Unmanned Aerial Vehicle

1 | EINFÜHRUNG UND MOTIVATION

"Lerne die Situation, in der du dich befindest, insgesamt zu betrachten."

— Miyamoto Musashi

Dieses Zitat des japanischen Schwertkämpfers Miyamoto Musashi (japanisch 宮本 武蔵, 1584-1645) klingt zwar sehr abstrakt, doch zeigt es, dass er schon zu seiner Zeit die Bedeutung einer Situation und den möglichen Einflussfaktoren erkannt hat. Er galt als einer der erfolgreichsten Schwertkämpfer des feudalen Japans und seine schriftlich festgehaltenen Lehrensätze dienen auch heute noch vielen als Quelle für Lebensweisheiten und Managementstrategien. Nach dem digitalen Wörterbuch der deutschen Sprache ist eine Situation definiert als die "augenblickliche Verhältnisse, Umstände, gegebene Lage" [1]. Der Begriff fasst die zu einem bestimmten Zeitpunkt auftretende Konstellation von existierenden Objekten mit deren Beziehungen untereinander in einem Raum zusammen. Die Erfassung und Bewertung einer Situation bilden eine wichtige Grundlage, auf der Entscheidungen getroffen werden. Wir finden diese Tatsache allgegenwärtig in unserem Alltag. Im Straßenverkehr müssen wir nicht nur unsere eigene momentane Geschwindigkeit und Fahrzeugzustand kennen, sondern auch die Verkehrssituation um uns herum. Es reicht dabei nicht die Situation an sich einfach nur wahrzunehmen, sondern sie muss auch verstanden werden, so dass wir mögliche zukünftige Auswirkungen abschätzen und Entscheidungen treffen können. Möchte man z.B. auf einer Autobahn ein anderes Fahrzeug überholen, müssen andere Verkehrsteilnehmer beachtet werden, die von hinten kommen können, sowie Faktoren einkalkuliert werden, wie die eigene Geschwindigkeit, die Abschätzung des Verkehrsteilnehmers vor dem eigenen Fahrzeug usw. Abhängig von der Situation kann das Überholmanöver sofort vollzogen werden oder man muss die eigene Geschwindigkeit reduzieren, wenn aufgrund eines ankommenden anderen Fahrzeugs das Überholen nicht möglich ist und man ein Auffahren auf das vordere Fahrzeug verhindern möchte. Auch in anderen Bereichen spielt die Situationsbewertung eine maßgebliche Rolle. Die Betriebswirtschaftslehre beschäftigt sich beispielsweise u.a. mit der Planung, Produktivität und Organisation innerhalb von Unternehmen. Dabei werden Informationen zu Finanzen, der Konkurrenz, Marketingperformance, etc. erfasst, um darauf basierend Entscheidungen für zukünftige Unternehmens- bzw. Produktausrichtungen zu treffen. Auch in der Medizin ist es erforderlich ein möglichst genaues Bild eines Patienten zu haben, um Diagnosen und auf die jeweilige Person passende Therapie zu erstellen bzw. anzupassen. Im militärischen Kontext spielt die Situationsbewertung eine ebenso wichtige Rolle. Hier ist wichtig die Feindlage, geländespezifische Gegebenheiten, Wetterlage, zur Verfügung stehende Ressourcen und etwaige Randbedingungen zu erschließen, um einen Vorgehensplan zu entwickeln. Dabei ist es meist unerlässlich sich nicht auf

Einzelheiten zu versteifen, sondern viele andere Faktoren mit zu berücksichtigen. Ganz so, wie es in dem Zitat von Musashi zum Ausdruck kommt.

All diesen genannten Problemfeldern ist gemeinsam, dass sie von einer hohen Komplexität, einer stark heterogenen Informationslage und Unsicherheiten geprägt sind und sich in Umgebungen abspielen, die dynamischer Natur sind. Dynamisch heißt in diesem Zusammenhang, dass sich die Informationslage schnell ändern kann. Eine Anpassung an sich ändernden Umgebungen ist eine Herausforderung, die insbesondere in zeitkritischen Situationen hohe kognitive Fähigkeiten abverlangt. Durch den Einsatz von Automation will man deswegen nicht nur die Kosten reduzieren, sondern Menschen bei der Ausübung ihrer Tätigkeiten gewinnbringend unterstützen.

Der technologische Fortschritt, wie im Sektor der mobilen Endgeräte oder der Verbesserung der Rechenleistung, hat dafür gesorgt, dass im Gebiet der Künstlichen Intelligenz (KI) bedeutsame Durchbrüche in der automatisierten Situationsverarbeitung und der Entscheidungsfindung erreicht wurden. Im Bereich des maschinellen Lernens etwa führten Forschungsarbeiten [2], [3] dazu das Brettspiel Go zu lösen, einem Strategiespiel, welches aus dem antiken China stammt. Das Grundprinzip ist relativ einfach erklärt. Zwei Spieler treten gegeneinander an und setzen abwechselnd Steine auf ein Brett mit 19x19 Feldern. Ziel des Spiels ist es, Steine des Gegners einzukreisen, umso mehr Fläche auf dem Spielfeld zu erobern. Der Gewinner ist derjenige, der mehr als die Hälfte des Bretts eingenommen hat. Das Spiel Go gilt trotz des einfachen Prinzips in der KI als eines der herausforderndsten Probleme aufgrund seiner hohen Komplexität. Aufsehen erregte dieser Fortschritt auch deswegen, weil erstmals eine KI einen Großmeister und Weltmeister in diesem Spiel geschlagen hat [4]. Wenige Zeit später wurde bekannt, dass eine KI das Computerspiel StarCraft 2, ein Echtzeitstrategiespiel, welches als eines der komplexesten und erfolgreichsten Strategiespiele der Welt zählt, besser als 99,8% aller menschlichen Spieler ist [5]. Das Spiel gilt als Herausforderung, da der Raum an Möglichkeiten die des Spiels Gos um ein weites überschreitet und zudem die Umgebung nicht vollständig bekannt ist (im Gegensatz zu dem Spiel Go).

Betrachtet man sich diesen Umstand ist es naheliegend diesen Fortschritt sich zu Nutze zu machen, um die KI nicht gegen den Menschen antreten zu lassen, sondern die Stärke der KI mit dem Menschen zu vereinen, mit dem Ziel diesen bei der Ausführung von wichtigen und v.a. zeitkritischen Tätigkeiten zu unterstützen. In den bereits erwähnten Domänen wäre das eine gewinnbringende Bereicherung, die die Arbeit sicherer, effizienter und effektiver gestalten können. Auch im militärischen Kontext kann dadurch ein taktischer Vorteil errungen werden, wodurch sich die Sicherheit und Erfolgsaussichten für eine Missionsdurchführung erhöhen.

1.1 Problemstellung und Zielsetzung

Aufbauend auf Ergebnissen aus Experimenten eines Vorgängerprojekts, welches an dem Institut für Flugsysteme (IFS) der Universität der Bundeswehr München durchgeführt wurde, ergaben sich Einsichten hinsichtlich des taktischen Vorgehens von Probanden in simulierten militärischen Flugmissionen, welche Anreize zur Verbesserung des Systems, mit dem die Probanden interagierten, schafften. Die Aufgabe der Probanden bestand in dem Experiment darin in einem Simulator Hubschraubermissionen zu fliegen und zur Verfügung stehende Ressourcen zu nutzen, um ihren Flugweg abzusichern. Aufgrund hoher Arbeitslastsituationen und zeitkritischen Situationen waren die Probanden nicht immer in der Lage genügend Zeit für die Beurteilung der Situation aufzubringen und entsprechende taktische Vorgehensweisen zu planen und umzusetzen [6].

In der vorliegenden Arbeit soll deswegen ein geeignetes Konzept eines Agentensystems erarbeitet werden, mit dem Ziel einen Nutzer bei der Bewertung einer militärischen Situation und der Ableitung von taktischen Handlungsoptionen zu unterstützen. Dabei ist der zentrale Aspekt dieses Agentensystems die kognitiven Fähigkeiten des Nutzers technisch abzubilden, so dass dieses in ähnlicher Weise wie der Mensch handelt. Die Kernfragen, die dabei konkret beantwortet werden sollen, lauten wie folgt:

- **Wie kann Wissen über eine taktische Situation und daran beteiligte mentale Prozesse zum Verständnis dieser in geeigneter Weise modelliert werden?**
- **Wie können auf Grundlage des Wissens Algorithmen angewendet werden, die menschenähnliche Bewertungen und Handlungsoptionen generieren?**
- **Wie kann ein Nutzer während eines Missionsablaufs bei der Situationsbewertung und der taktischen Analyse im militärischen Kontext kollaborativ durch automatisierte Assistenz unterstützt werden?**

Diese Fragen sollen im Rahmen dieser Arbeit beantwortet werden. Dafür ist zunächst der Begriff des Agenten zu definieren und die Richtlinien darzulegen, wonach sich ein Agentenentwurf orientiert. Die Modellierung, das Verstehen und die Ableitung zukünftiger Entwicklungen einer Situation ist dabei von zentraler Bedeutung. Mit anderen Worten muss das Situationsbewusstsein maschinell modelliert werden. Dafür ist es notwendig, den Begriff des Situationsbewusstseins zu erörtern und wie dieses computertechnisch umgesetzt werden kann. Da das zu entwerfende Agentensystem mit dem Menschen in einem Team zusammenarbeiten soll, müssen Grundsätze beachtet werden, die bei einem solchen Systementwurf wichtig sind. Das Gebiet, welches sich mit dieser Thematik u.a. befasst ist das Human-Agent-Teaming (HAT). In diesem Zuge muss zunächst der Begriff des Agenten definiert werden und welche Implikationen sich aus einem Zusammenwirken zwischen Mensch und Agent ergeben. Ausgehend

von den sich daraus ergebenden Leitlinien wird ein Agentenentwurf erarbeitet, welches in einem konkreten Anwendungsfall implementiert und erprobt wird.

1.2 Aufbau der Arbeit

Die vorliegende Arbeit ist in folgende Kapitel gegliedert:

Zunächst werden in Kapitel 2 theoretische Grundlagen gelegt und ein Überblick über die aktuelle Forschung bezüglich des computergestützten Situationsbewusstseins gegeben, sowie die Mensch-Maschine-Kooperation unter diesem Gesichtspunkt betrachtet.

In Kapitel 3 wird aufbauend auf den Grundlagen die Fragestellung nach den Fähigkeiten und Verhalten eines Agentensystems formuliert und entsprechende Anforderungen daraus abgeleitet. Anschließend wird das Konzept des Agentensystems vorgestellt, welches die beschriebenen Anforderungen erfüllt. Dabei werden die einzelnen Komponenten des Agenten vorgestellt, sowie dessen Rollenbeziehung zum menschlichen Operateur. Die wesentlichen Komponenten dieses Konzepts sind zum einen ein Bedrohungsbewertungsmodul und das Situationsrepräsentationsmodul, welches das relevante Wissen über eine taktische Lage abbildet. Diese Wissensrepräsentation wird schließlich für die Situationsinterpretation und die Erzeugung von Handlungsoptionen genutzt, die auf die jeweilige Dringlichkeit einer Situation hin ausgerichtet sind. Mit Hilfe eines Interventionsmechanismus wird der Nutzer über eingetretene Situationen und Lösungsvorschläge benachrichtigt.

Kapitel 4 beschreibt die Realisierung des vorgestellten Konzepts anhand der Anwendungsdomäne des Manned-Unmanned Teaming (MUM-T) für Transporthubschraubermissionen in einem Forschungssimulator. Dafür werden zunächst die Domäne und der Forschungssimulator vorgestellt und dann die Implementierung des Agentensystems, sowie die Integration in den Forschungssimulator erläutert.

Die experimentelle Evaluierung des Konzepts wird in Kapitel 5 geschildert. Die Evaluierung gliedert sich in drei Unterpunkte. Einleitend wird eine technische Auswertung des Agenten beschrieben, um Parametereinstellungen zu begründen und Grenzen des Systems darzulegen. Anschließend werden Ergebnisse aus zwei durchgeführten Experimentalstudien präsentiert. In einer größer angelegten Experimentalkampagne wurde die Nutzererfahrung und Verwendung des Agentensystems bewertet. In einem gesonderten Experiment wurden bestimmte Aspekte des Agentensystems genauer untersucht. Für beide Experimente werden die Versuchspersonen, der Aufbau und die Durchführung, sowie die Resultate beschrieben.

Schließlich werden in Kapitel 6 die wesentlichen Erkenntnisse zusammengefasst und Ansätze für weiterführende Forschung, sowie Möglichkeiten der Weiterentwicklung am System skizziert.

2 | GRUNDLAGEN

In diesem Kapitel werden die Grundlagen zum Verständnis der mit der automatisierten und kollaborativen Unterstützung zur taktischen Situationsanalyse und Entscheidungsfindung verbundenen Herausforderungen gelegt und der Stand der Forschung beschrieben. Die Grundlagen umfassen zum einen die Begriffsklärung von **Situationsbewusstsein** aus psychologischer und technischer Sicht, deren Vergleich und Zusammenhang, sowie die Grundidee des **Human-Agent Teaming (HAT)**. Weiterhin werden wichtige Aspekte der Entscheidungsfindung in **militärischen Kontexten** erörtert und ein Rahmenüberblick über Agentensysteme in der wissenschaftlichen Literatur gegeben, welche sich mit der technischen Realisierung von Situationsbewusstsein und der Entscheidungsfindung beschäftigen.

2.1 Situation und Situationsbewusstsein (SA)

Der Begriff Situationsbewusstsein (engl.: situation awareness, SA) setzt sich aus zwei Begriffen zusammen, dem der Situation und dem Bewusstsein. Wie in Kap. 1 bereits erwähnt, handelt es sich bei einer Situation um die aktuellen Gegebenheiten einer vorzufindenden Lage. Diese Definition findet sich auch in der wissenschaftlichen Literatur wieder. McCarthy und Hayes führten die Situationsberechnung ein (engl.: situation calculus), ein mathematisches Berechnungsmodell um Situationen in Informationssystemen darzustellen. Sie definieren in [7] in diesem Zusammenhang eine Situation als

[...] the complete state of the universe at an instant of time.

Der Begriff “universe” ist hierbei im mathematischen Sinne zu verstehen und meint die Gesamtheit aller in einem bestimmten Zusammenhang betrachteten Objekte und deren Merkmale. Die Autoren argumentieren, dass aufgrund der im Allgemeinen hohen Komplexität des Universums eine vollständige Beschreibung einer Situation nicht möglich sei. Daher beschränken sie sich bei der Beschreibung von Situationen auf Fakten zu einer gegebenen Situation, die verwendet werden, um darauf weitere Fakten über die aktuelle Situation, über zukünftige Situationen und über Situationen, die Personen aus dieser Situation heraus herbeiführen können, abzuleiten.

Fischer et al. [8] beziehen die Tatsache der Fokussierung auf relevante Merkmale in ihrer Definition zu einer Situation ebenfalls mit ein und erweitern diese um Wissen über den Kontext, in dem sich eine Situation abspielt:

A situation at time t is defined as a world state, which is characterized by the collection of relevant activities up to the time t and their interpretation with respect to the context knowledge.

Gemeinsam ist den Definitionen, dass sie eine Situation als Abbild der Welt/Umgebung zu einem bestimmten Zeitpunkt betrachten und als Zustand beschreiben. Ein wesentlicher Unterschied zu McCarthys und Hayes Definition ist, dass in Fischers Definition nicht der gesamte Zustand eine Situation repräsentiert, sondern der Zustand aus einer Menge an relevanten Aktivitäten besteht. Zusätzlich fordert sie in ihrer Definition die Interpretation dieser Aktivitäten bezogen auf einen Wissenskontext. Die Interpretation einer Aktivität ändert sich entsprechend des gegebenen Kontextes. Als Beispiel gibt sie an, dass zwei Menschen entweder auf einer Straße gegeneinander kämpfen oder im Boxring. Straße und Boxring bilden hierbei den Wissenskontext und beeinflussen damit die Interpretation des Kampfes.

Der Begriff “Bewusstsein” stammt etymologisch betrachtet von dem frühhochdeutschen Wort “bewissen” ab, das so viel wie “genau kennen, wissen” bedeutet und bezeichnet in der Psychologie die “Gesamtheit aller jener psychischen Vorgänge, durch die sich der Mensch der Außenwelt und seiner selbst bewusst wird” [9]. Es gibt allerdings verschiedene Perspektiven und Zugänge zu dem Begriff, wodurch verschiedene psychologische Phänomene beschreiben werden können [10]. Eine dieser Perspektiven ist jene der kognitiven Psychologie. Sie betont die Funktion des Bewusstseins als einen Prozess der menschlichen Informationsverarbeitung. Damit beschreibt der Begriff mentale Verarbeitungsprozesse im menschlichen Gehirn. In der kognitionswissenschaftlichen Literatur wird er verwendet, um unterschiedliche Phänomene und Konzepte zu beschreiben [11].

Wie in Kap. 1 bereits angedeutet, ist eine wesentliche Voraussetzung für das Handeln die Wahrnehmung und Interpretation der relevanten Merkmale einer Situation. Situationsbewusstsein ist ein zentrales Forschungsgebiet der kognitiven Ergonomie (engl.: Human Factors) und hat Einzug in vielen anderen Domänen gefunden. Darunter fallen Katastrophen- und Epidemieüberwachung, der Finanzsektor, die Luft- und Raumfahrt, der medizinische Bereich, Robotik und insbesondere die militärische Domäne, um nur einige Felder zu nennen. Das hat u.a. mit dem wachsenden Fortschritt im Bereich automatisierter Systeme zu tun, die dem Menschen in komplexen Situationen Arbeit abnehmen. Der Mensch bleibt jedoch stets verantwortlich den aktuellen Systemzustand zu verstehen und einzugreifen, falls dies die Situation erfordern sollte [12].

2.1.1 Situationsbewusstsein aus kognitionswissenschaftlicher Sicht

Es gibt keine allgemeingültige Definition von Situationsbewusstsein (engl.: situation awareness, SA) in der wissenschaftlichen Literatur. Das Konzept des SA wurde während des ersten Weltkriegs von dem deutschen Piloten Oswald Boelcke zwar nicht definiert, dennoch identifiziert [13]. In seinem Werk mit dem Titel “Boelckes Dikta” hat er Regeln für den Luftkampf formuliert. Er hatte erkannt, dass es in einer Kampfhandlung von zentraler Bedeutung ist ein Bewusstsein für den militärischen Gegner zu erlangen bevor dieser ein ähnliches Bewusstsein erlangt. Aufbauend darauf entwickelte er Methoden, um dies zu

erreichen. Ein Großteil von Boelckes Erfolg ist auf die von ihm entwickelten Grundprinzipien für die Aufrechterhaltung von SA im Kampf zurückzuführen, die die Grundlage für viele heutigen Kampftaktiken bilden [14].

In der wissenschaftlichen Literatur formuliert [15] zum SA eine Definition, die in Richtung von Boelckes Dikta abzielt und dessen Erkenntnis über die Feindposition mit einbezieht:

*Situation awareness is knowledge of **current** and **near-term disposition** of both friendly and enemy forces within a volume of airspace.*

Aus dieser Definition geht das räumliche Wissen von gegnerischen und alliierten Einheiten hervor. Zudem wird deutlich, dass Projektionen beim Situationsbewusstsein eine wesentliche Rolle spielen. Sie richtet sich allerdings hauptsächlich an militärische Luftszenarien, was durch die Bezeichnungen der verbündeten und gegnerischen Kräfte deutlich wird. In [16] werden mehrere Definitionen zum Begriff des SA analysiert. Eine davon greift diesen Aspekt ebenfalls mit auf und beschreibt SA als eine kontinuierliche Wahrnehmung in einer dynamischen Umgebung. Dabei werden neben dem militärischen Gegner bzw. Bedrohungen auch der Flug an sich und die Mission als Bestandteile aufgegriffen [17]:

*A pilot's **continuous perception** of self and aircraft in relation to the dynamic environment of flight, threats, and mission, and the ability to **forecast**, then execute tasks based on that perception.*

Eine allgemeinere Definition des Begriffs findet sich in [18]. SA wird dort allgemein betrachtet und als kontinuierlicher Prozess verstanden, der die Entscheidungsfindung zu geeigneten Handlungsoptionen mitberücksichtigt:

the combining of new information with existing knowledge in working memory and the development of a composite picture of the situation along with projections of future status and subsequent decisions as to appropriate courses of action to take.

Auf Grundlage der Analyse von 15 SA-Definitionen hat die Arbeit in [16] SA definiert als eine

*continuous extraction of environmental information, and **integration** of this information with **previous knowledge** to form a coherent mental picture, and the use of that picture in directing future perception and anticipating future events.*

Auch hier geht es um einen kontinuierlichen Prozess, in dem im Vordergrund steht, dass Informationen aus der Umgebung in ein bereits existierendes Wissen integriert werden, um ein kohärentes mentales Bild zu erhalten, auf dessen Basis zukünftige Geschehnisse abgeleitet werden. Die Autoren

unterscheiden hierbei den Prozess von SA, welche die Extraktion, Integration und den Gebrauch des mentalen Bilds umfasst, während das Produkt von SA das mentale Bild selbst ist.

Eine der wohl am weitesten verbreitetsten Definitionen von SA ist jene von Endsley [14], die SA definiert als

*the **perception** of the elements in the environment, the **comprehension** of their meaning (understanding), and **projection** (prediction) of their status in order to enable decision superiority.*

Nach dieser Definition hat SA drei wesentliche Bestandteile: die Wahrnehmung (engl.: perception), das Verstehen oder Verständnis (engl.: comprehension) und die Projektion (engl.: projection) einer Situation. Endsley beschreibt diese Bestandteile als Ebenen [19]:

- Level 1 - Wahrnehmung: Umfasst alle Informationen über die Gegenwart, Charakteristiken und Aktivitäten von Elementen in der Umgebung
- Level 2 - Verstehen: Umfasst die Kombination, Interpretation und die Merkfähigkeit der Informationen, um eine Repräsentation der aktuellen Situation über relevante Objekte und Ereignisse zu bilden
- Level 3 - Projektion: Umfasst die Vorhersagen zukünftiger Ereignisse bzw. Entwicklungen einer Situation

Diese drei Ebenen charakterisieren mentale Eigenschaften und beschreiben den Zustand menschlichen Bewusstseins einer Situation. Mit anderen Worten entsteht Situationsbewusstsein durch informationsverarbeitende Prozesse im menschlichen Gehirn. Diese Aufteilung in drei Ebenen hebt zudem deutlich hervor, dass SA weit mehr ist als die reine Wahrnehmung von Informationen. Sie schließt v.a. das Verständnis der Bedeutung dieser Informationen mit ein, sowie die Abschätzung von deren zukünftige Entwicklungen.

Über physiologische Wahrnehmung der Umwelt mit den Sinnesorganen werden Elemente, deren Zustand, Attribute und dynamisches Verhalten innerhalb der Umgebung wahrgenommen (Level 1). Beispiele hierfür sind, welche Einheiten von welchem Typ sich gerade im Einsatzgebiet befinden, wie ihre gegenwärtigen Positionen und Geschwindigkeiten sind, welche Bewegungsrichtung sie haben, deren Gefahrenradius, wo sich taktisch wichtige Punkte (z.B. Brücken, Häuser, ...) befinden, usw.

Die aufgenommenen Informationen werden durch kognitive Fähigkeiten im Gehirn verarbeitet, um diesen Informationen eine Bedeutung in Bezug auf relevante Ziele, die man verfolgt, beizumessen (Level 2). In diesem Prozessschritt werden zeitliche, räumliche und attributive Beziehungen zwischen den

wahrgenommenen Elementen mit bekannten Mustern verglichen. Bei den Mustern handelt es sich um ähnliche Situationen, denen man schon einmal begegnet ist. Endsley nennt diese Muster mentale Modelle [19]. Für einen Kommandanten der militärischen Führung beispielsweise könnte ein Statusbericht über gegnerische Truppenbewegung zu einer bestimmten Position bedeuten, dass der militärische Gegner seine Schlagkraft an dieser Position sammelt, um einen Angriff zu starten. Jeder Information wird ein Grad an Bedeutung zugesprochen, welche einen Einfluss auf die anschließende Projektion und Entscheidungen haben.

Nachdem die Informationen aufgenommen und entsprechend der Level 2 verarbeitet wurden, werden Vorhersagen getroffen, die beschreiben, wie sich Elemente in der Umgebung in Zukunft (wenn auch auf kurze Sicht) entwickeln werden (Level 3). Nach Endsley kann Level 3 nur durch ein gutes Verständnis der aktuellen Situation erreicht werden. Die militärische Führung trifft beispielsweise Vorhersagen, an welchem Ort die gegnerischen Streitkräfte angreifen werden und können die Auswirkungen der eigenen Aktionen abschätzen, basierend auf dem Situationsbild, welche sie sich gebildet haben.

2.1.2 Zusammenhang zwischen SA und Entscheidungsfindung

Der unmittelbare Zusammenhang zwischen SA und der Entscheidungsfindung wird in [20] hervorgehoben. Dort wird SA als die Basis für das Treffen guter Entscheidungen gesehen. Im Gegensatz zu [18] wird hier also SA als unabhängige Komponente der Entscheidungsfindung angesehen. SA stellt vielmehr eine wichtige Grundvoraussetzung für effektive Entscheidungen dar. Die Prozesse des Wahrnehmens, des Verstehens und der Projektion dienen dem Erreichen oder dem Aufrechterhalten eines mentalen Abbilds einer Situation, welches einen starken Einfluss auf die zu treffenden Entscheidungen hat. Dieser Zusammenhang ist in dem Entscheidungszyklus in Abbildung 2-1 dargestellt.

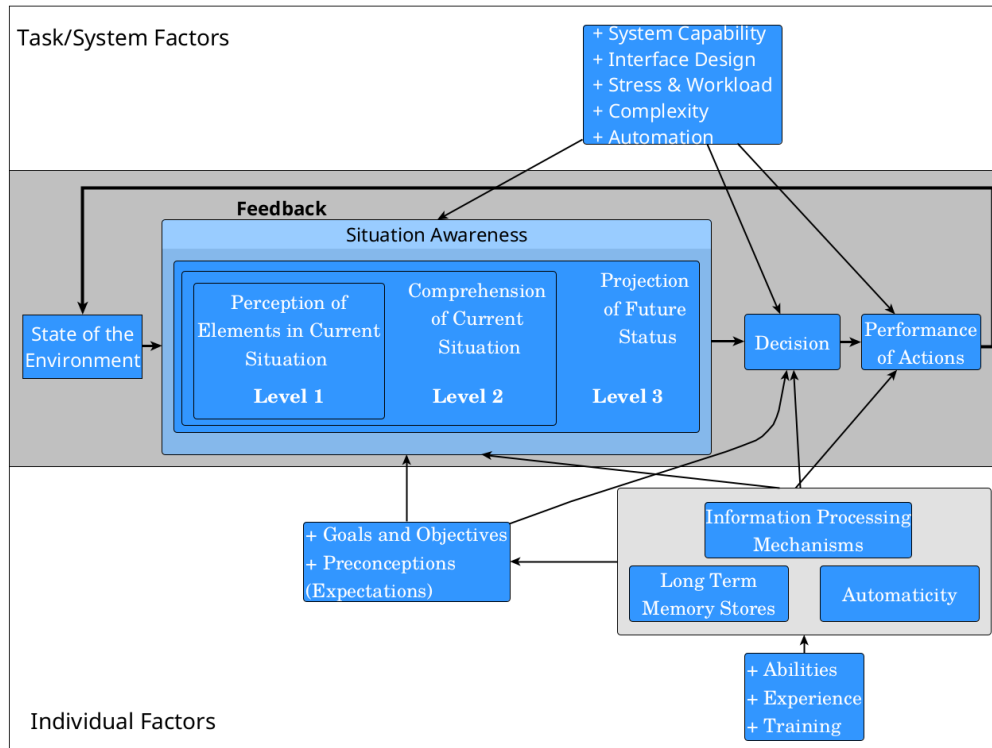


Abbildung 2-1: SA-Modell nach Endsley [21] (modifiziert)

Den auf Basis des SA getroffenen Entscheidungen folgen anschließend Aktionen, die die Umwelt beeinflussen und Ergebnisse hervorrufen. Die Ergebnisse werden in Form eines Feedbacks über den Zustand der Umwelt im nächsten Schritt des Situationsbewusstseins einfließen.

Endsley erörtert zudem, wie auch [16], dass es wichtig ist zwischen dem Begriff des Situationsbewusstseins, welcher einen Wissenszustand der Welt bzw. der Umgebung beschreibt, und dem Prozess, der nötig ist, um zu dem Situationsbewusstsein zu gelangen, zu unterscheiden. Endsley nennt diesen Prozess Situationsbewertung (engl.: situation assessment) [21].

2.1.3 Situationsbewusstsein aus technischer Sicht

Während die Definitionen und Konzepte in Kap. 2.1.1 das Situationsbewusstsein aus einer menschlichen Sicht beleuchten, d.h. mentale Vorgänge beschreiben, beschäftigt man sich in der Daten- und Informationsfusion mit der Thematik, wie die Prozesse mit Hilfe von Automation unterstützt bzw. umgesetzt werden können. Das Ziel ist das Situationsbewusstsein interaktiv zu unterstützen [22]. In der Literatur stößt man bei der Recherche zum Situationsbewusstsein häufig auf Begriffe und Modelle, die dem Forschungsgebiet der Datenfusion entspringen. Diese Modelle enthalten Überschneidungen mit den

Komponenten von Endsleys Modell des Situationsbewusstseins, wobei deren Fokus auf der Datenfusion liegt. Sie liefern eine technologische Sicht auf das Situationsbewusstsein und können als Referenz für die technische Realisierung herangezogen werden. Die Datenfusion ist ein Gebiet, welches hauptsächlich in Multi-Sensor-Systemen angewendet wird. Das Ziel ist, Daten unterschiedlicher Sensoren zu kombinieren und aus den fusionierten Daten Schlussfolgerungen zu ziehen, die aus einem einzelnen Sensor nicht ableitbar wären. Dabei finden sich sowohl Ansätze für einzelne Methoden als auch ganze Softwarearchitekturen und theoretische Modelle. Beispiele hierfür sind Methoden zur Fusion von Sensor-Rohdaten, wie z.B. Bilddaten, mit Objektverfolgung (engl.: target tracking), d.h. der Positionsschätzung von Objekten über die Zeit hinweg, mit der Klassifikation von Objekten, mit Verhaltensanalysen von Objekten, sowie mit Methoden der Entscheidungsunterstützung. Einige der theoretischen Modelle umfassen u.a. das Omnibus-, JDL-Datenfusions-, Dasarathy- und TRIP-Modell. Die Arbeit [22] stellt einen Überblick über diese Modelle bereit.

Das populärste Modell ist das in den 1980er Jahren entwickelte JDL-Modell der Datenfusionsgruppe Joint Directors of Laboratories (JDL) (siehe Abbildung 2-2). Das JDL-Modell modelliert die technischen Aspekte einer Situationsanalyse und gliedert diese in verschiedene Ebenen bzw. Level. Diese Ebenen des JDL-Modells können mit denen des SA-Modells von Endsley verglichen werden und es ergeben sich interessante Parallelen, weswegen das Modell hier näher vorgestellt werden soll.

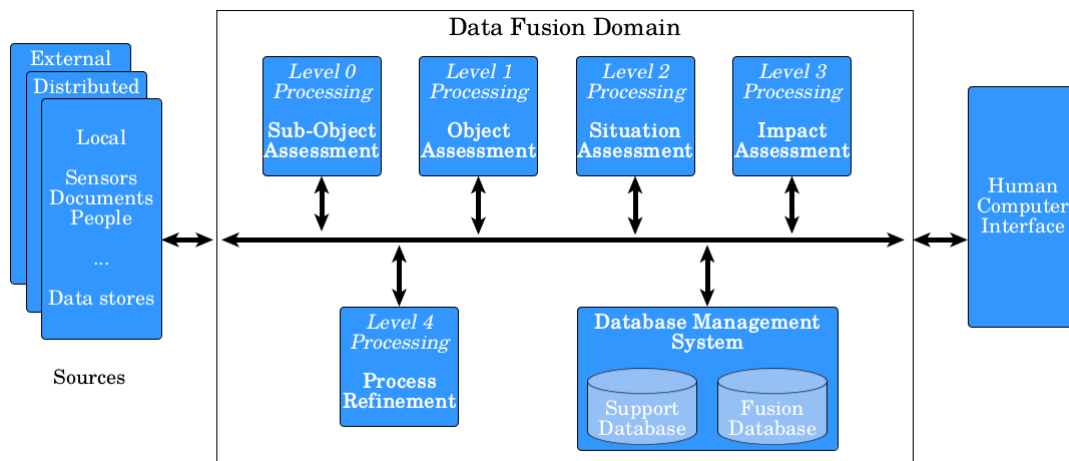


Abbildung 2-2: JDL-Modell

Grundlegend beschreibt das JDL-Modell, wie Daten von verschiedenen Quellen verarbeitet werden, um die benötigten Informationen für die Entscheidungsträger zu erlangen [23]. In dem Modell werden sowohl die Datenquellen (siehe „sources“ in Abbildung 2-2) als auch die Mensch-Maschine-Schnittstelle abgebildet. Datenquellen können extern, lokal oder verteilt sein und können beispielsweise Sensoren,

Dokumente oder Personen sein. Zusätzlich enthält das JDL-Modell ein Datenbank-Management-System. Es beinhaltet nötiges Wissen für den Fusionsprozess und bietet die Möglichkeit Fusionsergebnisse zu speichern [22]. Die Mensch-Maschine-Schnittstelle dient der Visualisierung der Fusionsergebnisse und Eingabe von Befehlen bzw. Systemanfragen. Zwischen diesen beiden genannten Komponenten liegen die einzelnen Prozesse der Datenfusion, die ähnlich wie das SA-Modell von Endsley in verschiedenen Ebenen (Levels) gegliedert sind. Sie werden nach [23] wie folgt interpretiert:

- Level 0 - Signalauswertung: Beinhaltet Vorverarbeitungsschritte von Sensormessungen (Verarbeitung auf Pixel/Signalebene)
- Level 1 - Objektauswertung: Umfasst die Schätzung von Entitätszuständen auf Basis von Inferenzen, die man aus Beobachtungen ableitet
- Level 2 - Situationsbewertung: Umfasst die Schätzung von Entitätszuständen auf Basis von Beziehungen zwischen den einzelnen Entitäten
- Level 3 - Folgenabschätzung: Schätzung von Auswirkungen auf Situationen geplanter Aktionen, die durch Teilnehmer ausgeführt werden
- Level 4 - Prozessanalyse und -verbesserung: Datenerfassung und -verarbeitung im Zusammenhang mit Ressourcenmanagement und Prozessverfeinerung

Level 1, 2 und 3 können als das Pendant zu Endsleys Ebenen der Wahrnehmung, des Verstehens und der Projektion angesehen werden. Nach Steinberg [23] muss man jedoch unterscheiden, dass die Situationsbewertung (engl.: situation assessment) ein Prozess darstellt, während das Bewusstsein (engl.: awareness) ein Produkt bzw. Resultat eines Prozesses ist. Er nennt das Bewusstsein einen mentalen Zustand, der durch den Prozess der Bewertung bzw. der Analyse erreicht wird:

[...]assessment is a process; awareness is a product of a process. Specifically, awareness is a mental state that can be attained by a process of assessment or analysis.

Zudem bezeichnet er das Produkt eines automatisierten Situationsbewertungssystems als informativen Zustand, das kein Bewusstsein einer gegebenen Situation darstellt, sondern eine Repräsentation davon:

In an automated situation assessment system for which we are reluctant to ascribe mental states, the product is an informational state. It is not an awareness of an actual situation, but a representation of one.

Zusammenfassend können also zwei Perspektiven auf das Situationsbewusstsein genommen werden. Die Modelle der Informations- und Datenfusion erklären Situationsbewusstsein aus der technischen Sicht und beschäftigen sich mit der maschinellen Repräsentation, während Endsleys Modell den mentalen Prozess des Menschen im Sinne seiner kognitiven Fähigkeiten beschreibt. Jede Perspektive betrachtet dabei das Phänomen des SA stets bezogen auf ein einzelnes Individuum bzw. Entität. In der Realität ist es jedoch bei vielen Aufgaben üblich, dass mehrere Akteure zusammenarbeiten. Aus diesem Grund ist es sinnvoll sich mit Modellen zu befassen, die den Aspekt des SA unter mehreren Akteuren beleuchten.

2.1.4 Team-SA

Zu dem Gebiet der Team-SA gibt es eine Vielzahl an Definitionen und konzeptuellen Modellen. Eine detaillierte Übersicht zu SA-Definitionen und Team-SA-Modelle wird in der Literatur u.a. in [24] und [25] gegeben. Grundlegend kann man allerdings festhalten, dass Teams mit unerwarteten Ereignissen generell besser umgehen als einzelne Individuen, da u.a. die Arbeitslast unter den einzelnen Teammitgliedern aufgeteilt wird [26]. Arbeiten mehrere Individuen in einem Team zusammen, fassen sie aufgrund ihres individuellen Bewusstseins eine Situation unterschiedlich auf. Jeder dieser Akteure bildet ein individuelles SA der gegebenen Umstände. Teilweise können sich die verschiedenen SAs überlappen, doch Teile können auch nur bei einem Individuum angesiedelt sein (siehe Abbildung 2-3) [21]. Die Wissensstände der einzelnen Akteure sind daher unterschiedlich.

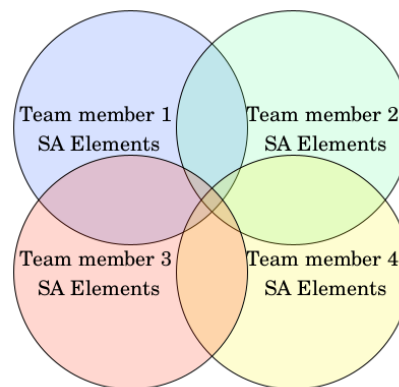


Abbildung 2-3: Team SA-Modell nach [21] (modifiziert)

Um diesen Unterschied auszugleichen und die Teamleistung zu erhöhen, haben die Autoren in [27] die Bedeutung der Kommunikation zum Informationsaustausch zwischen den einzelnen Teammitgliedern dargelegt. Erst durch den Austausch der unterschiedlichen Wissensstände untereinander ist eine effektive Zusammenarbeit überhaupt möglich. Sie argumentieren, dass sowohl individuelle SA als auch

Teamprozesse bei der Bildung von Team-SA beteiligt sind. Mit Teamprozessen sind dabei Arbeitsweisen innerhalb eines Teams und kognitive Prozesse gemeint, die die Teamleistung fördern.

Den Aspekt der Kommunikation greifen auch die Autoren in [28] auf. Sie haben verschiedene Team-SA-Theorien miteinander verglichen und gemeinsame Kernaspekte herausgearbeitet, welche sie in ein Modell integriert haben (siehe Abbildung 2-4).

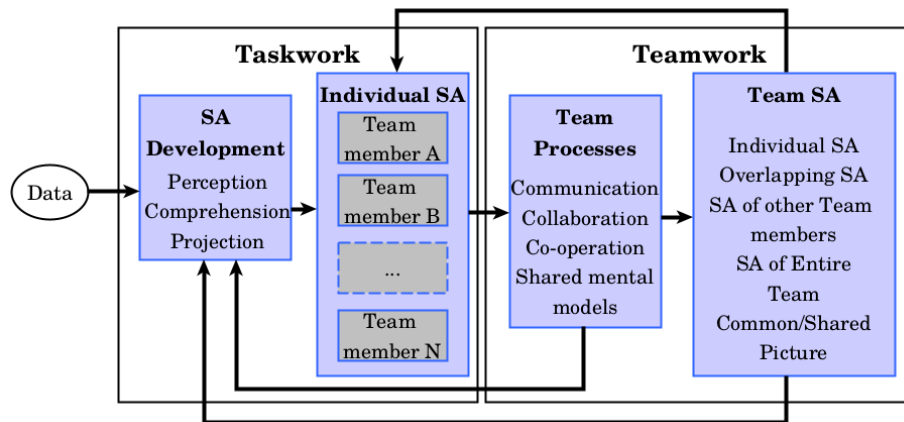


Abbildung 2-4: Team SA-Modell nach [28] (modifiziert)

Das Modell zu Team-SA besitzt folgende Elemente:

- Individuelle SA: Jedes Teammitglied besitzt ein eigenes SA, welches sie sich entsprechend ihrer Rolle im Team und ihren Zielen bilden
- SA von anderen Teammitgliedern: Beinhaltet das Wissen über SA von anderen Teammitgliedern, einschließlich deren Aktivitäten, Rollen und Verantwortlichkeiten im Team
- SA des gesamten Teams: Umfasst Wissen des SA über das gesamte Team hinweg
- Team-Prozesse: Prozesse, die es ermöglichen Informationen und Wissen untereinander auszutauschen

Ein entscheidender Punkt sind die Team-Prozesse und Kommunikationswege, die genutzt werden, um Informationen zwischen den einzelnen Akteuren auszutauschen. Sie beeinflussen die SA der einzelnen Teammitglieder gegenseitig. In dem hier vorgestellten Konzept soll das Team aus einem Agenten und einem Menschen bestehen. Damit in dem Konzept der Mensch in seinem Prozess des Situationsbewusstseins durch computergestützte Analysetechniken effektiv unterstützt werden kann, ist es daher notwendig, diese Aspekte in der Mensch-Maschine-Team-Konstellation zu berücksichtigen.

2.2 Human-Agent Teaming (HAT)

Die Zusammensetzung eines Teams bestehend aus dem Menschen und einer Maschine ist ein eigenes Forschungsfeld, welches die Art der Zusammenarbeit zwischen Menschen und Maschinen untersucht und die beteiligten Akteure als Teammitglieder versteht. Die Autoren in [29] geben eine Übersicht über diesen Forschungsbereich und dokumentieren einen relativ aktuellen Stand zu den Erkenntnissen, die in diesem Forschungsbereich erlangt wurden. Dabei gehen sie auch auf die verwendeten Begrifflichkeiten in der wissenschaftlichen Literatur ein und grenzen diese voneinander ab. Verwendete Begriffe zur Beschreibung von Teams, in denen Menschen mit Maschinen zusammenarbeiten, umfassen u.a. *human-autonomy teaming*, *human-automation teaming*, *human-agent teaming* und/oder *human-machine interaction*. Einige wissenschaftliche Arbeiten verwenden den Begriff *synthetic agent* zur Beschreibung des Agenten, der mit dem Menschen zusammenarbeitet.

2.2.1 Kernpunkte des HAT

Es gibt zwar keine allgemeingültige Definition von Mensch-Maschine-Teams (engl.: Human-Agent-Teaming, HAT bzw. Human-Machine-Teaming, HMT), doch lassen sich aus der Literatur Aspekte finden, die Kernpunkte darstellen. Der grundlegende Gedanke hinter HAT ist im Gegensatz zu homogenen Teams, die nur aus Menschen bzw. nur aus Maschinen bestehen, die Ermöglichung einer erhöhten Leistung, die v.a. in Situationen, die mit einer hohen Unsicherheit versehen sind, zu Tage tritt [30]. Dabei steht eine Kollaboration zwischen Mensch und Maschine im Vordergrund, die ein gemeinsames Ziel verfolgen [31]. Einen wichtigen Bestandteil bildet dabei eine bidirektionale Kommunikation bzw. Interaktion zwischen Mensch und Maschine, um eine gemeinsame Wissensbasis aufzubauen und ein gemeinsames Verständnis der zu erreichenden Ziele und der damit verbundenen Aufgaben [32]. Das Verständnis von Zielen und Aufgaben wird als *Mentales Modell* (engl.: mental model) [21] bezeichnet. Speziell für den Computer erstellte Abbildungen mentaler Modelle werden als *Computermodele* (engl.: computer models) bezeichnet [33] und beide Typen als *kognitive Modelle* [34]. Bevor auf die Aspekte der Zusammenarbeit zwischen Mensch und Maschine eingegangen wird soll zunächst der Begriff des **Agenten** erläutert werden.

2.2.2 Agent

Das Wort Agent ist ein weitreichender Begriff, der unterschiedlich definiert wird und bei dem es keinen eindeutigen Konsens in der wissenschaftlichen Literatur gibt [35]. So werden in [36] und [37] verschiedene Definitionen eines Agenten aufgeführt und miteinander verglichen. Häufig finden sich in Definition auch zusätzliche Begrifflichkeiten, die dem Term Agent vorangestellt werden, z.B. *intelligent agent* oder *autonomous agent*. Da auch Menschen und Roboter in manchen Arbeiten als Agenten aufgefasst

werden (z.B. in [38] oder [36]) wird auch von *autonomous robotic agents* oder *software agents* gesprochen, um sich klar abzugrenzen.

Im Bereich der KI wird häufig die in [39] gegebene Definition eines Agenten zitiert:

An agent is anything that can be viewed as perceiving its environment through sensors and acting upon that environment through actuators.

Ein schematischer Aufbau eines Agentensystems nach [39] ist in Abbildung 2-5 zu sehen.

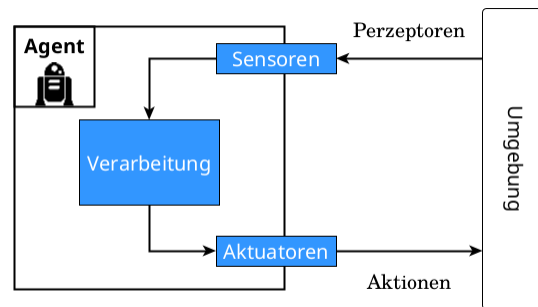


Abbildung 2-5: Schematische Darstellung eines Agentensystems nach [39] (modifiziert)

Dieses Abbild zeigt die grundlegenden Bausteine eines Agentensystems. Es besteht aus mindestens einem Agenten, der mit seiner Umgebung interagiert. Dabei nimmt ein Agent die Umwelt über seine Sensoren wahr und führt Aktionen aus. Die Wahrnehmungen bilden dabei die Eingaben des Agenten. Die Wahl der Aktion(en), die ein Agent über zur Verfügung stehenden Aktuatoren ausführt, wird/werden über die Agentenfunktion ermittelt, die die Eingaben verarbeitet (Verarbeitungsblock in Abbildung 2-5). Die Definition ist prägnant und definiert den Agenten auf eine abstrakte Weise, so dass sowohl Software, Robotersysteme als auch Menschen mit deren Sinnesorganen als Sensoren und Extremitäten als Aktuatoren Agenten sein können. Im Rahmen dieser Arbeit beziehen wir uns allerdings mit dem Begriff auf Software, wenn nichts Anderes angedeutet wird.

Bei dem Entwurf eines Agenten orientiert man sich nicht nur an den Aufgaben, die dieser erfüllen soll, sondern v.a. an der Umgebung, aus welcher der Agent Informationen zieht, verarbeitet und mit dieser interagiert. Denn schließlich beschreibt die Umgebung das Problemfeld, für das Lösungen gesucht werden sollen. Um die Umgebungen zu kategorisieren legt [39] folgende Dimensionen fest:

- **vollständig beobachtbar** vs. **teilweise beobachtbar**: Wenn der Agent in der Lage ist mit seinen Sensoren den vollständigen Zustand mit allen relevanten Informationen zu jedem Zeitpunkt zu

erfassen, so bezeichnet man die Umgebung als vollständig beobachtbar, andernfalls als teilweise beobachtbar

- **Einzelagent vs. Multi-Agent:** Eine Umgebung, in der nur ein einziger Agent arbeitet, bezeichnet man als Einzelagentenumgebung. Sobald in einer Umgebung mehr als ein Agent involviert sind, spricht man von einer Multi-Agentenumgebung.
- **deterministisch vs. stochastisch:** Ist der nächste Zustand, der die Umgebung beschreibt, eindeutig bestimmbar in einem gegenwärtigen Zustand, in dem eine Aktion ausgeführt wird, um von diesem Zustand zu dem nächsten zu gelangen, so ist die Umgebung deterministisch. Eine stochastische Umgebung ist geprägt von Unsicherheiten und der nächste Zustand kann nicht eindeutig bestimmt werden.
- **episodisch vs. sequentiell:** Eine Umgebung, in der die Zustände voneinander unabhängig sind und die in einem Zustand ausgeführte Aktion nichts mit dem Folgezustand zu tun hat, bezeichnet man als episodisch. Im Gegensatz dazu ist bei einer sequentiellen Umgebung der nächste Zustand abhängig von der Aktion, die man im gegenwärtigen Zustand ausführt. Die Aktion des Agenten hat also direkte Auswirkungen auf zukünftige Zustände.
- **statisch vs. dynamisch:** Wenn sich die Umgebung, in der der Agent agiert, nicht ändert, spricht man von einer statischen Umgebung. Wenn die Umgebung sich jedoch über die Zeit hinweg ändert, ist sie dynamisch.
- **diskret vs. kontinuierlich:** Die Unterscheidung zwischen einer diskreten und kontinuierlich geprägten Umgebung kann sich auf den Zustandsraum der Umgebung, der Betrachtung der Zeit, sowie der ausführbaren Aktionen und Wahrnehmung des Agenten beziehen. Sofern diese abzählbar sind, handelt es sich um eine diskrete Umgebung, andernfalls ist sie kontinuierlich.
- **bekannt vs. unbekannt:** In einer bekannten Umgebung ist der Ausgang einer Aktion gegeben. Mit anderen Worten kann der Ausgang durch Angabe einer Wahrscheinlichkeit angegeben werden. Wenn der Ausgang einer Aktion nicht auf diese Weise angegeben werden kann, handelt es sich um eine unbekannte Umgebung und der Agent muss mit der Umgebung interagieren, um Wissen über das Verhalten der Umgebung zu erlangen.

Anhand der Charakterisierung einer Umgebung lassen sich geeignete Agentenentwürfe als Rahmenwerk bestimmen. Auf diese Weise kann die Agentenarchitektur zu der Umgebung passend gewählt werden und gibt Hinweise auf die zu verwendenden Methoden. Neben den Dimensionen der Umgebung ist die Zusammenarbeit mit anderen Agenten und/oder Menschen ebenfalls ein Einflussfaktor, der das Design

des Agentensystems beeinflusst. Da der Agent mit dem Menschen kollaborieren soll, sind Faktoren, die die Zusammenarbeit zwischen Mensch und Maschine betreffen, von entscheidender Bedeutung.

2.2.3 Zusammenarbeit zwischen Mensch und Maschine

Um in einer Situation zusammen arbeiten zu können ist es erforderlich, dass sowohl Mensch als auch Maschine sich über das Situationsbewusstsein und Entscheidungsfindung austauschen können. In dieser Arbeit werden deswegen zuerst grundlegende Konzepte erörtert, die bei der Mensch-Maschine-Kollaboration eine wichtige Rolle spielen, um ein gemeinsames Situationsbewusstsein zu entwickeln. Nach [34] zählen zu den wesentlichen Eigenschaften eines Agenten, der ein Bewusstsein über seine Umgebung erhalten soll:

- **Wachsamkeit:** Der Agent sollte aktiv nach Informationen Ausschau halten, die für die Ziele relevant sind
- **Schlussfolgerung ziehen:** Aus den Beobachtungen heraus muss der Agent Schlussfolgerungen ziehen können
- **SA aufbauen:** Der Agent sollte die relevanten Daten der Umgebung wahrnehmen können (Level 1 SA), deren Zusammenhänge und Bedeutung verstehen können (Level 2 SA), sowie die Fähigkeit besitzen zukünftige Entwicklungen einschätzen zu können (Level 3 SA), um letztlich damit proaktiv Entscheidungen treffen zu können

Ausgehend von der Art und Weise, wie der Mensch mit seinem mentalen Modell über die Welt eine SA aufbaut, muss ein Computermodell, welches Selbige versucht zu erreichen, nach [34] spezifische Merkmale aufweisen. Dazu gehört erstens ein Modell, das definiert, welche Informationen aus der Umgebung bzw. dem System relevant sind, diese dynamisch priorisieren kann und Mechanismen für die Integration von Daten bereitstellt, um diesen Bedeutungen zuzuschreiben. Weiterhin müssen diese Modelle ein Verständnis von relevanten Zielen vermitteln, da sie nicht zuletzt die Relevanz von Informationen ermöglichen und die Bedeutungen für diese Informationen festlegen. Da es mehrere, manchmal konkurrierende Ziele geben kann, muss das Computermodell schließlich einen Mechanismus für die Priorisierung von Zielen enthalten,

Schließlich muss das Computermodell einen Mechanismus für die Priorisierung von Zielen enthalten, da es manchmal mehrere und konkurrierende Ziele geben kann. Dieser Mechanismus muss mit Wissen ausgestattet sein, mit dem bestimmt werden kann, Dafür notwendig ist die Modellierung eines mentalen Modells in Form eines Computer Modells, das dem Agenten zugrunde liegt.

2.2.4 SA aus Sicht der Mensch-Maschine Kooperation

Niklasson et. al. [40] haben ein Konzeptmodell entwickelt, das die beiden Sichten auf SA, der psychologischen und technischen Sichtweise, in einem Modell vereint. Es ist für Systeme gedacht, in denen Mensch und Maschine interaktiv zusammenarbeiten. Die Autoren erörtern dabei, dass für die meisten komplexen Aufgaben eine reine Automatisierungslösung zum Situationsbewusstsein mit dem heutigen Stand der Technik nicht möglich ist. Sie betonen deshalb, dass das Zusammenwirken zwischen Mensch und Maschine unerlässlich ist, möchte man die Stärken technologischer Systeme nutzen. In ihrem Situationsbewusstseinsmodell stützen sie sich auf das JDL-Modell der Datenfusion und Endsleys Modell. Die sogenannte *Unified SA* ist – analog zu dem JDL- bzw. Endsley-Modell – in Ebenen gegliedert, wobei theoretisch die einzelnen Ebenen entweder manuell, d.h. vom Menschen ausgeführt, oder (teil-)automatisiert, d.h. mit Hilfe der Maschine ausgeführt, ablaufen. Auf jeder Ebene ist eine Interaktion zwischen Mensch und Maschine möglich. Eine schematische Darstellung dieses Modells ist in Abbildung 2-6 zu sehen.

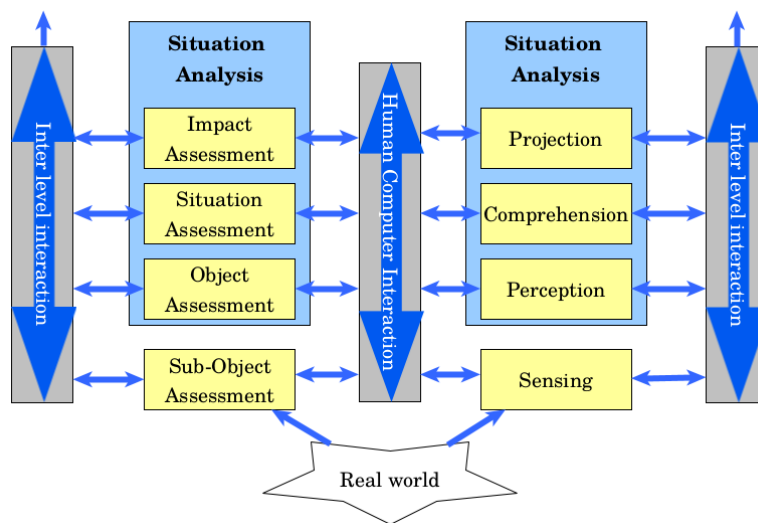


Abbildung 2-6: Unified SA-Modell [40] (modifiziert)

Auf der rechten Seite der Abbildung ist das SA-Modell des Menschen (Endsleys-Modell), auf der linken Seite das Maschinen-Modell (welches an dem JDL-Modell angelehnt ist). Die Interaktionsschicht in der Mitte (Human Computer Interaction) ermöglicht den Austausch zwischen Situationsbewusstsein auf allen Ebenen der beiden Prozesse. Für diesen Austausch sind Informationsmodelle notwendig, die nach Niklasson jeweils ein eigenes Forschungsfeld aufspannen. Die Kombination der beiden Perspektiven (technologische und psychologische Sicht) auf SA in einem Modell ermöglicht es laut den Autoren die

technologische Entscheidungsunterstützung auf den verschiedenen Abstraktionsebenen des menschlichen Bewusstseins zu erklären und wie die Entscheidungsfindung unterstützt werden kann.

Als Beispiel zur Illustration, wie das Modell angewendet werden kann, dient ein Radarsystem, welches ein Gebiet überwacht. Dieses Radarsystem erkennt ein Signal (Signalauswertung). Das System identifiziert dieses Signal als ein Flugzeug (Objektauswertung) und teilt das Ergebnis dem Bediener über geeignete HCI-Funktionen mit. Der Bediener nimmt dieses Flugzeug wahr (Wahrnehmung) und schließt mit Hilfe seines Wissens daraus, dass es sich bei dem Flugzeug um einen militärischen Gegner handelt (Lagebeurteilung bzw. Verständnisaufbau). Anhand der Flugbahn des Flugzeugs geht das System davon aus, dass es auf ein Kernkraftwerk zufliegt (Folgeabschätzung), was es dem Bediener ebenfalls mitteilt. Dieser erreicht mit Hilfe des Systems ein gewisses Maß an SA und trifft die Entscheidung Alarm zu schlagen.

Die Autoren geben auch ein erweitertes Modell an, für den Fall, dass mehrere Teilnehmer (Mensch und/oder Maschinen) gemeinsam operieren. Dieses erweiterte Modell umfasst die Interaktionen sowohl zwischen den Maschinen (CCI), den Menschen (HHI) als auch zwischen Menschen und Maschinen (HCI). Eine Darstellung dieser Erweiterung ist in Abbildung 2-7 abgebildet.

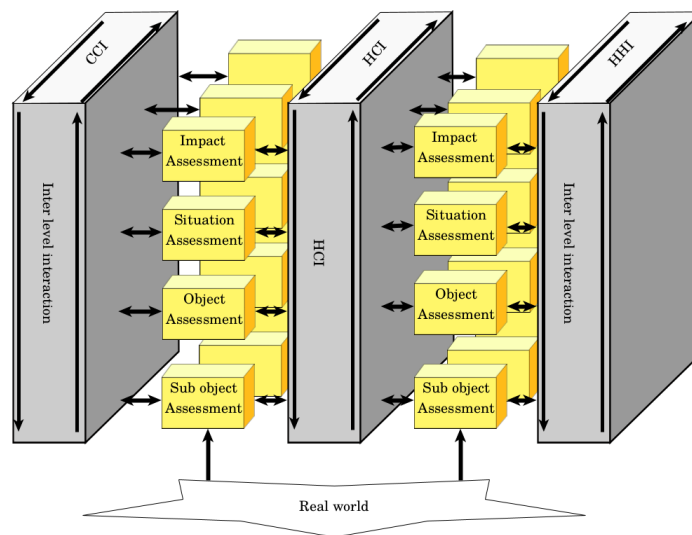


Abbildung 2-7: Extended Unified SA-Modell [40] (modifiziert)

Ausgehend davon, wie ein Mensch ein Situationsbewusstsein in komplexen dynamischen Umgebungen entwickelt [21], muss nach [34] ein Computermodell, das ebenso dieses Ziel erreichen soll, drei wesentliche Merkmale aufweisen. Die Basis bildet ein geeignetes Modell, das das System für die Abbildung, Priorisierung und Integration relevanter Informationen aus der Umgebung nutzt und diese in Relationen setzt, um eine Bedeutung zu schaffen. Weiterhin muss ein solches Modell ein Verständnis von

relevanten Zielen vermitteln, da diese vorgeben, welche Entscheidungen getroffen werden müssen, um einen gewissen Zielzustand zu erreichen. Sie geben damit einen Rahmen für die Schaffung von Bedeutung vor und legen fest, welche Informationen zu beachten sind. Schließlich benötigt das Computermodell einen Mechanismus zur Priorisierung von Zielen für den Fall, dass es mehrere konkurrierende Ziele gibt.

2.2.5 Austausch von Informationen

Ein wichtiger Bestandteil bei der Kooperation zwischen Mensch und Maschine ist der Austausch von Informationen. Millot und Pacaux-Lemoine führen in diesem Zusammenhang auf Basis der Arbeit von [28] in [41] das Konzept des *Common Work Space* (CWS) ein. Es beschreibt ein Medium, das den Informationsaustausch und damit die Kooperation zwischen Agenten und Menschen ermöglichen soll (siehe Abbildung 2-8). Angemerkt sei hier, dass in dem Konzept mit dem Begriff Agent sowohl Maschine als auch Mensch gemeint ist.

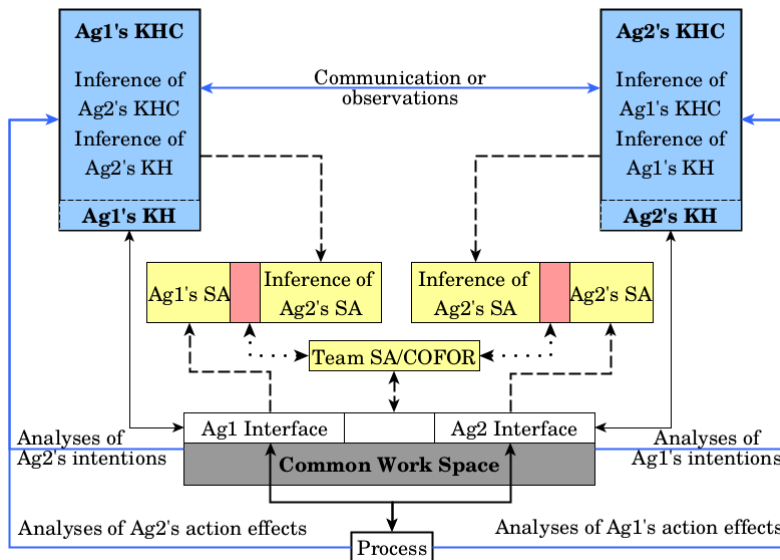
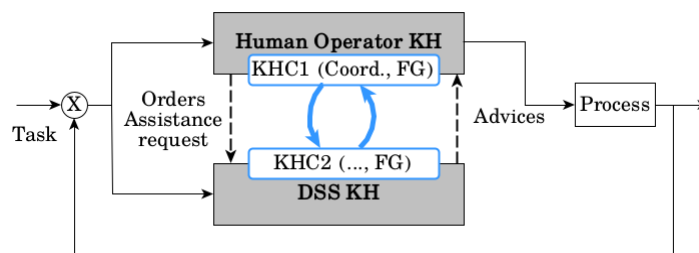


Abbildung 2-8: CWS-Konzept nach [41] (modifiziert)

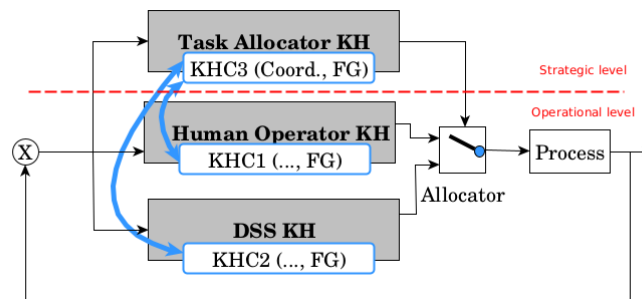
Die SA der beteiligten Akteure bildet sich nach dem Konzept aus der individuellen SA des jeweiligen Akteurs, dem Team-SA (rot markierte Felder) und den Schlussfolgerungen, die die Akteure über die SA des jeweiligen anderen Akteurs ziehen. Über für die Akteure zugänglichen Schnittstellen können sie über das CWS die Team-SA aufbauen und ihre eigene SA aktualisieren. Die CWS dient als Koordinationsschnittstelle, um sich bzgl. des gemeinsamen Prozesses, an dem sie arbeiten, abzustimmen.

Die Aktionen und Absichten, die die Beteiligten treffen bzw. verfolgen, werden jeweils von dem Anderen interpretiert, was wiederum einen Einfluss auf die Art des Kommunikationsaustauschs über die Schnittstellen hat. Ein zentraler Punkt bei diesem Konzept ist die Dimension des Wissens darüber, wie man kooperiert (knowing how to cooperate). Mit anderen Worten benötigen die beteiligten Akteure Wissen darüber, wie sie unter Verwendung des CWS, miteinander kooperieren müssen.

Damit verbunden ist ebenso die grundlegende Struktur, die die Zusammenarbeit zwischen Mensch und Maschine beschreibt. In [42] werden zwei generische Kooperationsmodelle präsentiert, eine vertikale und horizontale Struktur (siehe Abbildung 2-9).



a Vertikale Struktur der Mensch-Maschine-Kooperation



b Horizontale Struktur der Mensch-Maschine-Kooperation

Abbildung 2-9: Generische Kooperationsmodelle für Agenten-Kooperation nach [42] (modifiziert)

In der vertikalen Struktur bietet die Maschine eine Unterstützungsleistung für die Situationsanalyse und bietet dem Nutzer Lösungsvorschläge an, aus denen dieser eine wählen kann und selbst umsetzt. In der horizontalen Struktur dagegen können sowohl Mensch als auch Maschine Problemanalyse und -lösungen selbst tätigen bzw. umsetzen. Die Wahl der Struktur hängt von den Fähigkeiten des Agenten ab und der Art der gewünschten Kooperationsstrategie. Ähnliche Ansätze finden sich auch in [43]. Hier wird zwischen der

impliziten und expliziten Kooperation unterschieden. In der expliziten Kooperation schlägt das System seinen Lösungsvorschlag vor und der Mensch hat daraufhin die Wahl zwischen diesem und seinen eigenen. In der impliziten Kooperation setzt die Maschine seinen Vorschlag direkt um. Dieses Konzept der impliziten/expliziten Kooperation wurde von [44] mit der sog. assistierten expliziten Kooperation erweitert, welche zwischen der impliziten und expliziten Kooperation angesiedelt ist. Die Maschine bietet in diesem Modus an ihren Lösungsvorschlag direkt umzusetzen und ein menschlicher Entscheidungsträger auf strategischer Ebene entscheidet darüber, ob dieser tatsächlich umgesetzt werden soll oder der Mensch, welcher auf Operationsebene an derselben Problemstellung arbeitet diese umsetzen soll. Dieser Entscheidungsträger könnte allerdings auch maschinell funktionieren, in dem die Auslastung des Menschen und die Wichtigkeit einer Aufgabe beurteilt wird und anhand dessen die Verantwortung der Problemlösung entsprechend vergeben wird.

Bei der Zusammenarbeit zwischen Mensch und Maschine ergeben sich dabei wichtige Grundsätze, die bei der Umsetzung einer solchen Kooperation zu beachten sind. Auch birgt die Arbeit mit automatisierten Systemen Risiken bzw. sie kann Effekte hervorrufen, die einen negativen Einfluss auf die Arbeitsleistung haben und man deshalb unterbinden möchte. Ist der Automatisierungsgrad z.B. zu hoch, kann dies zu Bequemlichkeitseffekten führen, die den Verlust der eigenen Fähigkeiten nach sich ziehen kann oder den Menschen aus einer Situation herausnimmt [45]. Andererseits kann ein zu niedriger Automatisierungsgrad dazu führen, dass die Automation regelmäßig überwacht werden muss und damit nur begrenzt gewinnbringende Unterstützungsleistung bietet [46].

2.2.6 Effekte in HAT

Einige dieser Effekte, welche zurückzuführen sind auf die Fähigkeiten der KI und/oder der Interaktion zwischen Mensch und Maschinen, sollen zunächst näher beschrieben werden, bevor im Anschluss die zentralen Kernaspekte für ein HAT-System vorgestellt werden.

Brittleness

Zu einem der zentralen Begriffe im HAT gehört der Begriff *Brittleness* (dt.: Brüchigkeit oder Sprödigkeit). Brittleness beschreibt ein Problem, welches auftreten kann, wenn die Automation nicht für den vorgegebenen Zweck eingesetzt wird bzw. eine Situation auftritt, für die diese nicht konzipiert wurde. Agentensysteme, die dem Effekt der Brittleness ausgesetzt sind, haben nur eine begrenzte Effektivität [47,48].

Automation Bias

Typischerweise werden Automatisierte Entscheidungsunterstützungssysteme verwendet, um die Effektivität und Effizienz bei Entscheidungsproblemen zu steigern und um mögliche Fehler zu reduzieren. Bei der Verwendung von Automation kann es jedoch zu einer Voreingenommenheit bzgl. der Automation (engl.: automation bias) kommen. Damit ist gemeint, dass Nutzer aufgrund eines starken Vertrauens gegenüber dem System die Neigung entwickeln Vorschläge von automatisierten Entscheidungsfindungssystemen zu bevorzugen und sich durch dessen Bereitstellung von Hinweisen/Benachrichtigungen beeinflussen lässt. Widersprüchliche Informationen, zu die man ohne die Automatisierung gelangt ist, werden ignoriert, selbst wenn diese korrekt sind [49]. Die Folge davon ist, dass Entscheidungshilfen häufig eingesetzt werden, ohne die Hilfeunterstützung zu hinterfragen, was letztlich zu Fehlern im Entscheidungsprozess führen kann.

Complacency

Der Begriff der *complacency* (dt.: Bequemlichkeit) bei der Nutzung von Automation entspringt ursprünglich aus dem Bereich der Luftfahrt, in dem ein Phänomen beschrieben wurde, bei dem es aufgrund mangelnder Systemüberwachung seitens des Personals zu Unfällen kam [50]. Kennzeichnend für dieses Phänomen ist, dass ein menschlicher Operateur ein System überwacht und u.a. aufgrund eines überhöhten Vertrauens die Häufigkeit der Überwachung nicht dem Standard bzw. dem nötigen optimalen Wert entspricht. Die Folge einer unzureichenden Überwachung ist schließlich, dass Fehlverhalten des Systems unentdeckt bleiben und Leistungseinbußen entstehen.

Mangelnde SA und Out-of-the-loop

Bei Operateuren, die mit Automation arbeiten, kann es zum sog. Out-of-the-loop-Effekt kommen. Dieser Effekt beschreibt, dass der Mensch aus der aktuellen Situation “herausgeworfen” wird und einen Leistungsabfall erleidet. Der Operateur benötigt dann mehr Zeit, um ein Problem mit dem System zu identifizieren und das aufgetretene Problem zu verstehen und zu lösen. Dieser Effekt ist das Resultat einer geringen SA [45] verursacht durch Vigilanz- und Selbstzufriedenheitsproblemen (engl.: complacency problems), was dazu führen kann, dass Bediener nicht mehr in der Lage sind im Falle eines Versagens des Systems manuell einzugreifen. Besonders hochautomatisierte Systeme degradieren die Rolle des Bedieners auf eine reine Überwachungsfunktion, was die Chancen erhöht, dass dieser Effekt eintritt.

2.2.7 Designgrundsätze von HAT-Systemen

In der Literatur gibt es verschiedene Ansätze, die wichtige Grundsätze bei der Umsetzung von HAT-Systemen herausarbeiten.

Shiveley et al. haben in [51] ein konzeptionelles HAT-Modell entworfen, welches drei Hauptgrundsätze beinhaltet: *Bidirektionale Kommunikation*, *Transparenz* und *an den Operateur ausgerichtete Schnittstelle*.

Die **Bidirektionale Kommunikation** dient dem Austausch von Informationen und möglichen Handlungsoptionen zwischen Teammitgliedern und sorgt dafür dem Effekt der Brittleness entgegenzuwirken.

Transparenz ist notwendig, damit der Operateur die Absichten und Folgerungen des automatisierten Agentensystems nachvollziehen kann. Dabei reicht es nach Shiveley nicht einfach aus, die dafür notwendigen Informationen dem Operateur aufzuzeigen, sondern diese in eine Art zu präsentieren, dass sie zu dem mentalen Modell des Operateurs passen.

Eine **an dem Operateur ausgerichtete Schnittstelle** meint, dass dieser jederzeit die Möglichkeit hat in die Automation einzugreifen und Entscheidungen des Systems zu beeinflussen, falls dies notwendig sein sollte. Mit anderen Worten soll die Aufgabenallokation nicht statisch erfolgen, sondern auf eine entsprechend der gegebenen Umstände (z.B. Arbeitsauslastung, Zeitdruck, ...) durch den Operateur ausgerichtete dynamische Art und Weise. Dadurch erreicht man mehr Agilität, Flexibilität und hält den Operateur auf dem Laufenden bzw. hält diesen in-the-loop.

Lyons und Wynne stellen in [31] sechs Aspekte heraus, die für der Wahrnehmung der Teamfähigkeit eines Agenten Schlüsselfaktoren darstellen. Zu ihnen gehören die *Handlungsfähigkeit*, *Wohllwollen*, *Kommunikationsreichtum*, *Interdependenz*, *Synchronität* und *Teamorientierung*.

Handlungsfähigkeit des Agenten meint die Fähigkeit und Autorität zu besitzen selbstständig einem Teammitglied Unterstützung zu bieten. Als Beispiel wird die Fähigkeit neue Handlungsoptionen vorzuschlagen genannt.

Wohllwollen steht dafür, dass der Mensch eine positive Wahrnehmung von der Absicht des Agenten hat. Dieser Aspekt stellt einen Kernaspekt für das Vertrauen des Menschen gegenüber den Agenten dar. Um eine positive Wahrnehmung der Absicht des Agenten zu fördern stellt die Kommunikation seitens des Agenten ein Schlüsselfaktor dar.

Kommunikation ist der dritte Aspekt und ist eine wichtige Teamfunktion, da darüber Informationsaustausch betrieben wird. Die damit verbundene Kooperation und Koordination sind zentrale Elemente, um sich untereinander abzustimmen und Arbeitsteilung vorzunehmen. Dabei gilt, dass ein Agent eher als Teammitglied angesehen wird, wenn die Kommunikation mit dem Menschen natürlicher und (informations-)reicher ist.

Interdependenz beinhaltet die gegenseitige Abhängigkeit zwischen den Aufgaben des Menschen und Agenten. Die Interdependenz zwischen Teammitgliedern bedeutet, dass jedes Mitglied einen gemeinsamen Anteil an einer Situation und Verantwortlichkeiten und somit gemeinsame Motivation bzw. Ziele hat. Demnach führt ein Agentendesign, welches Interdependenz berücksichtigt, dazu, dass der Mensch in Situationen mit eingebunden wird.

Synchronität bezieht sich darauf, dass Teammitglieder gemeinsame Ansichten über den Zustand der Umgebung, die zeitliche Abfolge notwendiger Teamaktionen und das Auftreten von Teamergebnissen haben. Eine erhöhte Synchronität erleichtert demnach die Anpassung an sich ändernde Umweltbedingungen und hilft den Teammitgliedern situationsbedingte Hinweise auf die gleiche Weise zu interpretieren.

Teamorientierung bezieht sich auf die Wahrnehmung, dass der Agent beziehungsorientiert ist. Die Teamarbeit zwischen Mensch und Maschine soll sich nicht auf die bloße Aufgabenarbeit beschränken, sondern sozialorientierte Aktivitäten und Verhaltensweisen miteinschließen. Damit soll ein Gefühl des Zusammenhalts des Teams und damit die Effektivität der Zusammenarbeit gefördert werden.

Dazu braucht der Operateur Wissen darüber, wie die internen Abläufe des Agenten funktionieren. Allerdings ist die andere Richtung ebenfalls wichtig. Der Agent muss in der Lage sein die gegenwärtigen Präferenzen, Vorstellungen und Zustände des menschlichen Operateurs zu verstehen. Letztlich sollte die Kommunikation so ausgelegt sein, dass die verwendeten Begrifflichkeiten mit denen des Operateurs übereinstimmen.

Die Autoren in [52] haben die wissenschaftliche Literatur analysiert und Aspekte herausgearbeitet, die das Design einer Mensch-Maschine-Interaktion betreffen. Dabei werden zehn Aspekte beschrieben, die sich auf die Mensch-Maschine-Schnittstelle beziehen und die Zusammenarbeit betreffen: *Beobachtbarkeit*, *Vorhersagbarkeit*, *Lenkung der Aufmerksamkeit*, *Erkundung des Lösungsraums*, *Lenkbarkeit*, *Anpassungsfähigkeit*, *eine gemeinsame Grundlage* (engl.: common ground), *kalibriertes Vertrauen*, *Designprozess* und *Informationsrepräsentation*.

Die Schaffung einer **gemeinsamen Grundlage** bedeutet, dass die Teammitglieder Annahmen und Absichten untereinander teilen und diese ständig aktiv aktualisieren und aufrechterhalten wird.

Mit **Beobachtbarkeit** meinen die Autoren die Transparenz darüber, was ein automatisierter Partner im Verhältnis zum Aufgabenfortschritt gegenwärtig macht. Diese Beobachtbarkeit lässt sich nach den Autoren durch die Unterstützung eines gemeinsamen Verständnisses über das zu lösende Problem und den Fortschritt der Zielerreichung am besten realisieren. Hier finden sich im Wesentlichen die Forderungen von [51] mit der Transparenz und [31] mit der Synchronität wieder.

Vorhersagbarkeit meint die Nachvollziehbarkeit zukünftiger Absichten und Aktivitäten des jeweiligen Partners. Sie wird als Teilmenge der Beobachtbarkeit gesehen und basiert auf einem gemeinsamen Verständnis der zu erreichenden Ziele, Fähigkeiten und Grenzen der Automatisierung.

Lenkbarkeit meint die Möglichkeit des Menschen jederzeit die Ressourcen, Aktivitäten und Prioritäten des automatisierten Teammitglieds zu steuern. Der Mensch soll die Kontrolle über den Agenten haben und Prozesse jederzeit stoppen, zwischen den verschiedenen Automationsstufen wechseln oder die Automatisierung völlig außer Kraft setzen können.

Jeder Partner muss zudem in der Lage sein, die Aufmerksamkeit der anderen Partner auf kritische Probleme, Hinweise bzw. Warnungen lenken zu können. Die Automatisierung muss dabei in der Lage sein, zusätzliche und relevante Informationen zu kennzeichnen, die sie nicht verarbeiten kann, so dass der Mensch eingreifen kann. Sie sollte auch proaktiv kommunizieren, wenn die ihr vorliegenden Informationen relevant werden.

Bei der **Erkundung des Lösungsraums** geht es um den Austausch zwischen den verschiedenen Ansichten, Wissen und Lösungen, die die Partner zu einer Situation haben können. Ziel ist es den Problemraum gemeinsam zu verstehen. Die Automatisierung soll diesbezüglich in der Lage sein mehrere verschiedene Handlungsoptionen zu generieren und Menschen die Möglichkeit geben diese Lösungen schnell zu vergleichen. Dazu soll es zusätzlich möglich sein die Lösungsüberlegungen individuell zu erweitern oder einzuschränken bzw. zu verändern.

Anpassungsfähigkeit definieren die Autoren als die Fähigkeit der Partner unerwartete Merkmale einer Situation zu erkennen und sich an diese entsprechend anzupassen.

Ein **kalibriertes Vertrauen** wird erreicht, wenn menschliche Nutzer genau wissen, wann und wie sehr sie einem automatisierten Partner im jeweiligen Kontext vertrauen können. Die Benutzer sollen klar verstehen, wann man sich auf die Automatisierung verlassen kann und wann man eher mehr Aufmerksamkeit der Automatisierung entgegenbringen sollte. Um diesen Aspekt umzusetzen sind Informationen über die Quelle der Diagnoseinformationen nötig und Informationen, die die Glaubwürdigkeit des Warnhinweises unterstützen.

Der Aspekt der Informationsrepräsentation umfasst Empfehlungen darüber, wie Informationen präsentiert werden sollten, um die Verständlichkeit zu erhöhen. Der Nutzer sollte mit den Informationen interagieren können, um die präsentierten Daten besser zu verstehen.

Schließlich umfasst die Kategorie des Designprozesses Elemente der technisch kognitiven Entwurfsprozesse, die in das System einpflegt werden müssen, um eine effektive Mensch-Maschine-Zusammenarbeit zu ermöglichen.

2.2.8 HAT-Systementwurf

Um diese Prinzipien alle bei dem Designentwurf eines HAT-Systems zu berücksichtigen, ist es zweckmäßig, sich grundlegende Gedanken über die generelle Konstellation der in dem Problemfeld beteiligten Elemente zu machen. Da sich mit steigender Funktionalität eines Agenten die Komplexität eines solchen Entwurfs maßgeblich erhöht, bietet es sich an Entwurfsmuster heranzuziehen. Der Begriff des Entwurfsmusters wird in vielen Domänen verwendet. Sie dienen dazu für wiederkehrende, bekannte Probleme Entwürfe bereitzustellen, die im Kern die Lösung für diese Probleme beschreiben. Man kann ein Entwurfsmuster als eine Art Schablone ansehen, die für ein bestimmtes Problem angewendet und zugeschnitten werden kann. In der Softwareentwicklung sind Entwurfsmuster beispielsweise Beschreibungen von Klassenhierarchien, die so angepasst wurden, damit ein allgemeines, immer wiederkehrendes Problem in einem bestimmten Kontext gelöst wird. Ursprünglich legte der amerikanische Architekt Christopher Wolfgang John Alexander den Grundstein für die Begriffsdefinition [53]:

Each pattern describes a problem which occurs over and over again in our environment, and then describes the core of the solution to that problem, in such a way that you can use this solution a million times over, without ever doing it the same way twice.

Auch für die Entwicklung von HAT-Systemen wurden bereits verschiedene Entwurfsmuster entwickelt, wobei diese mit verschiedenen Notationen beschrieben werden. Dabei legen die Autoren in der wissenschaftlichen Literatur unterschiedliche Schwerpunkte.

Die Autoren in [54] stellen eine Notation für Entwurfsmuster für die Zusammenstellung von HAT vor, die sich vor allem auf verschiedene ausführende Tätigkeiten und Teamarbeiten beziehen. Als Teamziel ist dabei das Ziel bezeichnet, welches die Teammitglieder gemeinsam erreichen möchten. Sie bezeichnen ihre Notation als *Team Design Pattern* (TDP) language und dient v.a. der Beschreibung von Teamarbeiten zwischen Mensch und Maschine. Dabei unterscheiden sie zwischen kognitiven und physischen Arbeiten, dem Grad der kognitiven bzw. physischen Auslastung, sowie der Art der Tätigkeit.

Die Entwurfsmuster von Schulte et al. [55] legen den Fokus auf die fundamentalen Rollenbeziehungen zwischen den beteiligten Akteuren in einem Arbeitssystem, d.h. es wird auf Systemebene Bezug auf die Rolle der Akteure und die Art der Beziehung untereinander genommen. Grundlegend wird bei dieser Notation ein Arbeitssystem beschrieben, welches den Rahmen bzw. die Systemgrenzen kennzeichnet. In diesem Rahmen wird zwischen einer Arbeiterseite (Workerseite) und einer Werkzeugseite (Toolseite) unterschieden. Auf der Arbeiterseite stehen Akteure (bezeichnet mit dem englischen Begriff worker), die unter Verwendung der zur Verfügung stehenden Werkzeuge (bezeichnet mit dem englischen Begriff tools) die Initiative ergreifen, um den Arbeitsprozess (engl. work process) zum Erreichen des gegebenen

Arbeitsziels (engl. work objective) voranzutreiben. Das Resultat des Arbeitsprozesses bildet das Arbeitserzeugnis (engl. work output). Das Arbeitssystem ist Umwelteinflüssen ausgesetzt, die nicht nur Informationen über die physische Umgebung umfassen, sondern auch abstrakte Informationen, wie z.B. Benachrichtigungen von einer Kommandozentrale, die den Arbeitsprozess oder das Arbeitsziel beeinflussen können. Softwareagenten können sowohl auf der Worker- als auch auf der Toolseite vorkommen, um bei der Ausführung der Arbeit zu unterstützen. Der Mensch bzw. menschliche Operateur hingegen steht typischerweise als Nutzer der Tools auf der Workerseite. Bei den Werkzeugen handelt es sich um konventionelle Automation. Bei den Rollenbeziehungen werden zwei Beziehungstypen unterschieden:

- hierarchische Beziehung: Delegation von Aufgaben
- heterarchische Beziehung: Assistenz- bzw. Teambeziehung

Mit diesen Elementen lassen sich komplexe Arbeitssysteme mit Automation und damit die grundlegende Arbeitsbeziehung in HAT-Systemen beschreiben. Ein Beispiel eines solchen Entwurfs ist in Abbildung 2-10 dargestellt.

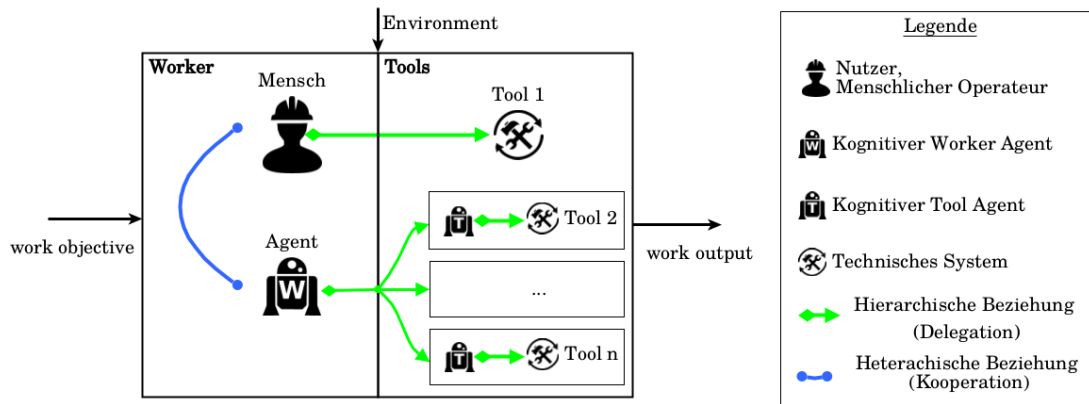


Abbildung 2-10: Beispiel eines Arbeitssystementwurfs

Physische Tätigkeiten können in Schultes Notation ebenfalls ausgedrückt werden, indem Akteure eine hierarchische Beziehung zu entsprechenden Werkzeugen auf der Toolseite, die eine physische Interaktion erfordern, bilden (siehe z.B. hierarchische Beziehung zwischen dem Menschen und Tool 1 in Abbildung 2-10). Zudem können hier Parallelen zu der horizontalen und vertikalen Kooperationsstruktur von [42] gezogen werden und die hierarchische Beziehung mit der vertikalen Kooperationsstruktur und die heterarchische Beziehung mit der horizontalen Kooperationsstruktur verglichen. Ein Mechanismus für die Aufgabenzuweisungen lässt sich in Schultes Notation über einen weiteren Worker oder gar Tool

repräsentieren. Dies muss dabei nicht zwangsläufig eine technische Lösung sein, sondern kann auch durch den Menschen erfolgen. Die Notation ist sehr flexibel gestaltet, so dass man damit umfangreiche Aspekte abbilden kann. Sie wird deswegen zur Beschreibung des Systementwurfs in Kap. 4 genutzt.

2.3 Entscheidungsfindung in militärischen Kontexten

Nach Clausewitz [56] ist die Taktik definiert als

die Lehre vom Gebrauch der Streitkräfte im Gefecht

Eine sehr abstrakte Definition, die jedoch die Grundphilosophie der Taktik gut umreißt. Die Taktik umfasst die Anordnung und Manöver von Einheiten im Verhältnis zueinander, dem Gelände und dem militärischen Gegner mit dem Ziel eine Kampfhandlung für sich zu entscheiden [57]. Grundlegend geht es bei der Taktik darum sich durch das taktische Vorgehen einen Vorteil zu verschaffen, so dass sich die Erfolgsaussichten für den Ausgang einer Mission steigern. Dabei ist nicht nur der Plan im Vorfeld der Durchführung einer Mission zu beachten, sondern auch die Überwachung und eventuelle Anpassung des Plans während der Durchführung. Befehlshaber bewerten deshalb während des Missionsablaufs kontinuierlich das Geschehen und prüfen, ob sie den Plan zum Erreichen des Missionsziels anpassen müssen, wägen aufkommende Möglichkeiten ab oder reagieren auf unerwartete Ereignisse [58]. Dazu begutachten sie die Informationen innerhalb des Operationsgebiets und verarbeiten diese mental, um ihr Verständnis der vorliegenden Situation zu bilden. Das Verständnis einer Situation kann sich dabei zu jeder Zeit ändern, was Auswirkungen bzw. Anpassungen an dem eigenen Vorgehen haben kann. Es handelt sich aufgrund der Fülle an Informationen um eine hoch komplexe Tätigkeit. Deswegen werden Befehlshaber bei dieser komplexen Aufgabe meist von Personal unterstützt. Zwei grundlegende Entscheidungsprozesse werden in [58] unterschieden, der sog. military decision-making process (MDMP) und der Rapid Decision-Making and Synchronization Process (RDSP). Ersterer ist ein zeitaufwändigerer Prozess, dessen Ziel es ist die optimale Lösung für das taktische Vorgehen zu finden. Der RDSP ist hingegen ein Vorgehen, das eine zeitnahe und effektive Lösung sucht, die im Sinne der Absicht des Befehlshabers ist. Da das Konzept dieser Arbeit v.a. auf eine Unterstützungsleistung während der Durchführung einer Mission abzielt, wird der RDSP näher erläutert.

2.3.1 Rapid Decision-Making and Synchronization Process (RDSP)

Der *Rapid Decision-Making and Synchronization Process* (RDSP) besteht aus fünf Schritten. Die ersten beiden können dabei in beliebiger Reihenfolge oder sogar zeitgleich erfolgen. Die nachfolgenden drei Schritte werden solange wiederholt durchgeführt, bis die Befehlshaber sich auf eine Vorgehensweise festgelegt haben [58]. Befehlshaber und Stäbe ermitteln während der Planung wahrscheinliche

Abweichungen und identifizieren mögliche Optionen und Maßnahmen, die bei jeder Abweichung wahrscheinlich zur Verfügung stehen. Die einzelnen Schritte werden im Folgenden aufgezählt:

- **Vergleich der aktuellen Situation zum Auftrag:** Während der Ausführung überwachen die Kommandanten und Stäbe das Situationsgeschehen, um Veränderungen festzustellen. Sie stellen dann fest, ob diese veränderten Umstände Abweichungen vom Auftrag darstellen - insbesondere Chancen, Bedrohungen und Risiken. Stabsmitglieder suchen anhand laufender Schätzungen nach Indikatoren für Abweichungen, die ihre Fachgebiete betreffen. Eine solche Abweichung könnte eine Änderung des Missionsziels sein, aufkommende Handlungen des militärischen Gegners oder die Identifikation einer Informationsanforderung.
- **Bestimmung eines Entscheidungserfordernisses:** Wenn eine Abweichung erkannt wurde, wird festgestellt, ob diese eine Entscheidung erfordert. Dabei wird u.a. geprüft, welche Konsequenzen diese Abweichung auf den Missionsplan hat und wie groß deren Einfluss auf den Erfolg der Mission ist.
- **Vorgehensweise entwickeln:** Sollte die Abweichung eine Entscheidung erfordern, wird unter Anleitung des Befehlshabers eine Vorgehensweise entwickelt, um dieser Abweichung zu entgegenen. Neue Handlungsmöglichkeiten müssen in Übereinstimmung der Absicht des Befehlshabers sein und können eine Veränderung mit sich bringen, die eine Informationsbeschaffung (z.B. über eine gegnerische Stellung, einem Geländeabschnitt, ...) notwendig macht. Dabei werden zur Verfügung stehende Ressourcen neu verteilt oder Prioritäten neu gesetzt. Befehlshaber gewichten die aufkommende Operation mit den dafür notwendigen Mitteln.
- **Optimierung und Validierung der Vorgehensweise:** Sobald die neue Vorgehensweise festgelegt wurde, wird diese auf ihre Tauglichkeit und Akzeptanz hin geprüft. Sofern sie akzeptabel ist, wird sie soweit angepasst, dass die bisherigen Kampfhandlungen damit koordiniert werden. Sollte sie aufgrund einer Untauglichkeit zur Lösung des Problems nicht sinnvoll sein, wird ein zusätzlicher Analyseschritt unternommen und eine neue Vorgehensweise entwickelt.
- **Umsetzung:** Nach Akzeptanz der Vorgehensweise wird diese umgesetzt, in dem sie an die ausführenden Kräfte übermittelt wird.

Im Bereich der militärischen Kriegsführung ist neben dem RDSP ein dem SA-Modell von Endsleys ähnliches Modell bekannt, das den menschlichen Entscheidungszyklus beschreibt, der sog. OODA-Loop. Im Folgenden soll dieser näher beschrieben werden und anhand der darin beteiligten Prozesse wichtige Aspekte einer taktischen Situationsanalyse im militärischen Umfeld vorgestellt werden, die für das entworfene Konzept relevant sind, sowie der Zusammenhang mit Situationsbewusstsein hergestellt werden.

2.3.2 OODA-Loop

Das Konzept der OODA-Loop wurde von dem Militärstrategen und Kampfpiloten John Boyd (1927-1997) während des Korea-Kriegs für Piloten entwickelt, damit diese an Überlegenheit gewinnen und eine Informationsüberlastung vermieden wird mit dem Ziel den Ausgang einer Schlacht für sich zu entscheiden. Er hat dieses jedoch nie wissenschaftlich veröffentlicht. Eine genaue Beschreibung und eine historische Entwicklung der OODA-Loop finden sich in [59]. OODA steht für „Observe – Orient – Decide – Act“, also die Prozesse Beobachten, Orientieren, Entscheiden und Handeln (siehe Abbildung 2-11).

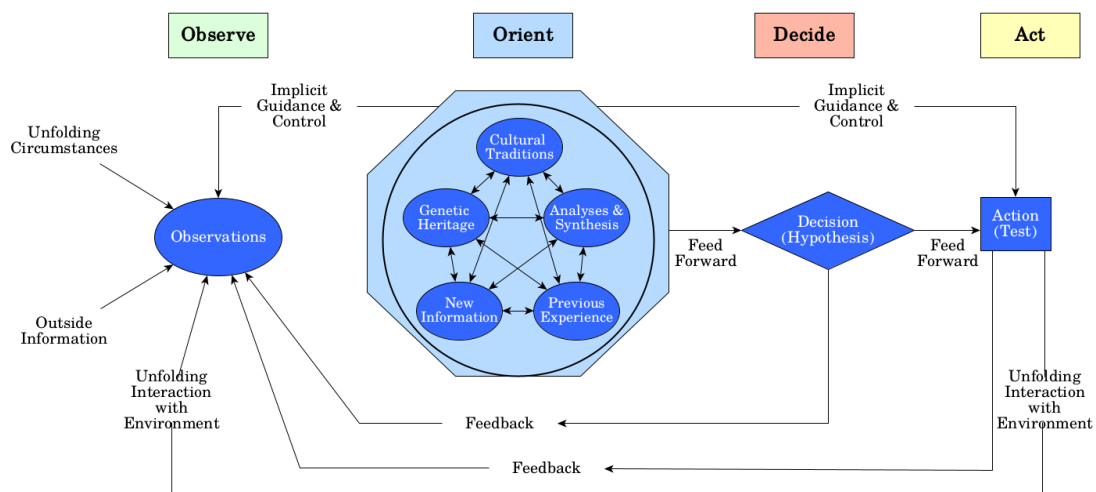


Abbildung 2-11: OODA-Loop (aus [60] nach [61]; modifiziert)

Die Prozesse sind nach [62] folgendermaßen definiert:

- **Beobachten:** Umfasst das Sammeln von Informationen über die Umwelt durch Interaktionen, aktive Beobachtung mittels Sensorik oder durch den Erhalt von Nachrichten über den Zustand der Umwelt.
- **Orientieren:** Ist das zentrale Element der OODA-Loop. In diesem Prozess wird bestimmt, auf welche Art und Weise die Umwelt beobachtet wird, welche Entscheidungen getroffen werden und welche Handlungen vollzogen werden sollen. Dieser Prozess ist geprägt von Erfahrungen, Tradition und gegebenen Umständen.
- **Entscheiden:** Aus verschiedenen Hypothesen als mögliche Reaktionen auf den aktuellen Umweltzustand wird eine ausgewählt, wobei die Kriterien für diese Auswahl auf Erkenntnissen des Orientierungsprozesses beruhen.

- **Handeln:** Stellt die Ausführung der getroffenen Entscheidung dar. Durch die Handlung wird Einfluss auf die Umwelt genommen, die als Feedback in diese zurückfließt und im nächsten Zyklus beobachtet werden kann, um die Auswirkungen wahrzunehmen.

Der OODA-Loop fehlen allerdings nach [62] wesentliche kognitive Aspekte, wie Aufmerksamkeit, Gedächtnisleistung oder Arbeitsbelastung. Sie werden im Modell nicht explizit berücksichtigt. Die Autoren vergleichen das OODA-Loop-Konzept auch mit anderen Prozessmodellen, u.a. mit dem SA-Modell von Endsley (siehe Kap. 2.1.1). Im direkten Vergleich entspricht der Beobachtungsprozess der Ebene der Wahrnehmung und der Orientierungsprozess der des Verstehens. Die Projektion hat jedoch kein direktes Äquivalent. Nach [62] wäre eine Möglichkeit, die Projektionsebene dem Orientierungsprozess zuzuordnen. Allerdings müsste man die OODA-Loop dann um eine Planungskomponente erweitern.

Nach [63] decken sich die beiden Prozesse Beobachten und Orientieren mit allen drei Ebenen von Endsleys Modell. Es stellt allerdings die Frage, welche Art Informationen für einen Kommandanten von Bedeutung sind. Militärische Handbücher geben hierzu einen Leitfaden. Dabei werden relevante Informationen nach vordefinierten Kategorien klassifiziert.

Beide Entscheidungsprozesse, der RDSP und der OODA-Loop, haben Gemeinsamkeiten. Sie beschreiben einen kontinuierlichen Prozess, dessen Schritte darin bestehen relevante Informationen aus der Umgebung zu sammeln, diese in ein eigenes mentales Situationsbild zu integrieren, Situationen auf eine Entscheidungshandlung hin zu prüfen, sowie bei Bedarf eine taktische Entscheidung zu fällen und diese umzusetzen. Um ein Situationsverständnis aufzubauen betrachten Befehlshaber grundlegende Faktoren, die sich in unterschiedliche Informationskategorien gliedern lassen. Diese Kategorisierung wird als METT-TC bezeichnet. Hinter diesem Akronym stehen die Missionsvariablen, d.h. relevante Kategorien, zu denen ein Befehlshaber Informationen sammelt. Basierend auf dem aktuellen Situationsverständnis bestimmt der Befehlshaber den gewünschten Endzustand und entwirft einen Vorgehensplan, um diesen gewünschten Zustand zu erreichen. Während diesem Schritt, der Entwicklung eines Vorgehensplans, identifiziert bzw. erkennt der Befehlshaber eventuelle Informationslücken, die jedoch notwendig sind zu schließen, um eine Entscheidung treffen zu können. Diese Informationslücken werden im militärischen Kontext als “commander’s critical information requirements” (CCIRs) bezeichnet. CCIRs werden vom Befehlshaber priorisiert und an den Befehlsstand weitergeleitet, welcher daraus entsprechende Aufklärungsmissionen in die Wege leitet.

2.3.3 METT-TC

Die Kategorien, nach denen relevante Informationen für die taktische Situationsbewertung gegliedert werden, werden durch das Akronym METT-TC zusammengefasst [57], [64]. Die Kommandanten

orientieren sich während der Mission an diese Variablen, wenn sie Informationen zur Bewertung einer Situation heranziehen. Das Sammeln dieser Informationen kann dem Beobachtungsprozess der OODA-Loop zugeordnet werden. Die Missionsvariablen umfassen relevante Informationen entsprechend vorgegebener Kategorien, welche sich hinter dem Akronym METT-TC verbergen. Jeder Buchstabe dieses Akronyms steht für eine der Kategorien. Sie werden u.a. ausführlicher in [64] erläutert. Die Missionsvariablen sind:

- **Mission:** Meint die Absicht bzw. den gewünschten Endzustand der zur Mission gehörenden essentiellen Aufgaben, die das Missionsziel beschreiben
- **Enemy:** Umfasst sämtliche Informationen über gegnerische Kräfte (z.B. deren Zusammensetzung, Verteilung im Einsatzgebiet, kürzliche Aktivitäten, mögliche Handlungsoptionen, etc.)
- **Terrain & Weather:** Beinhaltet Umgebungsinformationen, wie die Topographie des Geländes und Wetterbedingungen, die Einheiten beeinflussen können (z.B. in deren Bewegung)
- **Troops:** Umfasst alle zur Verfügung stehenden Ressourcen, deren aktuelle Positionen und Einsatzstatus
- **Time:** Meint Zeitspannen, die für Planung, Vorbereitung und Ausführung von Aufgaben zur Verfügung steht
- **Civil Considerations:** Beinhaltet den Einfluss von nicht am Kampf teilnehmenden Entitäten, wie z.B. zivile Einrichtungen, Bevölkerungsgruppen, etc.

Im Falle der Kategorie Terrain wird das Einsatzgebiet nach den Faktoren, die unter dem Akronym OAKOC zusammengefasst werden, analysiert [64]. Dieses Akronym steht für folgende Faktoren:

- **Observation and fields of fire:** Schließt Positionen ein, an denen der Gegner auf die eigenen Einheiten effektiv wirken kann und Positionen, die es den eigenen Truppen ermöglichen das Operationsgebiet bestmöglich zu überwachen
- **Avenues of approach:** Hierunter fallen Gebiete, in denen sich Einheiten fortbewegen können. Der Begriff avenue of approach (dt.: Annäherungswege, Marschrouten) meint Gebiete, die ausreichend Bewegungsfreiheit und ausreichende Breite bietet, um die Passage einer Einheit zu ermöglichen, die groß genug ist, um das Ergebnis einer Operation maßgeblich zu beeinflussen. In dieser Analyse ist es deshalb wichtig mögliche Annäherungswege des militärischen Gegners, aber auch der eigenen Einheiten zu bestimmen.

- **Key and decisive terrain:** Key terrain (dt.: Schlüsselterrain) sind jegliche Orte, die den gegnerischen oder eigenen Einheiten einen entscheidenden Vorteil für den Verlauf einer Mission bringen. Decisive terrain (dt.: entscheidendes Terrain) ist ein Schlüsselterrain, dessen Einnahme und Beibehaltung für die Erfüllung einer Mission zwingend erforderlich ist. Bei der Analyse geht es darum dieses wichtige Terrain zu identifizieren.
- **Obstacles:** Bei der Analyse des Terrains werden hierbei Hindernisse, die die Fortbewegung beeinträchtigen bestimmt. Diese können natürliche bzw. erbaute Hindernisse sein (z.B. Berge, Städte) oder sogenannte verstärkte Hindernisse (z.B. Minenfelder, Panzerabwehrgräben, Draht Hindernisse). Danach wird das Terrain nach Kategorien eingeteilt, die den Grad der Einschränkung beschreiben.
- **Cover and concealment:** Bei diesem Faktor handelt sich um Positionen, die für Einheiten (ob gegnerisch oder befreundet) Deckungs- und Tarnmöglichkeiten bieten.

Insbesondere die Kategorien Enemy, Terrain & Weather, Troops und Civil Considerations erfordern das Sammeln von Informationen direkt aus der Missionsumgebung. Für gewöhnlich werden diese Informationen über Aufklärungsmissionen beschafft. Die Aufklärung kann dabei im Vorfeld und/oder auch während einer Missionsdurchführung stattfinden. Damit ist die Aufklärungsarbeit ein wesentlicher Bestandteil des Beobachtungsprozesses der OODA-Loop.

2.4 Aufklärung

Nach [65] kommt der Aufklärung folgende Bedeutung zu:

Reconnaissance is a focused collection effort. It is performed before, during, and after other operations to provide information used in the intelligence preparation of the battlefield (IPB) process, as well as by the commander in order to formulate, confirm, or modify his course of action (COA).

Auf militärische Operationen bezogen handelt sich damit um das Sammeln von Informationen, die genutzt werden, um sich gegebenenfalls an neue Situationen anzupassen und zu gegebenen Umständen Handlungsoptionen abzuleiten.

Die intelligence preparation of the battlefield (IPB) ist in [66] folgendermaßen definiert:

Intelligence preparation of the battlefield is the systematic process of analyzing the mission variables of enemy, terrain, weather, and civil considerations in an area of interest to determine their effect on operations.

Aus dieser Definition geht die Verbindung zu den in Kap. 2.3.3 beschriebenen Missionsvariablen klar hervor, die die Basis für die Planung der taktischen Aufklärung darstellen [67]. Die Aufklärung wird also genutzt, um Informationen zu diesen Variablen zu erlangen, die daraufhin analysiert werden, mit dem Ziel die eigene Handlungsoption abzuleiten, anzupassen oder zu überprüfen. Die Luftaufklärung ist neben der Bodenaufklärung eine der Herangehensweisen, um Informationen zu erhalten. Sie umfasst die visuelle Beobachtung, Bild- und Signalaufklärung von luftgestützten Plattformen aus. Diese Plattformen können entweder bemannte oder unbemannte Luftfahrzeuge (engl.: unmanned aerial vehicles, UAVs) sein [68]. UAVs sind heutzutage zum Standard in militärischen Operationen weltweit aufgestiegen. Sie ermöglichen es ohne einen menschlichen Operateur in ein Risikogebiet schicken zu müssen, um in Echtzeit Informationen zu diesem Gebiet zu erlangen. Sie nehmen deswegen u.a. bei der Aufklärung einen wichtigen Stellenwert ein.

2.5 Bedrohungsanalyse

Wenn alle nötigen Informationen gesammelt wurden und der Beobachtungsprozess abgeschlossen ist, gilt es die Informationen im Orientierungsprozess zu analysieren. Die Bedrohungslage gegnerischer Kräfte ist dabei ein wesentlicher Einflussfaktor, der beim Aufbau eines Situationsbilds und Entscheidungsprozess in militärischen Lagen berücksichtigt werden muss. Sie hat sowohl Einfluss auf die Planung eigener Wegstrecken (z.B. Flugrouten der eigenen Luftfahrzeuge) als auch auf die Nutzung von zur Verfügung stehenden Ressourcen (z.B. Einsatz von UAVs zur gezielten Bekämpfung gegnerische Stellungen oder um Aufklärungsdaten über diese zu erlangen, mit dem Ziel ein möglich gesichertes Lagebild der Bedrohung zu erhalten).

In der Literatur gibt es zu dem Begriff Bedrohungsbewertung einige Definitionen, wobei sich diese auf verschiedene Domänen beziehen. Im Folgenden wird auf Definitionen eingegangen, die sich auf den militärischen Kontext und dem Datenfusionsbereich beziehen. Nach [69] ist die Bedrohungsbewertung Bestandteil des IPB-Prozesses und ist folgendermaßen definiert:

Threat evaluation is an ongoing process that begins by identifying the threat forces in the [area of operation] and their composition.

Danach ist es ein ständig andauernder Prozess, der sich mit der Identifizierung und Zusammensetzung von Bedrohungen beschäftigt. Dabei wird die Bedrohung (engl.: threat) in diesem Zuge definiert als

[...] any combination of actors, entities, or forces that have the capability and intent to harm United States forces, United States national interests, or the homeland.

Diese Definition lässt sich nicht nur auf die Vereinigten Staaten beziehen, sondern allgemein auf die eigenen Streitkräfte, nationalen Interessen und das Heimatland. Die Verfasser in [70] liefern für den Begriff der Bedrohung eine allgemeinere Definition, nach der eine Bedrohung ein Ausdruck der Absicht eines Übels, einer Verletzung oder eines Schadens ist. Die Absicht des militärischen Gegners ist damit ein wesentlicher Bestandteil bei der Beurteilung einer Bedrohungslage.

Wichtig in diesem Prozess ist weiterhin ein Wissenserwerb darüber, wie sich die potentiellen Bedrohungen organisieren, wie sie ausgestattet sind (Ausrüstung, Fähigkeiten, usw.), sowie wie sie ihre zur Verfügung stehenden Kräfte einsetzen, d.h. es geht darum die möglichen Vorgehensweisen von Bedrohungen abzuschätzen [69].

Einen möglichen Vergleich zwischen verschiedenen Entitäten, die eine Bedrohung darstellen, liefern die Autoren in [71]. Sie definieren die Bedrohungsbewertung als:

[...] the part of threat analysis concerned with the ongoing process of determining if an entity intends to inflict evil, injury, or damage to the defining forces and its interests, along with the ranking of such entities according to the level of threat they pose.

Aus dieser Definition geht hervor, dass mögliche Bedrohungen entsprechend eines quantitativen Maß eingestuft werden und damit vergleichbar sind. Das impliziert bereits, dass die Informationen über die einzelnen Entitäten als Eingabe für ein Berechnungsmodell dienen, dessen Resultat ein genau solcher Bedrohungsgrad ist. Eine quantitative Einstufung des Bedrohungsgrades findet sich auch bei Steinberg in [72]. Er betrachtet Situationen bei der Bedrohungsanalyse, die ein Bestandteil der Level 3 des Datenfusionsprozesses ist. Die Situationsbewertung dient als Grundlage für die Bestimmung potentiell schädlicher Ereignisse [73]:

Threat Assessment involves assessing situations to determine whether detrimental events are likely to occur.

Er grenzt die Situationsbewertung von der Bedrohungsbewertung ab. Bei der Bedrohungsbewertung geht es nach Steinberg v.a. um die Projektion von situativen Zuständen von aktuellen oder vergangenen Informationen. Damit verbunden sind dann folglich die möglichen Vorgehensweisen des Gegners. Für ihn sind v.a. zwei Funktionen für die Bedrohungsbewertung bzw. dem Impact Assessment (Level 3 des JDL Modells) relevant:

- Die Abschätzung möglicher Situationen, d.h. Situation, die aufgrund von möglichen Ereignissen eintreten können. Dies umfasst

- Die Projektion zukünftiger Situationen bedingt durch die Entwicklung einer aktuell herrschenden Situation
- Die Projektion vergangener, aktueller oder zukünftiger Situationen bedingt von möglichen bzw. hypothetischen Situationen
- Die Abschätzung eines Kostenwerts durch eine entsprechende Funktion für die aktuellen oder möglichen Situationen

Der Unterschied zu den Betrachtungen in [71] liegt darin, dass Steinberg die Bedrohung einer Situation an sich bewertet, während in [71] die einzelnen Entitäten einer Situation bewertet. Diese Betrachtungsweisen lassen sich allerdings leicht vereinen. Denn, sobald man die Bedrohungsgrade der einzelnen Entitäten einer Situation kennt, kann man daraus einen Kostenwert für die entsprechende Gesamtbedrohungslage und damit der Situation ermitteln. Bei der Berechnung des Kostenwerts einer Situation lässt sich die Wahrscheinlichkeit für deren Eintreten ebenfalls berücksichtigen, so dass Situationen, die eine höhere Eintrittswahrscheinlichkeit haben als andere, auch einen höheren Kostenwert erhalten.

2.6 Systemarchitekturen zu SA und Einordnung

In diesem Unterkapitel wird ein Überblick über Arbeiten vorgestellt, die sich mit Entwürfen und technischen Umsetzung von SA-Systemen beschäftigen. Bei der Recherche wurde der Fokus vor allem auf Arbeiten gesetzt, in denen System- bzw. Modellarchitekturen zur Situationsbewertung vorgestellt werden und Bezug auf Situationsbewusstsein nehmen. Aus diesen Arbeiten wurden grundlegende Komponenten herausgearbeitet, die in den Architekturen und Modellentwürfen vorkommen und für die Konzeption eines Agentensystems zur Situationsbewertung eine wesentliche Rolle spielen. Zunächst wird ein Überblick über einige Arbeiten gegeben, die als grundlegendes Ziel die Entwicklung eines Agentensystems zur Situationsbewertung haben. Anschließend werden die darin vorkommenden Komponenten herausgearbeitet und schließlich das eigene Vorhaben in den wissenschaftlichen Kontext eingeordnet.

2.6.1 Agentenarchitekturen zu SA

Viele der Arbeiten befassen sich mit der Umsetzung konkreter Agentenarchitekturen für bestimmte Einsatzzwecke. Anwendungsspezifische Systemarchitekturen in militärischen Simulationen werden beispielsweise in [74] und [75] vorgestellt, in denen der Fokus auf Level 2 (Situation Assessment) und Level 3 (Impact Assessment) des JDL-Modells liegt. Die Arbeit in [76] nimmt zusätzlich Bezug auf Level 1 (Object Assessment). Andere Arbeiten nehmen Bezug auf Endsleys Modell des Situationsbewusstseins und

haben ihre Systemarchitektur daran orientiert [77], [78] und [79]. In diesen Arbeiten geht es primär darum menschliche kognitive Fähigkeiten abzubilden und haben zum Ziel menschliches Verhalten zu imitieren.

Darüber hinaus bieten einige Ansätze menschliche Eingriffsmöglichkeiten, um Parametereinstellungen vorzunehmen [79] bzw. Anfragen zu stellen [74]. In diesem Zusammenhang kann man die Systeme allerdings eher als reines Werkzeug betrachten, da sie nicht entsprechend der Forderung eines Agenten selbstständig agieren.

Neben konkreten anwendungsspezifischen Systemarchitekturen existieren auch Modellentwürfe, die allgemeine Rahmenarchitekturen zur Situationsbewertung vorgeben [80], [81], [82]. Unter Einbeziehung des JDL- und Endsleys Modells haben die Autoren in [81] ein gemeinsames Situationsbewusstseinsmodell entworfen. Der Prozessablauf in diesem Modell sieht einen Nutzer vor, der das Problemfeld kennt und ein Modell angibt, welches die Daten definiert, die gesammelt werden müssen, um ein Verständnis zu einer Situation aufzubauen. Auf Grundlage des definierten Modells sammelt das System schließlich aus zugreifbaren Quellen die benötigten Informationen und bereitet diese auf, indem daraus relevante Objekte erzeugt werden, die als Evidenzen in einem Datencontainer gespeichert werden. Die ermittelten Evidenzen werden in einer weiteren Ebene mittels entsprechender Modellanalyse-Tools analysiert und es wird festgestellt, ob die vom Nutzer definierten Zielmodelle aufgetaucht sind. Ist dies der Fall, wird dem Nutzer die Identifikation des (Teil-)Zielmodells als Hinweis zur Verfügung gestellt. Das vorgestellte Referenzmodell sieht auch eine Feedbackschleife vor, über die der Nutzer zusätzliche Informationen in das System einbringen kann, wenn die gefundenen Evidenzen unvollständig oder inkonsistent sind und der Nutzer zusätzliche Informationen zur weiteren Suchspezifikation angeben möchte. Auch die Systemarchitektur in [83] weist Parallelen zu dem Referenzmodell in [81] auf. Kernpunkt in der Arbeit in [83] ist die Vorgabe eines Ziels, welches das System auf eine Hierarchie bestehend aus verschiedenen Ebenen und Aufgabenanforderungen herunterbricht. Daraufhin wählt das System zu dieser Zielstruktur passende Modelle selbstständig aus einer Reihe gespeicherter Ontologien¹ aus und führt entsprechend diesem die Informationssuche durch. Hier wird das Modell demnach automatisch durch die Interpretation des vom Nutzer vorgegebenen Ziels ermittelt. Die Sammlung von Daten erfolgt vom Prinzip her der Philosophie des Referenzmodells aus [81]. Informationen werden hier über Datenfusionstechniken für die Situationsidentifikation aufbereitet und zusammengeführt. Anschließend werden aus diesen so gewonnenen Daten mittels Analysewerkzeugen Schlussfolgerungen gezogen und Ergebnisse an den Nutzer vermittelt. Auch in dieser Arbeit ist eine Feedbackschleife angewandt worden, ähnliche zu dem in [81] vorgestellten

¹ <https://gi.de/informatiklexikon/ontologien>

Konzept. So können sowohl vom Nutzer als auch vom System selbst die Ziele entsprechend der Situation angepasst werden.

2.6.2 Grundlegende Komponenten der Agentenarchitekturen

Unabhängig von dem Bezugsmodell und Anwendungsdomäne, weisen die Systemarchitekturen und Modellentwürfe grundlegende Elemente auf, die bei der Verarbeitung von situationsbezogenen Informationen relevant sind. Arbeiten, die die Ebenen der Wahrnehmung bzw. Level 1 des JDL-Modells berücksichtigen, haben einen Mechanismus zur Aufbereitung von eingehenden Informationen aus der Umgebung (z.B. [76,77,79]), die auch in abstrakteren Architekturentwürfen vorgesehen sind [81,82]. Zentral ist hier die Zusammenführung von Daten und Überführung in für das System verarbeitbare Datenstrukturen. Weiterhin wird die Umgebung überwacht und auf situationsrelevante Ereignisse geprüft, um festzustellen, ob eine Handlung ausgewertet bzw. eine Situationsbewertung durchgeführt werden soll. Allen Arbeiten gemeinsam ist, dass sie das gegenwärtige Wissen zu einer Situation bzw. dessen Zustand intern durch ein entsprechendes Modell repräsentieren. Bei der Repräsentation werden unterschiedliche Methoden verwendet, denen allen allerdings gemeinsam ist, dass sie Objekte bzw. Symbole über Relationen in Verbindung setzen. Ein darauf basierender Entscheidungsprozess generiert schließlich eine Handlungsoption, die entweder Benachrichtigungen oder eine Folge von Handlungsanweisungen, die direkt in Aktionen münden, ergibt.

2.6.3 Einordnung

Betrachtet man sich Arbeiten in der wissenschaftlichen Literatur legen die meisten entwickelten Agentensysteme den Fokus auf die Umsetzung von SA und automatisierter Entscheidungsfindung auf rein technischer Ebene mit dem Ziel kognitive Fähigkeiten in ein System zu bringen. Die Interaktion zwischen einem Operateur wird meist entweder nicht oder nur sehr rudimentär betrachtet. Der Fokus liegt vielmehr auf der Umsetzung der Automatisierung. Zwar gibt es auch Arbeiten, die eine Mensch-Maschine-Interaktion bereitstellen, doch beläuft sich diese hauptsächlich auf Parametereinstellungen oder Zielangaben an das System. Das Agentensystem wird in diesen Fällen als reines Werkzeug genutzt, was zwar eigenständig handelt, jedoch auf eine reine Delegationsbeziehung zwischen Mensch und Maschine. Insbesondere in zeitkritischen, sich dynamisch ändernden und komplexen Umgebungen kann es jedoch durchaus sinnvoll sein, das Agentensystem mit einem Mechanismus auszustatten, welches dem Agenten erlaubt eigenständig automatisierte Unterstützung an den Menschen im Rahmen von taktischen Vorschlägen heranzutragen. In einer komplexen Systemumgebung, wie es beispielsweise bei der Navigation eines Helikopters der Fall ist, kann darüber hinaus der Pilot unter Umständen nicht zu jederzeit die mentalen Ressourcen aufbringen, um ein taktisches Unterstützungssystem als Werkzeug zu bedienen. Das hier vorgestellte Konzept soll demnach

nicht nur befähigt sein ein eigenständiges Lagebild einer Situation zu schaffen und Entscheidungen basierend darauf zu fällen. Vielmehr soll auch die Mensch-Maschine-Interaktion berücksichtigt werden, so dass zwischen Mensch und Maschine eine effektive Kollaboration entsteht. Dabei soll keine explizite Aufgabenteilung zwischen Mensch und Maschine erfolgen, sondern die Maschine soll sozusagen parallel zum Menschen die Situation analysieren und taktische Überlegungen anstellen können. Sofern es die Situation erfordert, soll die Maschine schließlich mit dem Menschen in Interaktion treten und Vorschläge bzw. Hinweise geben.

3 | KONZEPT DES ASSISTENTEN ZUR SITUATIONSANALYSE UND ENTSCHEIDUNGSUNTERSTÜTZUNG

Dieses Kapitel beschreibt das Konzept des Situationsbewertungsassistenten mit Entscheidungsunterstützung. Anzumerken ist, dass das hier vorgestellte Konzept sich auch auf andere Domänen übertragen lässt, die ähnlich Merkmale haben, wie die Militärdomäne. Bei der Beschreibung des Konzepts wird allerdings im folgenden Verlauf der Bezug zur Militärdomäne gesetzt, da diese im nächsten Kapitel der Implementierung als Ausgangsbasis dient. Zur Erläuterung des Konzepts wird zunächst eine **Problemfeldanalyse** im militärischen Kontext ausgeführt und darauf die **Aufgaben des Agenten** spezifiziert. Daraus werden schließlich die **Anforderungen an den Agenten** abgeleitet. Basierend auf den in Kap. 2 gelegten Grundlagen werden die zur Umsetzung der Anforderungen notwendigen Methoden für die Komponenten der **Bedrohungsanalyse**, der **Situationsrepräsentation** und **Taktischen Entscheidungsfindung** diskutiert und die Modellierungsaspekte des Konzepts dargelegt. Anschließend werden im Unterkapitel **Kollaborationsstufen und Interventionsmechanismus** die Richtlinien zur Interaktion zwischen dem Agenten und dem menschlichen Operator erörtert. Schließlich wird die Komposition der einzelnen Komponenten in einer **Systemarchitektur** vorgestellt, das das Gesamtbild des Agentensystems beschreibt.

3.1 Problemfeldanalyse

Um die Aufgaben und die sich daraus ergebenden Anforderungen des Agenten herauszuarbeiten ist es sinnvoll die Umgebung, in der der Agent interagieren soll, näher zu betrachten. Zunächst wird entsprechend der in Kap. 2.2.2 vorgestellten Eigenschaften von Aufgabenumgebungen die Umgebung charakterisiert und das Problemfeld der taktischen Entscheidung diskutiert. Anschließend werden Eingrenzungen und Annahmen erläutert, die im Zuge der Vereinfachung des Problemfelds getroffen wurden und auf die das Konzept fußt. Anschließend wird der grundlegende Agententyp, sowie die Aufgaben und Anforderungen des Agenten festgelegt.

3.1.1 Charakterisierung der Umgebung

Naturgemäß laufen militärische Einsätze im **kontinuierlichen** Raum (z.B. Positionen der einzelnen Einheiten) ab und sind **dynamisch** geprägt. Das Einsatzgebiet ist für gewöhnlich nur **teilweise beobachtbar** (z.B. Wo befinden sich gegnerische Stellungen?), weswegen die Aufklärung einen hohen Stellenwert besitzt. Weiterhin ist die Umgebung aufgrund von Unsicherheiten **stochastisch** geprägt und da getroffene taktische Entscheidungen sich auf frühere Entscheidungen auswirken können (man denke beispielsweise an

strategischen Positionierungen von Einheiten) handelt es sich um eine **sequenzielle** Aufgabenumgebung. Zudem muss damit gerechnet werden, dass unerwartete Ereignisse (z.B. technischen Defekten) Auswirkungen auf den Erfolg von Handlungen haben und damit deren Ergebniswahrscheinlichkeit **unbekannt** ist. Wenn man das Zusammenwirken von Mensch (der als Agent angesehen werden kann) und Agenten denkt oder auch das Zusammenwirken mehrere Agenten untereinander, so handelt es sich um ein **Multiagentensystem**.

3.1.2 Analyse der taktischen Entscheidung

Bei der taktischen Vorgehensweise muss ein Kommandant viele unterschiedliche Informationsquellen für Analysezwecke einbeziehen (siehe Kap. 2.3.3), um durch den Einsatz von zur Verfügung stehenden Ressourcen ein zugrundeliegendes Missionsziel zu erreichen. Doch gibt es bei dem taktischen Vorgehen meist mehrere mögliche Handlungsmöglichkeit für die Erfüllung eines Missionsziels. Für ein gegebenes taktisches Problem gibt es daher nicht unbedingt eine eindeutige Lösung. Weiterhin zeigen die Entscheidungsmodelle in Kap.2.3.1 und 2.3.2, dass sogar die Entscheidung ein taktisches Vorgehen für das Aufkommen einer Situation zu entwickeln sehr stark von individuellen Präferenzen und Ansichten abhängt. Die Entscheidung ist damit nicht nur abhängig von den für die Ausführung einer Mission zur Verfügung stehenden Ressourcen und Fähigkeiten, sondern auch von den Erfahrungen des Befehlshabers selbst. Der Missionstyp und das Missionsziel geben zudem die grundsätzliche Rahmenstruktur für die Verwendung der verfügbaren Mittel vor (z.B. Einnahme eines Territoriums, Schutz eines Konvois, Suchen von vermissten Personen, ...). Taktische Entscheidungen sind daher sehr missionsspezifisch und werden im Rahmen der verfügbaren Möglichkeiten getroffen. Das umfasst nicht zuletzt die Anzahl und Fähigkeiten der Ressourcen, die für die Lösung einer gegebenen Situation genutzt werden können bzw. gegeben sind, sowie deren gegenwärtiger Status (z.B. hat eine Einheit noch genügend Munition, ist die Einheit noch vollständig oder gibt es bereits Verluste, ...).

Militärische Operationen sind also nicht nur wegen der Umgebung hochgradig komplex. Auch die Entscheidungsfindung bietet ein großes Spektrum an möglichen Einsatzszenarien und taktischen Vorgehensweisen für Situationen. Um diese Komplexität beherrschbar zu lassen wird für die Konzeption das Problemfeld eingegrenzt und einige Annahmen getroffen.

3.1.3 Betrachteter Missionstyp und Annahmen

Für die Konzeption wird der Fokus auf einen Missionstyp gelegt, bei dem es darum geht die Marschroute eines hochwertigen, mobilen Objekts, welches sich von einem Startpunkt durch ein gegnerisches Gebiet zu einem Zielpunkt bewegt, abzusichern. Der Verlust dieses sensiblen Objekts bedeutet ein Scheitern der Mission. Das zu schützende Objekt ist dabei nur bedingt in der Lage sich selber

abzusichern, d.h. es ist auf andere Entitäten zur Absicherung angewiesen. Dafür stehen mobile Ressourcen bereit, mit denen an definierbaren Zielobjekten unter Anwendung deren Fähigkeiten Aktionen ausgeführt werden können. In den Betrachtungen des Konzepts wird dabei angenommen, dass alle Ressourcen homogen sind, d.h. sie haben die gleiche Ausstattung und Fähigkeiten. Der kontinuierliche Problemraum wird diskretisiert und der taktische Einsatz der Ressourcen auf einen kleinen Aktionsraum gelegt. Des Weiteren werden Vorverarbeitungsschritte, wie Signalauswertungen und Inferenzmechanismen zur Schätzung von Entitätszuständen (vgl. Level 0 und Level 1 in Kap. 2.1.3) ausgeblendet, um die Komplexität des Agentendesigns zu vereinfachen.

3.1.4 Ziele und Anforderungen am Agentenentwurf

Das oberste Ziel ist es dem menschlichen Operateur Funktionalitäten zur Verfügung zu stellen, die sowohl beim Aufbau des Situationsbewusstseins unterstützen, als auch Vorschläge für taktische Handlungsoptionen aufzeigen. Dabei sollen Mensch und Maschine kollaborativ zusammenarbeiten. Daraus ergeben sich mehrere Ziele bzw. Anforderungsbereiche.

3.1.4.1 Effizienz

Generell gilt, dass aufgrund der Dynamik und die damit verbundenen Situationsänderungen in militärischen Operationen es zu Situationen kommt, in denen der Kommandant schnell Entscheidungen fällen muss. Der zeitliche Faktor spielt eine wichtige Rolle. Daher muss der Agent effizient arbeiten, so dass Empfehlungen und Hinweise zeitnah an den Nutzer herangetragen werden können. Bei der Konzeption und Umsetzung ist deswegen auf effiziente Datenstrukturen und Verarbeitungsalgorithmen zu achten. Auch die Interaktionswege müssen effizient gestaltet sein, so dass der Kommandant schnell seine verfolgten Ziele erreichen kann. Damit verbunden sind auch die Antwortzeiten des Agenten. Diese sollten möglichst kurz sein, damit der Nutzer in seinem Vorhaben nicht ausgebremst wird.

3.1.4.2 Maschinelles SA

Unter dem Aspekt, dass SA als Grundlage für gute Entscheidungen steht (vgl. Kap. 2.1.2) muss der Agent selbst die Fähigkeit besitzen eine komplexe Situation intern zu repräsentieren und ein eigenes maschinelles Situationsbewusstsein über eine Lage entwickeln. Gemäß den Situationsbewusstseinsmodellen (vgl. Kap. 2.1) benötigt er dazu die Fähigkeiten relevante Objekte der Umgebung wahrzunehmen bzw. Informationen dazu aufzubereiten, diese Informationen in ein geeignetes informativen Situationsbild zu integrieren und mögliche Situationsentwicklungen daraus zu projizieren. Für den Aufbau eines informativen Situationsmodells benötigt er ein mentales Modell, das das Verständnis darüber enthält, wie Objekte miteinander zusammenhängen und was deren Bedeutung ist.

3.1.4.3 Situationsinterpretation und Entscheidungsfindung

Basierend auf dem maschinellen SA soll der Agent taktische Entscheidungen fällen, mit dem Ziel Handlungsoptionen für gegebene Situationen zu bilden. Entsprechend dem RSDP (vgl. Kap. 2.3.1) müssen dafür Bedingungen aufgestellt werden, die das Eintreten von Abweichungen zum Plan beschreiben. Bei Abweichungen sollen dann Mechanismen greifen, die ein adäquates Reagieren des Agenten ermöglichen. Die Handlungsoptionen sollen dabei so ausgerichtet sein, dass sie sich menschlichem Verhalten ähneln und möglichst an den individuellen Präferenzen des Nutzers anpassbar sind. Da es viele mögliche taktische Handlungsoptionen geben kann, die in Abhängigkeit der verfügbaren Einsatzmittel zum Tragen kommen, sollte der Aufbau derart modular gestaltet sein, dass taktische Vorgehensweisen leicht hinzugefügt werden können.

3.1.4.4 Kommunikation

Der Umstand eines Multiagentensystems (vgl. Kap. 3.1.1) erfordert für die Umsetzung einer kollaborativen Zusammenarbeit nach Grundprinzipien eines HAT-Entwurfs (vgl. Kap. 2.2.7) Mechanismen zur Abstimmung und zum Austausch von Informationen zwischen den beteiligten Parteien (vgl. Kap. 2.1.4). Augenmerk muss deswegen auf geeignete Koordinations- und Kommunikationsmechanismen gelegt werden. Dies erfordert ein gemeinsames Medium (vgl. Kap. 2.2.5), über das der Wissensaustausch vollzogen wird. Der Kommunikationsweg soll bidirektional erfolgen, damit die vom Agentensystem getroffenen Bewertungen und Handlungsempfehlungen mit dem Menschen geteilt werden können. Andererseits soll der Mensch die Möglichkeit besitzen, seine Bewertungen dem Agentensystem mitzuteilen, sowie Anfragen an dieses zur aktiven Unterstützungsanforderung zu stellen.

Die Kommunikationsart des Agenten zum menschlichen Operateur muss so einfach und intuitiv wie möglich gestaltet sein. Typischerweise befindet sich der Kommandant in Situationen, die von hoher Arbeitsbelastung gekennzeichnet sind. Jegliche Aufmerksamkeit, die er dem Agenten entgegenbringen muss, erfordert mentale Ressourcen, die sich auf die Arbeitslast auswirken. Der Zweck des Agenten soll jedoch sein den Kommandanten zu entlasten. Damit also der Nutzer nicht unnötig viel Zeit aufwenden muss, um die Mitteilungen des Agenten zu verstehen, sollte die Sprache des Agenten der des Nutzers entsprechen und Antworten möglichst schnell durch wenige Interaktionsschritte gesetzt werden können. Weiterhin sollte der Nutzer nicht mit aufkommenden Problemstellungen überhäuft werden, damit er nicht überlastet wird.

3.1.4.5 Verhalten des Agenten

Ein zentraler Punkt bei der Konzeption ist die Rolle des Agenten als Assistent. Die Gestaltung des Agenten soll so ausgelegt sein, dass er lediglich unterstützende Hilfestellungen anbietet und sich nicht über

die Entscheidungsinstanz des Menschen hinwegsetzt. Somit nimmt der Agent eine dem Menschen untergeordnete Rolle ein und greift nur unter bestimmten Umständen ein, insbesondere in kritischen Situationen. Das Verhalten soll minimal-invasiv sein, d.h. die Unterstützungsleistung soll nur dann angeboten werden, wenn es die Situation erfordert bzw. als wichtig erachtet wird. Human Factors Effekte, wie sie in Kap. 2.2.6 beschrieben werden, müssen vermieden werden, damit der Mensch beim Missionsgeschehen stets mit eingebunden wird. Das bedeutet, dass der Mensch bei der taktischen Bewertung und Entscheidungsfindung auf jeden Fall involviert sein muss. Damit das Kriterium der Vorhersehbarkeit (vgl. Kap. 2.2.7) erfüllt ist, sollten diese Eingriffe seitens des Agenten nachvollziehbar und im gewissen Maße auch erwartbar sein. Zudem soll der Mensch die letzte Entscheidungsinstanz sein, d.h. der Agent soll zwar in der Lage sein, eigene Handlungsempfehlungen vorzuschlagen, doch soll die tatsächliche Umsetzung bzw. Ausführung dieser Empfehlungen allein durch den Menschen getroffen werden. Damit soll die Lenkbarkeit des Systems durch den Menschen (vgl. Kap. 2.2.7) sichergestellt werden. Die Kontrolle und Verantwortung über das taktische Vorgehen sollen beim Nutzer liegen.

3.2 Agentendesign und Komponentenentwurf

Gemäß der Charakterisierung der Umgebung (vgl. Kap. 3.1.1), der Beschreibung der taktischen Entscheidungsfindung eines Kommandanten (vgl. Kap. 3.1.2) und den daraus herausgearbeiteten Anforderungen für das Agentensystem (vgl. Kap. 3.1.4) ergibt sich ein Rahmenwerk für den grundlegenden Agentensystementwurf. Für das Agentendesign wird ein Nutzen-basierter Agentenentwurf gewählt, mit der Möglichkeit diesen mit Lernkomponenten auszustatten. Die Gestaltung des Agentenentwurfs wird dabei so ausgelegt, dass er durch entsprechende Erweiterungen auch für andere Missionstypen angewendet werden kann. Der grundlegende Systementwurf, der die beschriebenen Ziele schematisch visualisiert, ist in Abbildung 3-1 dargestellt.

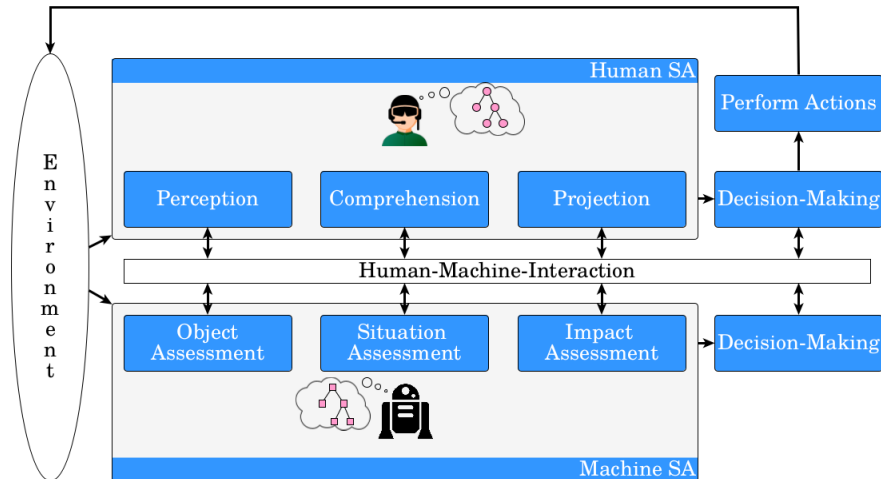


Abbildung 3-1: Grundlegende Idee des Konzepts

Sie lehnt sich an das Modell von [40] an und ist um die Komponente der Entscheidungsfindung (*Decision-Making*), sowie der Ausführungskomponente der getroffenen Entscheidungen (*Perform Actions*) erweitert worden. Analog zu dem Modell aus Kap. 2.2.4 werden die Ebenen des Situationsbewusstseins aus menschlicher und technischer Sicht gegenübergestellt. Über die Mensch-Maschine-Schnittstelle, welche die CWS aus [41] repräsentiert, können zwischen Mensch und Maschine Informationen ausgetauscht werden. Im Gegensatz zu der Allokation der Aufgaben zwischen Mensch und Maschine wie es in [40] beschrieben wird, sollen hier beide Parteien die Prozesse parallel durchlaufen und eigenständige Abbilder der Situation und Handlungsoptionen entwickeln. Dafür muss der Agent, wie der Mensch, ein mentales Modell besitzen, mit dem die Situationsanalyse und damit die informative Repräsentation der Situation aufgebaut werden kann (gekennzeichnet durch die pinkfarbenen Symbole neben dem Agenten-Symbol).

Es zeichnen sich entsprechend fünf Bereiche ab, in denen die Aufgaben bzw. des Agentensystems untergliedert werden können. Der erste Bereich beschäftigt sich mit der Informationserfassung und -aufbereitung (*Object Assessment*) und der zweite Bereich mit der internen Repräsentation des Wissens einer Situation (*Situation Assessment*). Daran schließen sich die Folgenabschätzung (*Impact Assessment*) und Entscheidungsfindung (*Decision-Making*) an. In diesen Bereichen wird das Wissen verarbeitet, um bestimmte Situationsmuster zu erkennen und darauf taktische Entscheidungen ableiten zu können. Schließlich wird ein Mechanismus benötigt, der die Zusammenarbeit zwischen Mensch und Maschine regelt, um die Kollaboration zu ermöglichen (*Human-Machine-Interaction*). In den folgenden Unterkapiteln werden die aus den Anforderungen abgeleiteten Konzeptkomponenten für das Agentendesign und die Methodenauswahl erörtert.

3.3 Object Assessment - Informationserfassung und -aufbereitung

Die Bedeutung dieses Bereichs ist die Informationsbeschaffung und -aufbereitung. Damit der Agent überhaupt in der Lage ist ein Situationsbild aufbauen zu können, müssen relevante Informationen aus zur Verfügung stehenden Datenquellen extrahiert, auf geeignete Weise strukturiert und aufbereitet werden, so dass sie über die Situationsverarbeitung in das bestehende Wissen integriert werden können. Diese Daten können Informationen zu physischen Entitäten, wie z.B. feindliche Stellungen, aber auch anderer Natur sein, wie z.B. eingehende Intelligence Reports, die eine Aktualisierung der Lage beschreiben oder neue Missionsziele enthalten. Die Informationsbeschaffung beläuft sich dabei nicht nur auf den in der Umgebung vorhandene Informationsquellen, sondern schließt auch Beschaffungswege wie Datenbanken, aus denen ebenfalls für die Mission relevante Daten herausgezogen werden sollen, mit ein.

Zusätzlich lassen sich hier Mechanismen einbringen, die prüfen, ob eine Situationsanalyse durch Prüfung auf signifikante Veränderungen in der Lage durchgeführt werden soll oder ob die gegenwärtigen Daten noch hinreichend aktuell sind. Allgemein gesprochen werden hierbei Informationen aus einem vorangegangenen Situationszustand mit denen der aktuellen Lage verglichen und auf signifikante Änderungen geprüft. Über derartige Prüfmechanismen ist zudem angedacht, die Parametrisierung der Berechnungs- und Situationsanalysemodelle zu modifizieren, so dass sie für auftretende Situationstypen bzw. Missionsphasen entsprechend eingestellt werden können. Letzterer Punkt wurde hinzugefügt, um das System an der Dynamik einer militärischen Operation anzupassen. Die Bewertungsgrundlage kann sich im Verlauf einer Mission bzw. Phase einer Operation ändern. Dieser Umstand soll hier ebenfalls berücksichtigt werden. In jedem Fall wird bei Erkennung einer Änderung zu einem bestimmten Sachverhalt ein entsprechendes Ereignis ausgelöst werden, welches als Auslösereiz bezeichnet wird. Ein Auslösereiz ist assoziiert mit dem Änderungstyp und startet den Situationsbewertungsprozess.

Für die Prüfungen müssen Regeln aufgestellt werden, die eine mögliche Änderung auszeichnen. Der Ablauf des Prüfvorgangs und dem damit verbunden Auslösemechanismus für die Durchführung einer Situationsbewertung ist in dem Aktivitätsdiagramm in Abbildung 3-2 abgebildet.

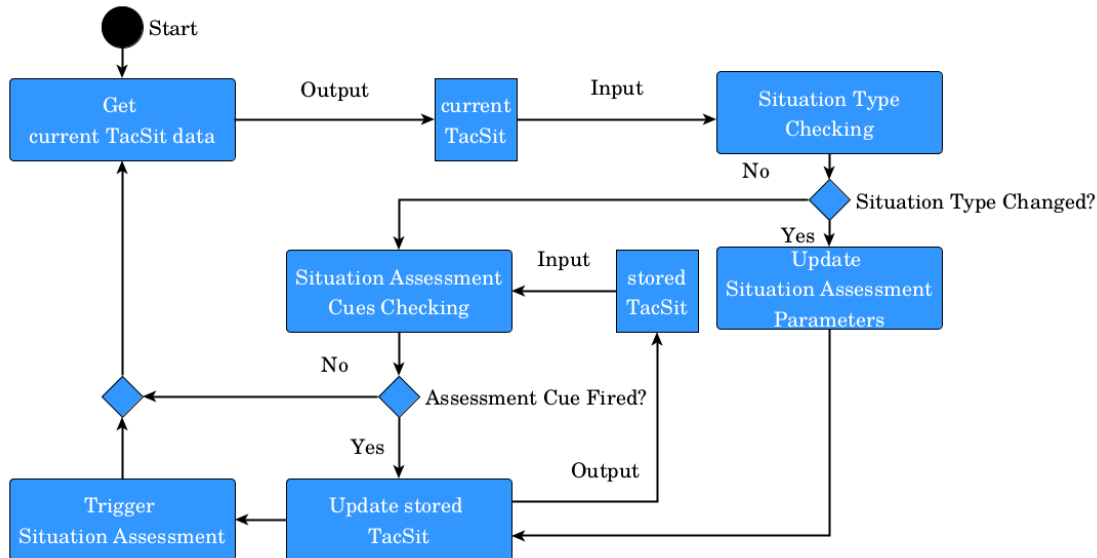


Abbildung 3-2: Aktivitätsdiagramm zum Ablauf der Prüfung für das Auslösen einer Situationsbewertung. Der Startpunkt ist durch einen dunklen Kreis dargestellt.

Die erste Aktivität, die ausgeführt werden muss, ist die Aufbereitung der Daten (*Get current TacSit data*) in einen Datencontainer (*current TacSit*), der alle relevanten Informationen einer Situation enthält. Zunächst findet eine Prüfung auf eine Änderung des Situationstyps statt (*Situation Type Checking*). Ist dies der Fall, werden für die für den Situationstyp definierten Parameterwerte geladen und an die Modelle der Situationsbewertung geschickt, damit diese auf die neuen Umstände hin angepasst werden (*Update Situation Assessment Parameters*). Anschließend wird der aktuelle Datencontainer zwischengespeichert (*Update stored TacSit*) und der Situationsbewertungsprozess gestartet (*Trigger Situation Assessment*). In dem anderen Fall - es liegt keine Änderung des Situationstyps vor - wird mit der Prüfung auf Änderung der Situationselemente fortgefahren (*Situation Assessment Cues Checking*). Dabei werden Situationsinformationen des aktuellen Datencontainers mit einem bereits existierenden Datencontainer (*stored TacSit*) auf Änderungen geprüft. Die Prüfung erfolgt anhand von festgelegten Regeln, die die Objekte des Datencontainers analysieren und vergleichen. Wenn eine Prüfung eine signifikante Änderung der Daten ergibt, wird die Situationsbewertung gestartet (*Trigger Situation Assessment*) und der Datencontainer für den nächsten Durchlauf aktualisiert (*Update stored TacSit*). Andernfalls oder nach Abschluss einer Situationsbewertung beginnt der Prozess von vorne.

3.4 Situation Assessment - Situationsrepräsentation

Ein Kernaspekt des Konzepts ist die Situationsrepräsentation der taktischen Lage. Wesentliche Herausforderung hierbei stellt die Komplexität der Umgebungen dar, in denen militärischen Operationen durchgeführt werden. Entsprechend der Tatsache, dass die Gesamtheit aller Informationen einer Situation abzubilden zu komplex ist (vgl. Kap. 2.1), müssen für die Schaffung eines maschinellen Situationsbewusstseins jene Informationen aus der Umgebung gesammelt und verarbeitet bzw. organisiert werden, die für die Entscheidung über das taktische Vorgehen relevant sind. Um diese relevanten Einflussfaktoren zu identifizieren werden die Missionsvariablen (vgl. Kap. 2.3.3) als Orientierungshilfe bei der Modellierung eines solchen Modells herangezogen. Mit dem Aufbau eines informativen Situationsbilds verbunden ist die Anwendung von Berechnungsmodellen, die Informationen aus der aktuellen Lage analysieren. Das daraus resultierende Wissen wird dann in die Wissensrepräsentation integriert, um ein Komplementär der Situation zu bilden. Eines der wichtigsten Faktoren im militärischen Kontext für die Situationsrepräsentation ist die Bewertung der Bedrohungslage (vgl. Kap. 2.5). Die Bedrohungsbewertung bildet eines der wichtigsten dieser Berechnungsmodelle. Da es sich hierbei um eine komplexe Thematik handelt, wird der Bedrohungsbewertung ein eigenes Kapitel gewidmet.

Denkbar sind im Zusammenhang der Wissensverarbeitung zudem andere Datenquellen zur Informationsbeschaffung. Diese können Daten bereitstellen, die unter Umständen nicht unmittelbar aus der direkten Umgebung stammen, jedoch nützlich für das Verständnis einer Lage bzw. das Treffen von taktischen Entscheidungen sind. Dazu zählen z.B. geographische Daten über das Einsatzgebiet oder historische Konfliktereignisse, die einen Einfluss auf die zu erwartende Bedrohungslage haben können. Der Agent benötigt entsprechende Schnittstellen, um eingehende Informationen aus der Umgebung und anderen Informationsquellen empfangen zu können.

3.4.1 Bedrohungsbewertung

Die Bedrohung durch gegnerische Einheiten hängt von vielen einzelnen Faktoren ab, wie z.B. der Terrainbeschaffenheit, der Ausrüstung des militärischen Gegners und der eigenen Verwundbarkeit. Ihre Bewertung ist stark von Wahrscheinlichkeiten geprägt und wird deshalb in der Praxis meist von erfahrenem Fachpersonal durchgeführt. Verschiedene Personen nutzen dabei unterschiedliche Einflussfaktoren als auch unterschiedliche Reihenfolgen bei der Auswertung. Auch derselbe Experte kann in unterschiedlichen Lagen ein leicht geändertes Vorgehen anwenden [84]. Dies macht die Bedrohungsbewertung zu einem komplexen Problemfeld. Auf dem Gebiet der militärischen Bedrohungsbewertung gibt es eine Vielzahl wissenschaftlicher Arbeiten, die unterschiedliche Methoden für die Bedrohungsanalyse herangezogen haben. Einige Arbeiten befassen sich mit dem Prozess der Bedrohungsbewertung allgemein. Andere

Arbeiten beschreiben den Stand der Technik [85]. In [84] wurden die Abläufe bei der Bedrohungsanalyse der U.S. Navy untersucht und daraus Richtlinien entwickelt. Methodisch gesehen gibt es eine Vielzahl an unterschiedlichen Herangehensweisen, die abhängig von der gewählten Methode mehr oder weniger erforscht sind. Zu den eher weniger erforschten Herangehensweisen zählt zum Beispiel die Verwendung der Multi Criteria Analysis [86], ein Verfahren zur Analyse von Entscheidungs- oder Handlungsmöglichkeiten im Rahmen der Entscheidungstheorie. Ebenso ist die Verwendung von Evidenz-Netzen für die Bedrohungsanalyse weniger erforscht [87]. Als Evidenz-Netze werden Netze verstanden, bei denen die Beziehungen mit Funktionen gemäß der Evidenztheorie von Dempster und Shafer modelliert werden [88].

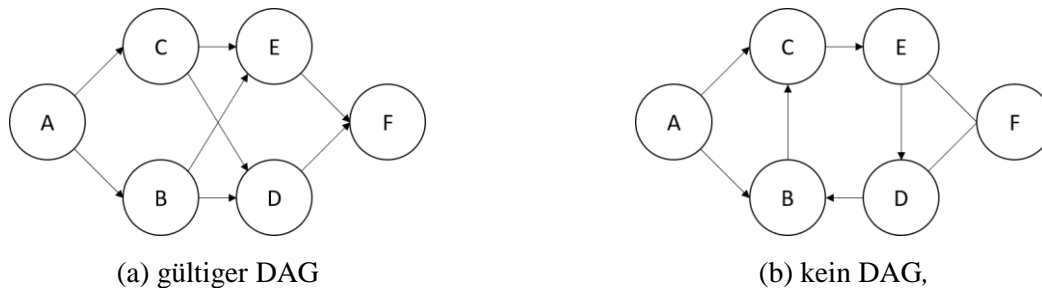
Zwei der am häufigsten verwendeten methodischen Ansätze zur Einschätzung von Bedrohungen sind Bayes'sche Netze (BNs) [89], [90,91], [92] und Fuzzy Logik [93–95]. In [96] wird die Fuzzy Logik zusammen mit einem Genetischen Algorithmus verwendet. In [97] werden die Stärken und Schwächen zwischen den Ansätzen Fuzzy Logik und BN aufgeführt und miteinander verglichen. Der Vorteil von BNs liegt in ihrer Fähigkeit, auch mit fehlenden Werten für bestehende Variablen umgehen und Schlussfolgerungen durchführen zu können. Dies ist in der militärischen Domäne essentiell, da nicht immer sichergestellt werden kann, dass alle gewünschten Informationen bekannt sind.

Für die vorliegende Arbeit führte dies zur Entscheidung der Verwendung eines Bayes'schen Netzes. Um zusätzlich zeitliche Faktoren zu berücksichtigen wurde ein Dynamic Bayesian Network (DBN), was als eine Erweiterung eines BNs verstanden werden kann, für die Modellierung der Bedrohungsberechnung gewählt. Ein DBN wurde unter anderem in [98] für die Bedrohungsbewertung verwendet. Die Grundlagen eines Bayes'schen Netzes (BN) bzw. eines Dynamischen Bayes'schen Netzes (DBN) werden im Folgenden erläutert.

3.4.1.1 Bayes'sches Netz (BN)

Ein BN wird im Bereich der Graphentheorie verwendet und ist ein probabilistisches Graphenmodell [99]. Es dient v.a. dafür kausale Zusammenhänge zwischen Zufallsvariablen darzustellen und bildet eine Wahrscheinlichkeitsverteilung ab. Ein BN lässt sich durch ein Tripel (V, G, P) beschreiben. V steht für eine Menge an Variablen, die das zugrundeliegende Problem beschreiben. G steht für einen gerichteten azyklischen Graph (engl.: directed acyclic graph, DAG), dessen Knoten mit den Variablen $v \in V$ übereinstimmen und das BN repräsentiert. P steht für eine Menge an bedingten Wahrscheinlichkeiten (engl.: conditional probability distribution, CPD). Durch eine CPD wird der Einfluss verbundener Knoten aufeinander mittels Wahrscheinlichkeiten beschrieben. Ausgehend davon können Wahrscheinlichkeitsschlussfolgerungen (engl.: probabilistic inference) zu beliebigen, anderen Knoten gezogen werden.

Gerichtete Kanten in einem Graph heißt, dass die Kanten einen Ursprungs- und Zielknoten besitzen. Dies wird mit einem Pfeil dargestellt. Die gerichteten Kanten des Graphen bilden die Beziehungen der Variablen untereinander ab. Ein Graph gilt dabei als azyklisch, wenn es innerhalb des Graphen keinen Zyklus gibt. Ein Zyklus existiert, wenn es möglich ist von einem Knoten A den gerichteten Kanten so zu folgen, dass man wieder in demselben Knoten A endet. Abbildung 3-3 zeigt zwei Beispielgraphen, wobei einer ein gültiger DAG ist und der andere nicht, da hier ein Zyklus vorliegt und zwei Kanten ungerichtet sind.



da ein Zyklus aus den Knoten B-C-E-D besteht und die Kanten zw. E-F und D-F ungerichtet sind

Abbildung 3-3: Beispiele zweier Graphen

Die Knoten eines BNs sind Zufallsvariablen und die Kanten stellen bedingte Wahrscheinlichkeiten dar. Wenn es eine Verbindung zwischen einer Zufallsvariable X_1 und X_2 gibt, sagt man, dass X_1 ein Elternknoten von X_2 ist. Entsprechend wird der Knoten X_2 als Kindknoten von X_1 bezeichnet. Des Weiteren werden zwei verschiedene Arten von Variablen unterschieden, Informationsvariablen (engl.: information variables) und Hypothesenvariablen (engl.: hypothesis variables) [100]. Informationsvariablen sind Variablen des BNs, die die observierten Daten kodieren, d.h. deren Werte sich durch Beobachtung ermitteln lassen. Beispiele hierfür kann die Geschwindigkeit, Entfernung und Bewegungsrichtung eines Fahrzeugs sein. Hypothesenvariablen hingegen können nicht direkt observiert werden. Ihr Wert wird aus den observierten Werten der Informationsvariablen geschlussfolgert. Beispiele hierfür wären die Absicht, die ein Feind verfolgt (z.B. Angriff oder Flucht). Alle Berechnungen innerhalb eines BNs fundieren auf zwei grundlegenden Wahrscheinlichkeitszusammenhängen. Die erste ist die sog. Summenformel:

$$P(X_1) = \sum_{X_2} p(X_1, X_2) \quad (3.1)$$

wobei X_1 und X_2 Zufallsvariablen sind und $p(X_1, X_2)$ die Verbundwahrscheinlichkeit (engl.: joint probability) dieser Variablen. Die Verbundwahrscheinlichkeit ist ein Maß, das die Wahrscheinlichkeit des gleichzeitigen Eintretens der beiden Zufallsvariablen X_1 und X_2 ausdrückt. Die Verteilung $P(X_1)$ wird als Randverteilung (engl.: marginal distribution) bezeichnet.

Die zweite Formel ist die Produktregel:

$$p(X_1, X_2) = p(X_2|X_1)p(X_1) \quad (3.2)$$

mit $p(X_2 \vee X_1)$ als die bedingte Wahrscheinlichkeit (engl.: conditional probability), die angibt, dass die Zufallsvariable X_2 eintritt, gegeben, dass X_1 eingetreten ist. Aus der Produktregel und der Symmetrieeigenschaft von Verbundwahrscheinlichkeiten, d.h. $p(X_1, X_2) = p(X_2, X_1)$ lässt sich das Bayes' Theorem ableiten:

$$p(X_1|X_2) = \frac{p(X_2|X_1)p(X_1)}{p(X_2)} \quad (3.3)$$

Evidenzen

Um in einem BN sinnvolle Schlussfolgerungen ziehen zu können, müssen Daten, die aus dem Problemfeld stammen, in das BN eingespeist werden. Dies geschieht durch Evidenzen bzw. virtuelle Evidenzen.

Als *Evidenz* wird eine Information bezeichnet, die festlegt, welchen Wert der Knoten in einer gegebenen Situation annimmt. Dies kann nur für die Informationsvariablen geschehen, da nur diese Variablen observiert werden können. In der Realität ist es allerdings aus Gründen von Unsicherheiten nicht immer möglich einen Wert exakt bestimmen zu können. Oftmals kann jedoch der Bereich eingegrenzt werden, in welchem sich dieser Wert befindet. Das Resultat ist eine Wahrscheinlichkeitsverteilung um die möglichen Werte. Dies wird dann als *virtuelle Evidenz* bezeichnet.

3.4.1.2 Dynamisches Bayes'sches Netz (DBN)

Ein DBN ist eine Erweiterung eines BNs, indem das gleiche BN mehrmals über diskrete Zeitscheiben hinweg verbunden ist, um die zeitliche Entwicklung der Zufallsvariablen zu modellieren [101]. Damit besteht ein DBN aus einer Folge von mehreren BNs bzw. Zeitscheiben, die den Zustand der Variablen zu einem gegebenen Zeitpunkt t repräsentieren. Typisch bei DBNs ist, dass die sog. Markov-Eigenschaft (engl.: markov property) erfüllt ist, d.h. dass höchstens einen Zeitschritt zurückliegende Werte die aktuellen

Werte beeinflusst [102]. Formal definiert sich ein DBN durch ein Paar (BN_1, BN_{\rightarrow}) . BN_1 definiert die Wahrscheinlichkeiten $P(Z_1)$ innerhalb eines Zeitpunkts und BN_{\rightarrow} definiert ein BN, welches aus zwei Zeitschritten besteht. Formal lässt sich die bedingte Wahrscheinlichkeit $P(Z_t \vee Z_{t-1})$ ausdrücken als

$$P(Z_t|Z_{t-1}) = \prod_{i=1}^N P(Z_t^i | Pa(Z_t^i)), \quad (3.4)$$

wobei Z_t^i der Knoten i zum Zeitpunkt t ist und $Pa(Z_t^i)$ die Elternknoten von Knoten i in dem entsprechenden Graph [101].

Die theoretischen Grundlagen eines (statischen) BNs behalten ihre Gültigkeit und werden nur dahingehend erweitert, dass für jeden Zeitpunkt zwar dasselbe statische BN betrachtet wird, jedoch über zusätzliche zeitliche Kanten mit den vorangehenden BNs verbunden ist. Man bezeichnet die einzelnen diskreten Zeitpunkte auch Zeitscheiben (engl.: time slice). Zu jeder Zeitscheibe existiert ein statisches BN und die bedingten Wahrscheinlichkeitstabellen sind ebenfalls unverändert [100].

3.4.1.3 Inferenzmechanismus

Zweck eines BNs ist es Schlussfolgerungen zu ziehen, d.h. die Berechnung von Wahrscheinlichkeitsverteilungen von Variablen gegeben einer oder mehreren Evidenzen. Man bezeichnet diese Art der Schlussfolgerung unter Unsicherheit auch allgemein als probabilistische Inferenz [103]. Bei einer Repräsentation einer Wahrscheinlichkeitsverteilung $P(X_1, X_2, \dots, X_n)$ über eine Menge an Zufallsvariablen X_1, X_2, \dots, X_n ist formal ausgedrückt die Wahrscheinlichkeit $P(X_i = x|e)$ von Interesse, wobei X_i eine Zufallsvariable aus der Menge ist, die den Wert x annimmt und e eine gegebene Evidenz ist. Es stellt sich jedoch heraus, dass der Vorgang der Inferenz eine Herausforderung darstellt. Betrachtet man die Berechnung von $P(X_1 = x|e)$, so gilt:

$$P(X_1 = x|e) = \sum_{X_2} \sum_{\dots} \sum_{X_n} P(X_1 = x, X_2, \dots, X_n|e) \quad (3.5)$$

Man müsste über alle möglichen Werte der anderen Zufallsvariablen aufsummieren, um diese zu “eliminieren”, was dazu führt, dass die Anzahl der Berechnungen exponentiell mit den Zufallsvariablen und Variablenwerten ansteigt. Es stellt sich jedoch heraus, dass der Vorgang der Inferenz eine Herausforderung darstellt. Denn die Berechnung einer Wahrscheinlichkeit $P(X_i = x \vee e)$ ist ein NP-hartes Problem [39,103]. Es gibt also keine effizienten Algorithmen, die man für jedes beliebige BN anwenden könnte. Für einige

Netzstrukturen bzw. Modellarten gibt es jedoch Algorithmen, die die Inferenz in polynomialer Zeit lösen können. Diese werden in exakte Inferenzalgorithmen (engl.: exact inference algorithms) und approximierte Inferenzalgorithmen (engl.: approximate inference algorithms) kategorisiert. Beispiele für exakte Inferenzalgorithmen sind die Variablenelimination (engl.: variable elimination), Belief Propagation Algorithmus (auch Sum-Product message algorithm genannt), der Verbindungsbaum-Algorithmus (engl.: junction tree algorithm) oder Wahrscheinlichkeitsgewichtung (engl.: likelihood-weighting). Die Algorithmen unterscheiden sich in Geschwindigkeit, Komplexität, Genauigkeit und Anwendungsbereich [101]. Außerdem gibt es noch unterschiedliche Implementierungsansätze zu gleichen Methoden, die für bestimmte Fälle spezialisiert wurden, um die Performance zu steigern.

Bei der Umsetzung des DNBs wurde der Verbindungsbaum-Algorithmus verwendet. Er liefert ein exaktes Ergebnis, ohne mathematische Approximationen [101]. Der Junction Tree Algorithmus ist ein Algorithmus, der klassischerweise für statische BN ausgelegt ist, jedoch kann er auch als Grundlage für Algorithmen zur Schlussfolgerung in DBNs verwendet werden. Die graphische Struktur des BN muss dazu so manipuliert werden, dass aus dem Graphen eine bestimmte Baumstruktur erzeugt wird, welche Verbindungsbaum (engl.: join tree, junction tree, JT) genannt wird. Eine ausführliche Erklärung des Aufbaus dieser Baumstruktur und der Schritte des Verbindungsbaum-Algorithmus werden u.a. im Anhang B von [104] gegeben. Grundidee ist, dass das DBN auf ein großes (statisches) BN zurückgeführt wird, auf dem der Algorithmus angewendet werden kann. Dazu wird das für zwei Zeitschritte definierte DBN so lange durch Ansetzen der in BN_{t-1} definierten Beziehungen zwischen den Zeitschritten erweitert, so dass für jeden benötigten Zeitschritt ein Teilnetz nach BN_t vorhanden ist. Das Prinzip des Zurückführens eines DBN auf ein großes BN wird "ausrollen" (engl.: unroll) genannt und ist schematisch in Abbildung 3-4 dargestellt.

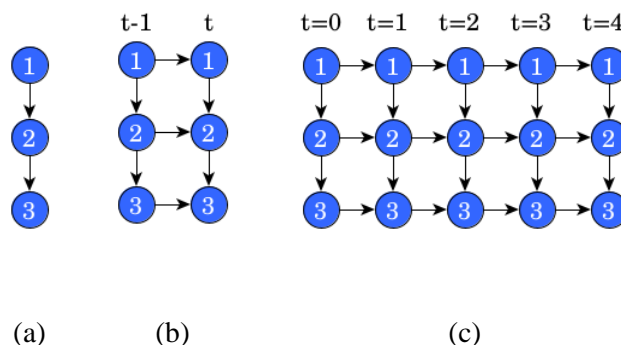


Abbildung 3-4: Graphische Darstellung eines DBNs mit BN_t (a), BN_{t-1} (b) und des für fünf Zeitschritte ausgerollte BNs (c)

3.4.1.4 Bedrohungsmodellierung

Es gibt zwei Arten ein Bayes'sches Netzwerk (BN) zu konstruieren, eine manuelle und automatische (d.h. durch einen Lernprozess von Daten aus einem Datensatz) Konstruktion [105,106]. Die Erstellung eines BNs per Hand erfolgt im Wesentlichen in drei Schritten, der Wahl der Variablen, die für das Lösen eines Problems benötigt werden, der Aufbau bzw. Struktur des BNs und schließlich die Spezifikation von Wahrscheinlichkeitstabellen. Das für die Konzeption entworfene Bedrohungsmodell wurde per Hand erstellt.

Zunächst muss man sich klarmachen, dass der Zweck eines BNs darin besteht für bestimmte Ereignisse Schätzungen zu deren Eintreten abzugeben. Dabei handelt es sich um Ereignisse, die nicht direkt aus der Umgebung beobachtbar oder nur mit einem unverhältnismäßig nicht zu vertretenden großen Aufwand beobachtbar sind. Um eine Abschätzung für das Eintreten dieser Ereignisse vornehmen zu können, greift man auf beobachtbare Informationen zurück, die diese Ereignisse beeinflussen. Man unterscheidet deswegen bei der Konstruktion eines BNs grundsätzlich zwei Arten von Knoten, *Informationsvariablen* und *Hypothesenvariablen* [100].

Informationsvariablen sind Knoten bzw. Variablen, deren Werte beobachtbar sind und damit durch die in das Netz eingehende Daten befüllt werden (z.B. durch Sensordaten). Durch sie wird die zu beurteilende Situation charakterisiert. Im Optimalfall können die Werte aller Informationsvariablen durch die zur Verfügung stehenden Sensoren abgedeckt werden. Sollte dies jedoch nicht möglich und einige Werte unbekannt sein, können diese durch im System hinterlegte Standardwerte geschätzt werden. Dadurch kann das System mit Ungenauigkeiten, wie sie in der Realität häufig vorkommen, umgehen. Allerdings wird auch das Ergebnis damit evtl. ungenauer.

Die Werte der *Hypothesenvariablen* hingegen werden basierend auf den Werten der Informationsvariablen berechnet. Die berechneten Werte spiegeln direkt den Bedrohungsgrad eines militärischen Gegners wider. Aus diesem Grund gibt es auch keine Grenzbereiche, die für Diskretisierungen herangezogen werden, wie bei den Informationsvariablen. Die erste Aufgabe besteht nun darin die für ein Problem relevanten Ereignisse bzw. Variablen zu identifizieren, welche dann in sich gegenseitig ausschließenden Gruppen eingeteilt werden. Diese Gruppen bilden die Hypothesenvariablen. Als Nächstes müssen ausgehend von den Hypothesenvariablen die Informationen bestimmt werden, die etwas über die Hypothesenvariablen aussagen können. Auch diese Informationen werden zusammengefasst und Informationsvariablen herausgebildet. Eine typische Information ist eine Aussage, die angibt, dass sich eine bestimmte Variable in einem bestimmten Zustand befindet. Für jede identifizierte Variable sind die möglichen Zustandswerte zu bestimmen bzw. festzulegen. Nachdem die Variablen für das Modell identifiziert wurden, geht es schließlich darum, die Beziehungen zwischen den Variablen zu analysieren

und damit die kausalen Zusammenhänge zwischen den Variablen zu bestimmen. Diese werden als gerichtete Verknüpfungen in einem Graphen repräsentiert, was das BN darstellt. Dieser Vorgang gestaltet sich bei Weitem nicht immer einfach. Typische Fragen, die man sich bei der Erstellung dieser Beziehungen stellt sind z.B.: “Was könnte diesen Effekt verursachen?” Eine Ausführung von Tipps und Beispielen für die Erstellung eines BNs finden sich in [100].

Die für die DBN verwendeten Variablen und Beziehungen orientieren sich an den untersuchten wissenschaftlichen Arbeiten, insbesondere an den in [97] verwendeten Variablen. Die graphische Darstellung der Topologie ist in Abbildung 3-5 abgebildet. Das DBN besteht aus insgesamt 15 Knoten. In Abbildung 3-6 wird ersichtlich, wie der zeitliche Zusammenhang der statischen BNs modelliert wurde, um das DBN zu erhalten. Dabei wird deutlich, dass jeder Knoten, zeitlich betrachtet, nur sich selbst beeinflusst. Damit soll berücksichtigt werden, dass der Wert der Variablen von einem Zeitpunkt zum nächsten (bei kleinen Zeitschritten) sich nicht beliebig stark ändert. Die zeitliche Komponente soll nur dieses Verhalten widerspiegeln, weswegen auf Verknüpfungen verschiedener Knoten zwischen zwei Zeitpunkten verzichtet wurde. Die Beeinflussung der einzelnen Knoten untereinander wird nur innerhalb eines Zeitpunktes als maßgeblich angesehen.

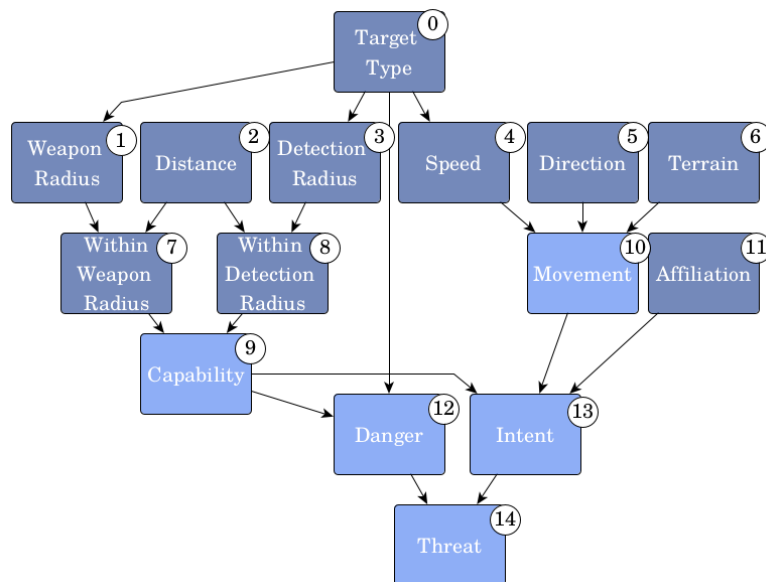


Abbildung 3-5: Topologie des DBN mit durchnummerierten Knoten

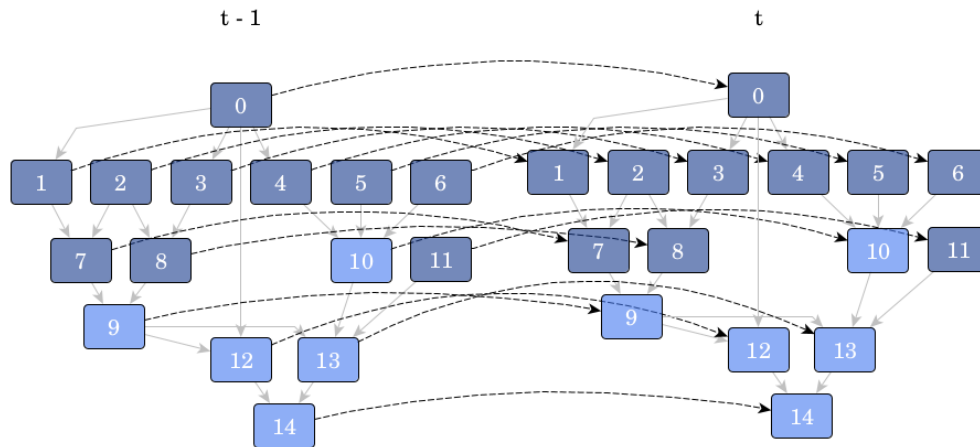


Abbildung 3-6: Zeitlicher Zusammenhang zwischen Knoten des DBN

Die einzelnen Variablen werden im Folgenden näher beschrieben. Dabei werden neben der Beschreibung der Variablen auch die möglichen diskretisierenden Werte angegeben, die jede Variable annehmen kann.

Informationsvariablen

Das DBN besitzt neun Informationsvariablen:

target type: erfasst den grundlegenden Typ der feindlichen Einheit (z.B. Jeep, Panzer, etc.). Die möglichen Werte sind dabei abhängig von den zu erwartenden gegnerischen Einheiten. Die Variable wird durch keine anderen Variablen beeinflusst.

distance: Entfernung d der gegnerischen Einheit zum betrachteten Referenzpunkt. Für diese Variable wurden folgende vier mögliche Werte gewählt: “very close”, “close”, “medium” und “far”. Der Wert der Variablen wird durch keine anderen Variablen beeinflusst. Die Grenzen der Diskretisierung hängen davon ab, ob es sich bei der gegnerischen Einheit um eine Boden- oder Lufteinheit handelt. Diese Information wird aus dem Wert “target type” gewonnen. Die möglichen Diskretisierungen sind in Tabelle 3-1 aufgeführt.

	Bodeneinheiten		Lufteneinheiten	
	a[m]	b[m]	a[m]	b[m]
very close	0	500	0	2000
close	500	2000	2000	5000
medium	2000	20000	5000	35000
far	20000	INF	35000	INF

Tabelle 3-1: Diskretisierungswerte für die Variable distance

weapon radius: effektiver Wirkradius gegnerischer Waffen. Für diese Variable wurden die Diskretisierungswerte “short” (0m - 1.000m), “medium” (1.000m - 3.000m) und “long” (> 3.000m) gewählt. Diese Variable wird ebenfalls durch die Variable “target type” beeinflusst. Ist der “target type” eine Luftabwehrstellung bedeutet dies, dass die Wahrscheinlichkeit für einen gegebenen Waffenradius wesentlich höher ist als beim bei einem einfachen Fußsoldaten.

detection radius: meint den Radius, in welchem die gegnerische Einheit Aufklärung betreiben kann. Für diese Variable sind die Werte “short” (0m - 3.000m), “medium” (3.000m - 7.500m) und “long” (> 7.500m) gewählt worden. Diese Variable wird analog zur Variablen “weapon radius” von “target type” beeinflusst. Bei einer Person ist ein geringerer Aufklärungsradius wesentlich wahrscheinlicher als bei einem Flugabwehrsystem, welches für gewöhnlich über eine Vielzahl an Sensoren verfügt.

speed: beschreibt die Höhe der Geschwindigkeit, mit der sich die gegnerische Einheit fortbewegt. Diese Variable kann die Werte “low”, “medium” und “high” annehmen. Wie auch die Variable “distance” ist die Variable “speed” so modelliert, dass sie nicht durch andere Variablen beeinflusst wird. Die Grenzen der Diskretisierung für Boden- und Lufteneinheiten sind ebenfalls unterschiedlich und in Tabelle 3-2 aufgeführt.

	Bodeneinheiten		Lufteneinheiten	
	a[m/s]	b[m/s]	a[m/s]	b[m/s]
low	0	10	0	50
medium	10	20	50	90
high	20	INF	90	INF

Tabelle 3-2: Diskretisierungswerte für die Variable speed

direction: erfasst die Richtung der Bewegung einer gegnerischen Einheit. Hierzu wird der Winkel zwischen der eigenen und der feindlichen Bewegungsrichtung ausgewertet. Es können folgende Werte angenommen werden: “towards”, “along” und “away”. Auch diese Variable wurde als unabhängige Variable modelliert. Die Grenzen für die Diskretisierung für Boden- und Lufteinheiten sind in Tabelle 3-3 aufgelistet.

	Bodeneinheiten		Lufteinheiten	
	a[°]	b[°]	a[°]	b[°]
towards	0	45	0	35
along	45	100	35	90
away	100	180	90	180

Tabelle 3-3: Diskretisierungswerte für die Variable direction

terrain: beschreibt die Beschaffenheit des Geländes und wie sich diese auf die Bewegung der gegnerischen Einheit auswirkt. Die Diskretisierung erfolgt anhand der mittleren Steigung des Geländes um diese Einheit im Umkreis von 1.000m. Es sind die Werte “hinderling” (> 40%), “medium” (15% - 40%) und “flat” (0% - 15%) möglich.

within weapon radius: beschreibt, ob sich der betrachtete Referenzpunkt innerhalb des Waffenradius des militärischen Gegners befindet. Dabei wird die Entfernung zwischen dem Referenzpunkt und der gegnerischen Einheit berechnet und mit dem Waffenradius dieser Einheit verglichen. Die Variable kann folgende Werte annehmen: “within” (Entfernung < Waffenradius), “close” (Entfernung < 2 * Waffenradius), “surrounding” (Entfernung < 4 * Waffenradius) und “far” (Entfernung > 4 * Waffenradius). Die Variable wird durch die Variablen “distance” und “weapon radius” beeinflusst. Die Annahme ist, dass eine geringe Entfernung und hoher Waffenradius die Wahrscheinlichkeit, dass sich der Referenzpunkt innerhalb des Waffenradius befindet erhöht, während eine große Entfernung und kleiner Waffenradius zu einer geringeren Wahrscheinlichkeit führen, sich innerhalb des Waffenradius zu befinden.

within detection radius: funktioniert analog zu der Variablen “within weapon radius”, bezeichnet allerdings den Detektierungsradius einer gegnerischen Einheit. Analog zur Variablen “within weapon radius” kann diese Variable folgende Werte annehmen: “within” (Entfernung < Detektierungsradius), “close” (Entfernung < 2 * Detektierungsradius), “surrounding” (Entfernung < 4 * Detektierungsradius) und “far” (Entfernung > 4 * Detektierungsradius). Die Variable wird durch die Variablen “distance” und “detection radius” beeinflusst.

affiliation: beschreibt die wahrgenommene Gesinnung des militärischen Gegners und wird von keiner anderen Variable beeinflusst. Mögliche Werte sind “unknown”, “neutral” oder “enemy”.

Hypothesenvariablen

Folgende fünf Hypothesenvariablen wurden für das DBN definiert:

capability: beschreibt, wie groß die Fähigkeit der feindlichen Einheit ist, ihr Waffensystem zum Einsatz zu bringen. Mögliche Werte sind “low”, “medium” und “high”. Die Variable wird durch “within weapon radius” und “within detection radius” beeinflusst. Befindet sich der Referenzpunkt innerhalb des Waffenradius und des Aufklärungsradius ist die Wahrscheinlichkeit groß, dass der Gegner die Fähigkeit besitzt, sein Waffensystem einzusetzen. Ist der Referenzpunkt allerdings außerhalb des Waffenradius oder des Aufklärungsradius sinkt diese Wahrscheinlichkeit.

movement: bezieht sich auf die Bewegung der gegnerischen Einheit. Über die Bewegung lassen sich Rückschlüsse über dessen Absicht ziehen, weswegen die Variable die Werte “irrelevant”, “considerable” und “relevant” annehmen kann. Sie wird beeinflusst durch “speed”, “direction” und “terrain”. Mit diesen Beziehungen wird die Annahme abgebildet, dass z.B. eine Bewegung weg vom Referenzpunkt, eine langsame Geschwindigkeit oder eine Bewegung durch hinderliches Gelände für eine geringe Wahrscheinlichkeit spricht, dass ein Gegner eine relevante Bedrohung darstellt. Dagegen steht eine hohe Geschwindigkeit in Richtung des Referenzpunktes im flachen Gelände für eine hohe Wahrscheinlichkeit, dass dieser Gegner als relevante Bedrohung einzustufen ist.

danger: repräsentiert, wie groß die Gefahr ist, die von einer Einheit ausgeht. Mögliche Werte sind “low”, “medium” und “high”. Beeinflusst wird die Variable durch die Werte der Variablen “capability” und “target type”. Die Beziehungen sollen den Zusammenhang widerspiegeln, dass die Gefahr des Feindes davon abhängt, welches Waffensystem erwartet werden kann. So kann trotz einer hohen Fähigkeit, das Waffensystem einzusetzen, die vom Gegner ausgehende Gefahr für einen Referenzpunkt gering sein, wenn es sich um einen weniger gefährlichen Einheitentyp handelt. Eine Person mit Handfeuerwaffe beispielsweise kann so modelliert werden, dass sie eine geringere Gefahr darstellt, auch wenn sie in der Lage wäre, die Waffe einzusetzen. Ein Gefechtspanzer mit einem hochwertigen Waffensystem kann dagegen eine beachtliche Gefahr darstellen, selbst dann, wenn er bezogen auf den Referenzpunkt nur begrenzt in der Lage wäre, diese einzusetzen.

intent: bildet die Absicht des Gegners ab, den Referenzpunkt anzugreifen. Die möglichen Werte sind “low”, “medium” und “high”. Diese Variable ist der Kindknoten von “capability”, “movement” und “affiliation”. Es wird davon ausgegangen, dass eine irrelevante Bewegung die Wahrscheinlichkeit für eine

geringe Absicht erhöht. Ebenso wird angenommen, dass eine geringe Fähigkeit das Waffensystem einzusetzen für eine geringe Angriffsabsicht spricht.

threat: stellt die entscheidende Variable für die Auswertung des Bedrohungsgrads einer Einheit bezogen auf einen Referenzpunkt dar. Sie gibt an, ob die Einheit eine Bedrohung ist oder nicht. Ausgehend von den Variablen “danger” und “intent” wird geschlussfolgert, ob eine Bedrohung besteht. Bei einer hohen Gefahr und einer relevanten Absicht eines Angriffs wird davon ausgegangen, dass die Wahrscheinlichkeit für eine Bedrohung hoch ist.

Sobald die Struktur des BNs erstellt wurde, gilt es für jeden Knoten die bedingte Wahrscheinlichkeitsverteilung (engl.: conditional probability distribution, CPD) anzugeben. Die Grundlage für die Bestimmung dieser Wahrscheinlichkeiten kann eine erkenntnistheoretische Basis haben, die von einer fundierten Theorie über eine Häufigkeitsverteilung in Werten, die aus Datenbanken stammen, bis hin zu subjektiven Schätzungen reichen kann [100]. Eine typische Repräsentation dieser CPD ist bei diskreten Variablen über bedingte Wahrscheinlichkeitstabellen (engl.: conditional probability tables, CPT). In einer CPT werden alle möglichen Kombinationen der Werte der Elternknoten aufgezählt und jeder dieser Kombinationen eine Wahrscheinlichkeitsverteilung zugewiesen. Dabei ist anzumerken, dass, wenn ein Knoten keine Elternknoten besitzt, die Tabelle die unbedingte Wahrscheinlichkeitsverteilung der zugehörigen Variablen angibt. Zusätzlich gilt, da die Tabelle eine Wahrscheinlichkeitsverteilung eines Knotens erfasst, nach Axiom 1 Kolmogorows [107], dass die Werte der Tabelle sich auf 1.0 summieren müssen. Damit erfasst zwar eine CPT alle möglichen Eintrittskombinationen der Elternknoten und gibt für diese die Wahrscheinlichkeitsverteilung an, doch kann diese Art der Repräsentation sehr aufwändig werden, wenn viele Elternknoten beteiligt sind. Wenn z.B. eine Variable A , die einen Elternknoten B besitzt und die Werte a_1, a_2, \dots, a_n bzw. B die Zustandswerte b_1, b_2, \dots, b_m annehmen kann, enthält die CPT für die Wahrscheinlichkeit $P(A \vee B)$ nm Einträge [100]. Würde man einen zweiten Elternknoten C hinzunehmen, der die Werte c_1, c_2, \dots, c_k annehmen kann, wäre die Anzahl nmk . Bei einer gleichen Anzahl an möglichen Zustandswerten n für alle Variablen würde sich daraus n^3 ergeben. Die Anzahl der Verteilungen, die für die Definition einer CPT notwendig sind, ist damit exponentiell zur Anzahl der Elternvariablen.

Eine Herausforderung, die sich bei Knoten/Variablen mit kontinuierlichen Werten ergibt ist deren Handhabung in einem BN. Viele Lernalgorithmen von BNs sind so ausgelegt, dass sie mit diskreten Werten arbeiten. Es gibt drei Arten, wie man mit kontinuierlichen Daten in einem BN umgehen kann [108]. Die erste Methode besteht darin jede kontinuierliche Variable durch eine Abbildung der bedingten Wahrscheinlichkeit mittels parametrischer Verteilungen umzusetzen. Dafür ist eine Anpassung der Lernalgorithmen des BNs notwendig. Die zweite Methode verwendet nicht-parametrische Verteilungen, wie z.B. Partikelrepräsentationsfunktionen. Die dritte Methode besteht darin die kontinuierlichen

Wertebereiche zu diskretisieren. Eine gängige Methode ist dabei den Wertebereich in gleich große Intervalle einzuteilen. Jeder dieser Intervalle stellt dann einen diskreten Wert dar und die Wahrscheinlichkeitsverteilung kann für diese Variablen ebenfalls durch eine CPT ausgedrückt werden. Diese Variante wird auch für die Umsetzung des Agentensystems herangezogen. Die für die Diskretisierung verwendeten Grenzwerte sind jedoch keine harten Grenzen, da bei harten Grenzen bereits kleine Änderungen eines Variablenwerts um einen bestimmten Grenzwert herum zu großen Sprüngen bei anderen Variablen, die eine Abhängigkeitsbeziehung zu einer anderen Variablen haben, führen können. Um ein derartiges Sprungverhalten zu unterbinden und ein realitätsnäheres Empfinden nachzubilden, wird ein Bereich um die Grenzwerte festgelegt, innerhalb dessen die Wahrscheinlichkeitsverteilung für virtuelle Evidenzen linear interpoliert werden. Die Beschreibung dieser Wertebereiche geschieht unter Verwendung von trapezförmigen und R-förmigen Funktionen, wie sie u.a. in der Fuzzy-Logik angewendet werden. Es wird dabei sichergestellt, dass die resultierende Werte die Bedingungen einer Wahrscheinlichkeit erfüllen, d.h. die Axiome von Kolmogorow erfüllt werden. Diskrete Werte, die den Beginn eines Wertebereichs und das Ende einer Variablen definieren werden über R-Funktionen beschrieben. Die R-Funktion ist definiert als

$$f_R(x) = \begin{cases} 1, & \text{if } x < \zeta \\ \frac{\eta - x}{\eta - \zeta}, & \text{if } \zeta \leq x \leq \eta \\ 0, & \text{if } x > \eta \end{cases} \quad (3.6)$$

Die Parameter $\zeta, \eta \in R$ legen dabei den Grenzbereich für den Übergang zwischen diskreten Variablenwerten fest.

Alle anderen diskreten Variablenwerte, die zwischen dem Anfang und dem Ende eines Wertebereichs liegen, werden jeweils über eine trapezförmige Funktion beschrieben. Formal ist sie definiert als

$$f_{Trapez}(x) = \begin{cases} 0, & \text{if } x < \alpha \\ \frac{x - \alpha}{\beta - \alpha}, & \text{if } \alpha \leq x \leq \beta \\ 1, & \text{if } \beta \leq x \leq \gamma \\ \frac{\delta - x}{\delta - \gamma}, & \text{if } \gamma \leq x \leq \delta \end{cases} \quad (3.7)$$

Analog zur R-Funktion legen die Parameter $\alpha, \beta, \gamma, \delta \in R$ die Übergänge der Grenzbereiche der diskreten Variablenwerte fest.

Die Funktionen erlauben es “weiche” Übergänge zwischen den diskreten Variablenwerten zu beschreiben. Es wären auch andere Funktionen denkbar, die eine Wahrscheinlichkeitsverteilung definieren, doch bietet die Verwendung dieser Funktion eine einfache Möglichkeit die Verteilung abzubilden und ist leicht parametrisierbar. Ein Anwendungsbeispiel ist in Abbildung 3-7 zu sehen.

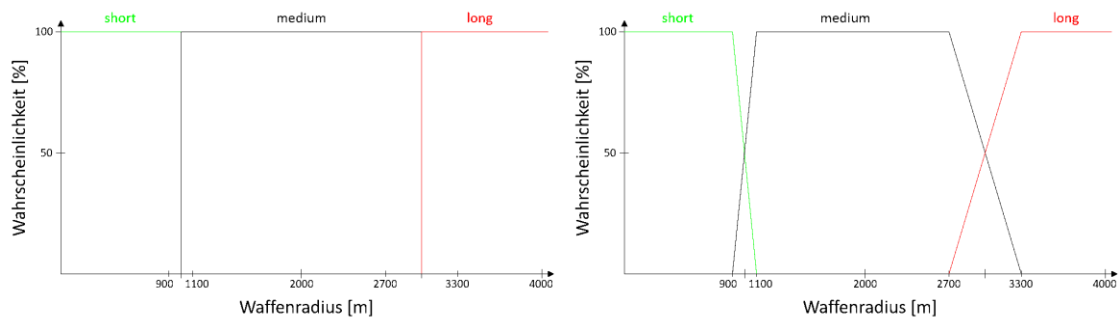


Abbildung 3-7: Harte Grenzwerte (links) gegenüber weichen Grenzübergängen (rechts) zwischen den Variablenwerten

Hat man das Netzwerk und die Wahrscheinlichkeiten spezifiziert, kann mittels der Anwendung von Bayes Theorem die Wahrscheinlichkeit durch das Modell propagiert werden.

3.4.2 Situationsrepräsentationsmodell

In der Literatur finden sich viele verschiedene Methoden für die Modellierung des Wissens zu Situationen. Beispiele enthalten insbesondere die in Kap. 2.6.1 erwähnten Arbeiten. Probabilistische Modelle bilden eine Gruppe von Methoden, die dabei angewendet werden. Arbeiten, wie [76] oder [91], in der ein BN^2 für die Bedrohungsanalyse verwendet wird, kann zu dieser Kategorie gezählt werden. Ontologien bilden ebenfalls einen Ansatz zur Wissensrepräsentation. Neben [83] findet sich ein Beispiel dafür in [109], in der eine Ontologie-basierte Methode genutzt wird, um eine Gefechtssituation zu repräsentieren und anhand derer Schlussfolgerungen über das taktische Vorgehen gezogen werden. Auch

² In diesem Zusammenhang bezeichnet man Bayes'sche Netze auch als Belief Networks um probabilistisches Wissen zu kodieren (Pearl 1988)

auf der Logik basierende Ansätze finden Anwendung, z.B. in [77]. Einen Überblick über verschiedenen Methoden zur Situationsmodellierung gibt [110], in der Methoden in sog. spezifikationsbasierte (engl.: specification-based) und lernbasierte (engl.: learning-based) Techniken eingeteilt werden. Spezifikationsbasierte Techniken zeichnen sich demnach dadurch aus, dass Situationen explizit modelliert werden und auf deren Repräsentation Inferenzen durchgeführt werden. Lernbasierte-Techniken umfassen Methoden, die komplexe Zusammenhänge zwischen Situationen und Sensordaten erlernen können (z.B. aus verfügbaren Datensätzen oder Simulationen). Letztere Kategorie umfasst zwar flexiblere Methoden als spezifikationsbasierte Techniken, doch haben sie zum Nachteil, dass sie keine formale und explizite Repräsentation einer Situation bereitstellen und der Mensch damit Schwierigkeiten hat Entscheidungen des Systems nachvollziehen zu können. Ein prominentes Beispiel ist das in Kap. 1 erwähnte Arbeit am Spiel Go, in dem ein maschineller Lernansatz verwendet wurde.

Auch in Computerspielen ist die Modellierung von Wissen aus der Umgebung eine Herausforderung, damit ein Agent auf dieser Basis logische Schlussfolgerungen ziehen und Entscheidungen treffen kann. Dies kann z.B. einfache Wegplanungen beinhalten, aber auch Bewertungen über taktische Verhaltensweisen, wie Angriffstaktiken. Die Verarbeitung dieses Wissens in einer geeigneten, effizienten Weise stellt eine Herausforderung dar, insbesondere dann, wenn es sich um große Karten und einer großen Anzahl an Einheiten handelt. In Computerspielen und auch in militärischen Einsatzgebieten umfasst das Wissen v.a. räumliche Informationen (z.B. Wo befinden sich befreundete/gegnerische Einheiten? Wo sollten eigene Einheiten (nicht) sein? Wo lassen sich verfügbare Ressourcen am wirkungsvollsten einsetzen? ...). Aus diesem Grund eignet sich die Domäne der Computerspiele, um die Recherche von Methodenansätzen zu fokussieren. Influence Maps stellen dabei ein gängiges Werkzeug dar, um räumliche Zusammenhänge abzubilden. Sie haben sich aus Arbeiten an dem Spiel Go entwickelt [111] und wurden seither vermehrt in Videospielen, insbesondere Strategiespielen, eingesetzt, um räumliche sowie temporale Informationen zu repräsentieren und darauf Entscheidungsalgorithmen anzuwenden mit dem Ziel bestimmte KI-Verhalten zu erzeugen [112].

3.4.2.1 Influence Maps

Bei einer **Influence Map (IM)** handelt es sich um eine Diskretisierung eines Raums mittels eines Graphen, welcher über die Umgebung gelegt wird. Häufig wird ein zweidimensionales Zellgitter gewählt, das über die Umgebung aufgespannt wird. Die verwendete Zellenform, die dieses Gitter ausmacht, ist dabei nicht vorgegeben. Gängig sind Quadrate bzw. Rastergitter, es sind jedoch auch hexagonale Zellen denkbar. Bei der Erstellung einer IM gibt es grundlegend drei Bestandteile. Grundlage bilden Zahlenwerte, die einzelnen Zellen zugewiesen werden. Diese Werte sind messbare oder berechenbare skalare Werte, die sich über das Zellgitter verteilen und bestimmte Informationen bzw. Wissen zu einem Sachverhalt an einem

bestimmten Ort repräsentieren. Man nennt einen solchen Wert auch Einfluss (engl.: influence), da es sich um einen Einfluss des Sachverhalts an diesem Ort handelt. Die Werte bzw. Einflüsse können schließlich über entsprechende Funktionen in ihrer Umgebung propagiert werden. Dabei definieren die Funktionen das Verteilungsverhalten, d.h. sie geben an, wie sich die Werte über den Raum und Zeit von der ausgehenden Zelle verändern. Es ist z.B. durchaus üblich, dass Werte mit zunehmendem Abstand zur ausgehenden Zelle reduziert werden. Schließlich gibt es als letzten Bestandteil Anfragemechanismen mittels derer ein Agent Schlussfolgerungen ziehen und Entscheidungen treffen kann [112].

Eine zentrale Stärke von IMs ist, dass sie v.a. räumliches Wissen über die aktuelle Situation darstellen und zusammenfassen können. Dabei steht jede IM für eine eigene Bedeutung und bildet das zugehörige Wissen ab (siehe Abbildung 3-8).

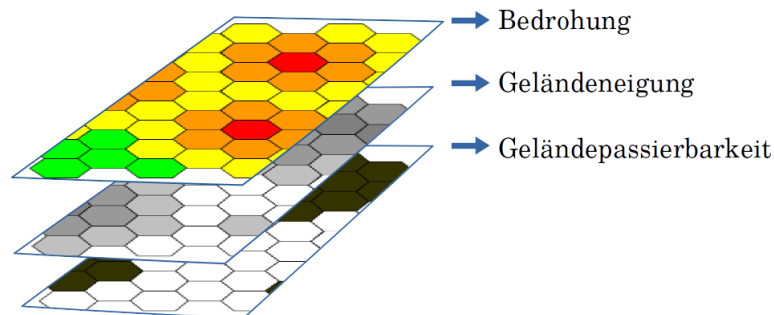


Abbildung 3-8: Jede IM repräsentiert einen bestimmten Sachverhalt

Mittels geeigneter Kombinerungsalgorithmen bzw. Funktionen ist man zudem in der Lage Wissen zu verschiedenen Sachverhalten zu kombinieren und daraus neues Wissen zu generieren. Dieses höher aggregierte Wissen wird wiederum in einer oder mehreren IMs repräsentiert, die man auch **Desirability Maps (DM)** nennt, da sie meist für Schlussfolgerungen und Abfragen verwendet werden. Ein konkretes Beispiel zweier IMs, die zu einer DM kombiniert werden ist in Abbildung 3-9 dargestellt.

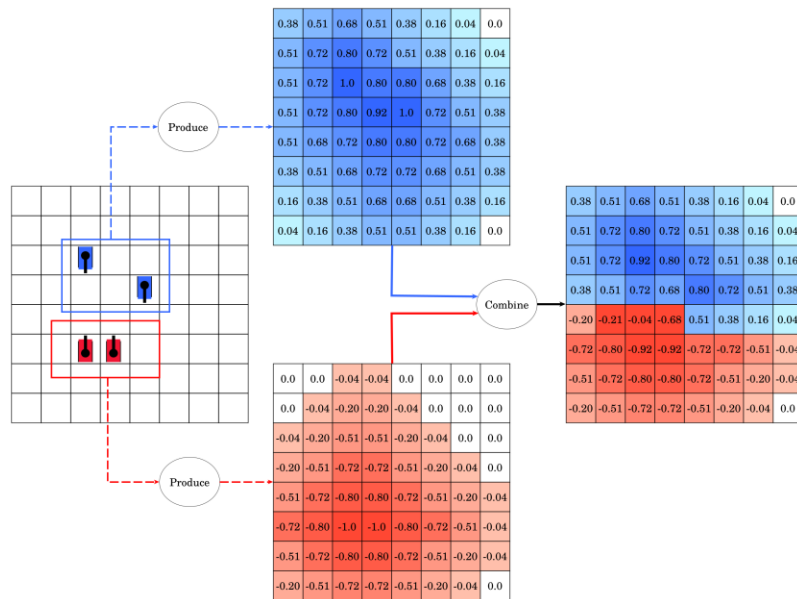


Abbildung 3-9: Beispiel einer Kombination zweier IMs zu einer DM. Links die Ausgangssituation mit Positionsangaben von Einheiten, Mitte die jeweilige IM der militärischen Stärke der blauen und roten Einheiten; Rechts die resultierende DM nach Kombination der zwei IMs

Aufgrund der durch die eigens definierten Berechnungsmodelle und Kombinerungsalgorithmen lassen sich IMs nicht eindeutig zu spezifikationsbasierte oder lernbasierte Techniken einordnen. Je nachdem, ob lernbasierte Methoden für die Berechnung von IMs/DMs eingesetzt werden, können IMs entweder der einen oder anderen Kategorie zugeordnet werden. Weiterhin können damit auch historische Statistiken über das Geschehen eines bestimmten Zeitraums gespeichert und Vorhersagen zu zukünftigen Entwicklungen in der Umwelt getroffen werden. IMs bieten eine intuitive und diskretisierte Darstellung des Wissens des Agenten über räumliche und zeitliche Merkmale eines bestimmten Gebiets, welche es dem Agenten ermöglichen, eine taktische Perspektive auf den aktuellen Umweltzustand einzunehmen. Dieser Vorteil ist in Hinblick auf eine taktische Situationsbewertung von entscheidender Bedeutung. Aus diesem Grund wurden bei der Umsetzung des mentalen Modells des Agenten IMs verwendet.

3.4.2.2 Situationsmodellierung mit IMs

Bei der Modellierung von Situationen gibt es einige Herausforderungen bei der Erstellung von IMs zu beachten. Wesentliche Fragen, die man sich bei der Erstellung einer IM stellen muss, umfassen u.a.:

- Welche Sachverhalte sollen repräsentiert werden?

- Wie kann ein Sachverhalt repräsentiert werden (z.B. durch messbare Größen und/oder Anwendung von Berechnungsmodellen)?
- Sollten die Werte propagiert werden? Falls ja, auf welche Weise sollen sie im Raum propagiert werden und wie ändern sie sich dabei (z.B. Sinkrate mit zunehmendem Abstand zur Quelle, linear, polynomiell oder gar nicht, d.h. der Einfluss bleibt konstant)?
- Wie hängen die Sachverhalte untereinander zusammen bzw. wie sollte man sie kombinieren?
- Wie hoch sollte die Auflösung des Zellgitters sein, um die Umgebung zu diskretisieren?

Vor allem der letzte Punkt in dieser Aufzählung hat einen großen Einfluss auf die Verwendbarkeit von IMs. Es gibt darüber hinaus auch noch weitere Herausforderungen, die auch unmittelbar miteinander zusammenhängen. Diese umfassen neben der Granularität bzw. dem Detailgrad die Berechnungsdauer und den Speicherbedarf der IMs. Der Detailgrad kann je nach Größe des Zellgitters einen erheblichen Einfluss auf die Berechnungsdauer haben. Je kleiner die Zellgröße des Gitters einer IM, desto mehr Details können abgebildet werden und die Berechnungen erreichen damit eine höhere Genauigkeit. Allerdings nimmt auch die Anzahl der Zellen zu, was die Berechnungsdauer einer IM ebenfalls erhöht. Auf der anderen Seite wird zwar die Berechnungsdauer durch größere Zellen verringert, allerdings verliert man dadurch auch einen gewissen Detailgrad. Auch muss beachtet werden, dass IMs nur temporär die aktuelle Lage einer Situation abbilden, da sich Einheiten bewegen und damit ihre Positionen ändern, was erneute Berechnungen der IMs erfordert. Hier gilt es einen geeigneten Kompromiss zu finden, der dem Zweck der Anwendung gerecht wird. Bei der Berechnung des Einflusswerts selbst sind ebenfalls viele Teilberechnungen notwendig, u.a. die Distanz der Ursprungszelle zu jeder Zelle, zu denen der Einfluss propagiert werden soll und der resultierende Einfluss in diesen Zellen entsprechend der verwendeten Propagierungsfunktion.

- Die Distanz der Quelle zu jeder Zelle, sollte der Wert im Raum propagiert werden
- Der Wert des Einflusses entsprechend der verwendeten Propagierungsfunktion

Zwar sind diese Berechnungen einzeln betrachtet nicht zwangsweise ressourcenintensiv (abhängig von der verwendeten Propagierungsfunktion), doch nimmt die Anzahl der Berechnungen mit zunehmender Größe des Zellgitters und der Entitäten stark zu. Bei einer Kartengröße von 15×15 hätte man bereits 255 Berechnungen, würde man einen Zellwert über die gesamte Karte propagieren wollen. Mit einer Anzahl von nur 10 Entitäten, wobei jede Entität einen Einflusswert generiert, würde diese Berechnungszahl bereits 2550 erreichen. Man muss sich also gut überlegen, welche Auflösung des Zellgitters notwendig ist. Dieser ist auch stark davon abhängig von der Größe des Einsatzgebiets und in welchem Kontext die IMs

verwendet werden sollen. In einer urbanen Umgebung ist man aus Sicht von Bodentruppen auf mehr Details angewiesen als bei Lufteinsatzszenarien.

3.4.2.3 IM-Definitionen

Bei der Modellierung der IMs wurden für die Identifizierung relevanter Informationen die METT-TC Missionsvariablen (vgl. Kap. 2.3.3) als Orientierungsrichtlinie hinzugezogen [113]. Aus Gründen der Vereinfachung wurden die Faktoren zu Wetter (engl.: weather) und zivile Betrachtungen (engl.: civil considerations) ausgeblendet. Weiterhin hat man sich bei den anderen Variablen auf weniger Aspekte beschränkt, um die Komplexität der verschiedenen Einflussfaktoren beherrschbar zu lassen. Zu der Variable *Mission* können **IM zu Marschrouten** gezählt werden, da diese direkt mit dem Missionsziel zusammenhängen. Unter die Kategorie *Enemy* fallen die **IM zu Historischen Konflikten**, die **IM zur Bewegungstendenzen** und die **IMs zur Bedrohung**. Bei der Variable *Terrain & Weather* wurden wie bereits erwähnt wetterrelevante Informationen ignoriert. Unter diese Kategorie fallen die **IMs zu Terrainbezogene Daten**. Für die Variable *Troops* können die IMs gezählt werden, die unter **IMs zu eigenen Truppen** aufgeführt werden. Schließlich wurden bei der Variable *Time* Informationen identifiziert, die unter **IMs zu zeitlichen Faktoren** erläutert werden. Schließlich werden unter **IM zur Aufklärung** IMs zum wichtigen Aspekt der Aufklärung (vgl. Kap. 2.4) beschrieben.

IMs zu Terrainbezogene Daten

Terrainbezogene IMs enthalten v.a. Informationen über die Region, die beständig sind und sich über die Zeit hinweg nicht ändern. Dazu zählen v.a. topographische Daten, wie Höhenlagen, Geländeneigungen, Berge, Wasserwege, usw., und Infrastrukturdaten, wie Straßenzüge oder relevante urbane Gebiete.

Geographie- und Infrastrukturdaten sind in Datenbanken (Geo Data) hinterlegt, auf die der Agent Zugriff hat. Sie beinhalten Daten zur Geländehöhe, Geländeneigung, Straßenzüge, Flussverläufe, usw.

Anfragen zu georeferenzierten Daten erfolgt über den Geo Data Manager. Er nimmt Anfragen entgegen und lädt die entsprechenden Daten aus der Datenbank. Für die Erstellung bzw. Generierung der IMs, die die **Höhen- und Neigungsdaten** (Height und Slope) beinhalten, wird beispielsweise über die Zellen des diskretisierten Zellgitters iteriert und für jede Zelle das umgebende Rechteck bestimmt. Dieses Rechteck definiert den abzufragenden Bereich der Daten. Diese werden gemittelt und der jeweiligen Zelle als Wert zugewiesen. Bei der IM für Gebirge (IM-Mountain) wird überall der Wert 1 gesetzt, wenn sich die Zelle zu einem bestimmten Prozentsatz mit dem Gebiet eines Gebirges überschneidet, andernfalls ist der Wert 0. Die IM-Mountain ist Grundlage für die Berechnung einiger weiterer IMs, indem darauf verschiedene Kombinerungsalgorithmen angewendet werden.

So werden Gebirgshänge über einen Kombinerungsalgorithmus zur Kantenbestimmung bestimmt, der auf die IM der Gebirge angewendet wird bestimmt. Der Algorithmus setzt die Zellwerte der IM-Mountain auf 0, wenn diese nur Nachbarszellen besitzt, die ebenfalls Teil eines Gebirges sind. Befahrbar zusammenhängende Regionen (Moveable Regions) werden über einen Kombinerungsalgorithmus ermittelt, der einen Flutfüllungsalgorithmus (engl.: flood fill)³ auf die IM der Gebirge anwendet. Dieser Algorithmus findet Zellen, die zusammenhängen, d.h. den gleichen Einflusswert besitzen. Engpässe/Täler werden ebenfalls über einen Kombinerungsalgorithmus ermittelt. Sie bilden eine wichtige Charakteristik im Gelände ab, da sie aufgrund ihrer Beschaffenheit strategisch wichtige Gebiete für mögliche Hinterhalte darstellen.

IM zu Historischen Konflikten

Das historische Konfliktbewertungsmodul (Historic Conflict Assessment) berechnet für ein gegebenes Missionsgebiet die Bedrohung, die aus vergangenen Konflikten in dieser Region resultiert. Um die IM der **historischen Konflikte** (Historic Conflict) zu berechnen, wurde die Datenbank “Global Terrorism Database” (GTD) [114] herangezogen. Es handelt sich dabei um eine öffentlich zugängliche Datenbank, die Informationen über terroristische Anschläge weltweit beginnend von 1970 bereitstellt. Jeder Vorfall enthält u.a. Informationen über georeferenzierte Orte und anderen beschreibenden Merkmalen, wie die verwendeten Waffen, die zum Einsatz kamen, die Anzahl der Todesopfer, Verletzte etc. Die bereitgestellten Informationen basieren auf verschiedenen Nachrichtenquellen, die analysiert wurden/werden, die allerdings nur herangezogen werden, sofern diese vorher geprüft wurden und es sich dabei um vertrauenswürdige Quellen handelt. Aus den historischen Ereignissen werden mit Hilfe eines einfachen Berechnungsmodells eine Bedrohungsschwere berechnet, um das Wissen über historische Konflikte zu repräsentieren. Dazu werden die Anzahl der Todesopfer und die Summe der Waffenbedrohungsschwere aller in dem Konflikt verwendeten Waffen summiert. In dem Datensatz können für jeden Eintrag bis zu vier verschiedene Waffentypen eingetragen werden. In dem hier vorgestellten Ansatz wird die Bedrohungsschwere eines i -ten historischen Konflikts s_i formal definiert als

$$s_i = k_i + \sum_{w \in W_i} p(h|w)d_w \quad (3.8)$$

wobei $k_i \in N$ die Anzahl der Todesopfer für den Konflikt i sind, $w \in W_i$ der verwendete Waffentyp von allen an dem Konflikt eingesetzten Waffentypen W_i , $p(h|w)$ ist die Wahrscheinlichkeit die eigene Einheit

³ <https://de.wikipedia.org/wiki/Floodfill>

(z.B. Helikopter) h mit dem Waffentyp w zu treffen und $d_w \in R$ ist die Schwere des Schadens, die ein Treffer mit dem Waffentyp w verursacht. Die Werte von $p(h|w)$ und d_w werden als gegeben angenommen (z.B. über die Anfrage an einer Datenbank).

Für ein gegebenes Einsatzgebiet werden alle dort stattgefundenen historischen Konflikte abgefragt und die Zellen bestimmt, in denen sie sich ereignet haben. In einigen Zellen können dabei mehrere Konflikte zugeordnet sein. Um den historischen Bedrohungswert zu erhalten, werden deswegen die einzelnen historischen Bedrohungswerte über sämtliche in einer Zelle stattgefundenen Konflikte akkumuliert.

Sobald die historischen Bedrohungswerte berechnet wurden, erfolgt ein Propagierungsschritt. Dabei wird über alle Zellen, zu denen ein Bedrohungswert errechnet wurde iteriert und dieser Wert radial über das Zellgitter propagiert, wobei der Einflusswert mit zunehmendem Abstand zur Ursprungszelle reduziert wird. Der maximale Radius ergibt sich aus dem effektiven Waffenradius aller in der jeweiligen Zelle eingesetzten Waffentypen. Die Schritte der Propagierungsfunktion sind im Algorithmus im Anhang A.5.1 aufgeführt.

Für die Propagierung der historischen Bedrohungswerte wurde eine nichtlineare Funktion gewählt, die den Bedrohungswert mit zunehmender Distanz zur Ursprungszelle radial reduziert. Dabei unterschreitet der Wert allerdings nicht den Durchschnittswert, der sich aus allen berechneten historischen Bedrohungswerten ergibt. Formel lässt sich diese Berechnung ausdrücken als

$$I_{h_{x,y}} = I'_{h_{x,y}} + \max \quad (3.9)$$

wobei $I_{h_{x,y}} \in R$ der historische Bedrohungsgrad an der Zellposition (x, y) ist, $I'_{h_{x,y}} \in R$ ist der Bedrohungsgrad aus dem vorherigen Iterationsschritt, $D((x, y), (x', y')) \in R$ ist die euklidische Distanz zwischen der Zelle (x, y) und der Zelle (x', y') , wobei die Distanzberechnung anhand der Zentrumsunkte der Zellen erfolgt. Der Variable $d_m \in R$ ist die maximale Distanz bzw. der Radius, die/der angibt, wie weit von der Ursprungszelle der Wert propagiert werden soll. Aus der Formel ist ersichtlich, dass zu dem vorherigen Bedrohungswert $I'_{h_{x,y}}$ ein neuer Einflusswert addiert wird. Einflüsse verschiedener historischer Konflikte summieren sich auf diese Weise auf, wenn sie die gleiche Zelle beeinflussen.

IM zu Bewegungstendenzen

Ein weiteres Modul, welches für die Berechnung der IMs verwendet wird, ist das Modul zur Abschätzung von Feindbewegungen. Die Beweglichkeit im Gelände bzw. die *Geländefähigkeit* eines Fahrzeugs (engl.: Cross-Country-Mobility, CCM) ist bei dieser Schätzung ein wesentlicher Einflussfaktor. Diese hängt von vielen geographischen, meteorologischen, technischen und persönlichen Faktoren ab. Die

Bestimmung dieser Faktoren stellt eine Herausforderung dar. In der Wissenschaft finden sich hierzu auch einige Arbeiten, die sich mit dieser Thematik explizit auseinandersetzen, z.B. [115] und [116]. Bei der Berechnungsgrundlage der CCM wurde eine vereinfachte Herangehensweise gewählt. Die Geländefähigkeit wird in einem Berechnungsmodell anhand von der Neigung im Gelände getroffen. Entsprechend der Geländeneigung wird ein Geländefaktor gesetzt, um die Geländefähigkeit zu repräsentieren. Wasserwege, z.B. Flüsse, Seen, etc. werden dabei als nicht befahrbar angesehen und ausgeschlossen. Es wurden drei Beweglichkeitskategorien zur Bestimmung eines Geländefaktors eingeführt:

- **Befahrbar (GO areas):** zwischen 0 und einschließlich 15 Grad Geländeneigung
- **Langsam befahrbar (SLOW GO areas):** zwischen 15 und 35 Grad Geländeneigung
- **Nicht befahrbar (NO GO areas):** größer gleich 35 Grad Geländeneigung

Bei der Erzeugung dieser IM wird über die Positionen der Geländeneigungs-IM iteriert und für jede Zelle die Geländefähigkeit entsprechend der Geländeneigung in dieser Zelle bestimmt. Für jede dieser Kategorien sind konstante Faktoren definiert, die entsprechend der identifizierten Kategorie gesetzt werden. Das Resultat ist eine IM I_{ccmm} , die Geländefaktoren enthält. Theoretisch lassen sich für jeden Fahrzeugtyp eigene IMs erstellen und im Baum hinterlegen. Werden Berechnungen angestellt, die für einen bestimmten Einheitentyp die Geländefähigkeit benötigt, kann anhand des Fahrzeugtyps die entsprechende IM selektiert werden.

Bei der Berechnung der Einflusswerte für die **Bewegungstendenz-IM** (engl.: Movement Tendency-IM) I_{Move} wird über alle aktuellen Gegnerpositionen iteriert und für jeden Gegner mittels einem vereinfachten Streuungsmechanismus die Bewegungstendenz abgeschätzt. Die Einflussbereiche werden für alle Gegner schließlich addiert, um die finale Bewegungstendenz-IM zu erhalten. Inspiriert wurde der Ansatz durch die Arbeit [117], in der über ein ähnliches Modell mögliche Bewegungspfade durch ein Gelände mittels einer einfachen Fluid-Simulation bestimmt werden, die menschenähnliche Ergebnisse erzielt. Zur Abschätzung der Bewegungstendenz eines Gegners wird zunächst dessen Aufklärungsalter in Sekunden seit der letzten Beobachtung durch einen UAV-Sensor ermittelt. Ist das letzte Aufklärungsdatum unbekannt bzw. nicht gegeben, wird ein Standardwert gesetzt. Zusätzlich wird für die Schätzung der Bewegungstendenz die letzte bekannte Bewegungsrichtung zusammen mit der Geschwindigkeit herangezogen. Wenn keine Geschwindigkeit bekannt ist bzw. das Objekt sich nicht bewegt hatte, d.h. die Geschwindigkeit 0 beträgt, wird als Geschwindigkeitswert der durchschnittliche Geschwindigkeitswert gesetzt, den man mit dem zugrundeliegenden Fahrzeug bzw. Einheitentyp erreichen kann. Anschließend wird mittels des Aufklärungsalters und der Geschwindigkeit die maximale Entfernung berechnet, die das

Objekt seit der letzten Beobachtung zurücklegen hätte können. Daraus lassen sich dann alle anhand der Entfernung erreichbaren Zellen ermitteln. Für jede Zelle wird schließlich geprüft, ob diese von dem Fahrzeug erreichbar ist, d.h., ob es einen möglichen Pfad von der Ursprungszelle, an der sich das Fahrzeug befindet, zu den jeweiligen Zellen gibt. Ist dies der Fall werden zwei Gewichtungsfaktoren bestimmt. Der erste Gewichtungsfaktor bildet die Entfernung auf einen Wert zwischen 0 und 1 ab. Dazu wird die Entfernung zu jeder Zielzelle berechnet und auf einen Gewichtungswert umgerechnet. Der zweite Gewichtungsfaktor beschreibt die Bewegungsrichtung. Ist keine Bewegungsrichtung gegeben bzw. hat sich das Objekt seit der letzten Beobachtung nicht bewegt, wird eine gleichverteilte Streuung in allen Richtungen ausgehend von der Zelle, in der sich der Feind befindet, angenommen. Wenn eine Bewegungsrichtung vorhanden ist, wird die Peilung entsprechend der Bewegungsrichtung in Grad ausgerechnet. Für jede Nachbarzelle wird dann die Abweichung ausgehend von dem Zentrumspunkt der jeweiligen Zelle zu der Peilung berechnet und ebenfalls auf einen Faktor zwischen 0 und 1 normalisiert. Auf diese Weise erhält man ein Streuungsverhältnis, was die Bewegungsrichtung berücksichtigt. Die Faktoren werden schließlich jeweils in einer Matrix gespeichert, deren Dimension die der IMs entspricht. Dadurch lassen sich arithmetische Operationen mit anderen IMs durchführen. Ein weiterer Einflussfaktor ist die Geländefähigkeit des Fahrzeugs, da diese einen maßgeblichen Einfluss auf dessen Beweglichkeit im Gelände hat. Entsprechend des Fahrzeugtyps wird die zu dem Fahrzeug passende Geländefähigkeit-IM I_{ccmm} selektiert.

Um letztlich eine Schätzung der Bewegungstendenz des Feindes zu erhalten, werden diese beiden Matrizen, Entfernungsfaktoren und Bewegungsrichtungsfaktoren, mit der IM I_{ccmm} und dem Tendenzstärkewert multipliziert. Auch die Bewegungszeit gegnerischer Einheiten ist nicht unerheblich. Diese wird indirekt über die Bewegungstendenz-IM mitberücksichtigt und ist deswegen nicht nochmal als eigene IM hinterlegt.

IMs zur Bedrohung

Die *Bedrohungs-IM* (engl.: Threat-IM) ist eine zentrale IM zur Repräsentation der Bedrohungslage. Sie setzt sich zusammen aus den militärischen Stärken der verbündeten Einheiten (BLUFOR), abgebildet durch die IM I_B , und den gegnerischen Kräften (REDFOR), deren Einflusswerte in der IM I_E gespeichert sind. Die Kombination dieser IMs bezeichnen wir als **Einheitenbedrohung** (Unit Threat). Sie werden mit entsprechenden Gewichten linear kombiniert (Faktor 1.0 für REDFOR, -1.0 für BLUFOR). Neben der Einheitenbedrohung haben andere Einflussgrößen ebenfalls Auswirkungen auf die Bedrohung. Dazu zählen die **historischen Konflikte** I_{Hist} , mögliche **Bewegungstendenzen** von mobilen Gegnern I_{Move} und eingehende **Geheimdienstberichte** (Intel Reports) I_{Intel} , welche bestimmten Gebieten einen

Gefahrenfaktor zuweisen und von der Kommandozentrale $C2^4$ bereitgestellt werden. Durch Aufklärungsarbeit lässt sich der Grad an Bedrohung reduzieren, jedoch nur jener Teil, der sich aus den Werten zusammensetzt, die nicht unmittelbar durch die Einheitenbedrohung besteht. Das **Aufklärungsalter** (Recon Age) spielt dabei eine wesentliche Rolle, da mit zunehmendem Alter die Aufklärungsdaten zu einem Gebiet die Unsicherheit und damit die Bedrohungslage wieder ansteigt. Das Aufklärungsalter wird in Sekunden in der IM I_{RecAge} hinterlegt. Die Kombination aus diesen Einflussfaktoren ergibt die Bedrohung innerhalb eines Gebiets. Diese Kombination bezeichnen wir als **Gebietsbedrohung** (Area Threat). Die lineare Kombination aus der Einheiten- und Gebietsbedrohung ergibt schließlich die Bedrohung-IM. Formal lässt sich die Berechnung der Bedrohungs-IM I_{Threat} folgendermaßen ausdrücken:

$$I_{Threat} = I_E - I_B + (\alpha_1 I_{Hist} + \alpha_2 I_{Move} + \alpha_3 I_{Intel}) f_{recAge}(I_{RecAge}) \quad (3.10)$$

wobei die Parameter $\alpha_1, \alpha_2, \alpha_3 \in R$ Gewichtungsfaktoren sind und f_{recAge} eine Funktion, die gegebene Zeitwerte des Aufklärungsalters auf ein spezifiziertes Zeitintervall normalisiert. Dieses Zeitintervall ist auf $15 * 60 = 900$ Sekunden gesetzt.

Um die militärische Stärke gegnerische Kräfte (REDFOR) zu ermitteln, wird das DBN (siehe Kap. 3.4.1.4) genutzt. Die Werte für die militärische Stärke verbündeter Einheiten ist als gegeben angenommen. Prinzipiell könnte man sich aber auch hierfür ein DBN überlegen, welches analog zu der Bedrohungswahrscheinlichkeit eine Wahrscheinlichkeit angibt, die den Schutz des Helikopters durch diese Einheit angibt.

IM zu Marschrouten

In militärischen Operationen sind Marschrouten zum Erreichen eines Missionsziels meist gegeben. Diese werden im Vorfeld genau geplant und den Einheiten zur Verfügung gestellt. Zusätzlich können auch alternative Marschrouten festgelegt werden. Da die militärische Domäne von einer hohen Unsicherheit geprägt ist, kann es durchaus zu Änderungen im Missionsablauf kommen, die entweder die Einheiten zwingen aufgrund gegnerischer Aktivitäten oder gar durch Anweisung ein ganz anderes Missionsziel zu verfolgen eine neue Route einschlagen müssen. Im Vorfeld können diese Änderungen unter Umständen berücksichtigt werden und strategisch relevante Orte oder Routen festgelegt werden, die im Laufe einer Operation wichtig werden könnten.

⁴ C2 steht für Command and Control

Eine solche Bestimmung kann automatisiert über den Agenten erfolgen. Aus vorhandenen Informationen des Missionsbriefings oder aus Updates, die dem System im laufenden Betrieb mitgeteilt werden, können diese Orte oder Routen über ein Berechnungsmodell ermittelt und in einer IM I_R hinterlegt werden. Bei der Berechnung kann mit dem Berechnungsmodell auch ein Pufferradius um einen solchen Ort bzw. Route für weitere Analysezwecke gelegt werden. Denkbar ist zudem, dass bei dem Diskretisierungsvorgang der Orte/Routen Wahrscheinlichkeitswerte mit einkalkuliert werden, die angeben, wie wahrscheinlich es ist, einen bestimmten Ort zu besuchen bzw. einer bestimmten Marschroute zu folgen. Auf diese Weise kann man angeben, wie wahrscheinlich es sein kann, dass bestimmte Bereiche von strategischer Bedeutung sein könnten.

IM zur Aufklärung

Wie in Kap. 2.4 dargelegt ist die Aufklärung ein wesentliches Instrument für den Kommandanten zur Informationsbeschaffung und wird im Konzept über eine extra IM abgebildet. Diese IM soll die Wertigkeit von Regionen zur Aufklärung widerspiegeln und berechnet sich aus zwei zentralen Elementen, der Bedrohungslage entlang strategisch relevanter Punkte und die Nützlichkeit der Aufklärung bestimmter Regionen.

Die Bedrohungslage strategisch relevanter Punkte werden in den Kategorien der Terrain- und taktische Elementtypen eingeteilt. Zu den Terraintypen zählen topographischen Elemente, wie z.B. Berghänge, Engpässe, flache Gebiete usw. Taktische Elementtypen umfassen alle relevanten Elemente, die sich mit der Taktik beschäftigen (z.B. Flanken, Marschrouten der eigenen Einheiten, ...). Jede dieser Elementtypen (ob topographisch oder taktisch) sind durch geometrische Formen oder Regionen beschrieben, die diskretisiert werden und entsprechend durch IMs repräsentiert werden. Um die Bedrohungslage entlang dieser Elemente zu erhalten wird die Bedrohungs-IM mit diesen Elementtypen gefiltert. Zudem gilt, dass je nach Mission und zu erwartende Feindlage die Terrainbeschaffenheit, sowie die Absicherung wichtiger taktischer Elemente (z.B. Flanken) unterschiedliche Bedeutungen für die Aufklärung haben können. Daher ist es erforderlich die Einflussfaktoren gewichten zu können.

Die Aufklärungsnützlichkeit stellt den Nutzen für die Aufklärung von Gebieten unter Berücksichtigung der aktuellen Verteilung der eigenen Einheiten dar. In Abhängigkeit von der aktuellen eigenen Position bzw. der Position der Einheiten, die sich Informationen beschaffen möchte, und der gegenwärtigen Verteilung und Verfügbarkeit von Aufklärungssensoren ist der Nutzen der Aufklärung höher oder niedriger zu bewerten. Der Nutzen einer Aufklärung kann über die Zeitdifferenz repräsentiert werden, die eine Aufklärungsressource braucht, um der Instanz, die die Aufklärung anfordert, zur Verfügung zu stehen und der Zeit, in der diese Instanz die Aufklärungsergebnisse benötigt. Die Zeitdifferenz wird ebenfalls in einer IM hinterlegt und spiegelt so den Nutzen einer Aufklärung der Regionen wider. Da der

Nutzen der Aufklärung ebenfalls abhängig von der Lage eine höhere bzw. niedrigere Bedeutung haben kann, wurde dafür ebenfalls ein Gewichtungsfaktor vorgesehen.

Formal ist die Berechnung der IM I_V , die die Aufklärungswerte enthält, über eine Linearkombination der gefilterten Bedrohungswerte und der Aufklärungsnützlichkeit definiert:

$$I_V = \left(\sum_{i=0}^{N_G} w_{G_i} I_{G_i} + \sum_{k=0}^{N_C} w_{C_k} I_{C_k} + w_U I_U \right) I_P \quad (3.11)$$

wobei $I_{G_i} \in R^{n \times m}$ die gefilterte Bedrohungskarte für den i -ten Terraintyp ist, $I_{C_k} \in R^{n \times m}$ die gefilterte Bedrohungskarte für das k -te taktische Element, $N_G \in N$ die Anzahl der Terraintypen, $N_C \in N$ die Anzahl der taktischen Elementtypen, $I_U \in R^{n \times m}$ die Aufklärungsnützlichkeit-IM und $w_{G_i}, w_{C_k}, w_U \in R$ Gewichtungsfaktoren. Jeder Terraintyp und jeder taktische Elementtyp hat jeweils einen eigenen Gewichtungsfaktor. Dadurch ist es möglich die Bedeutung von bestimmten Typen im Vergleich zu anderen festzulegen. In der Formel ist zusätzlich eine weitere IM I_P eingefügt worden. Diese IM bildet Nutzerpräferenzen ab. Sie spiegelt die Bedeutung für bestimmte Gebiete wider, die vom Nutzer durch Interaktion mit dem System gesetzt werden, z.B. durch Kennzeichnung eines bestimmten Gebiets, welche der Nutzer spezifiziert hat. Standardmäßig ist diese IM eine 1-Matrix und kann durch Interaktionen mit dem System modifiziert werden.

Das Alter der Aufklärungsdaten ist ebenfalls ein essentieller Faktor und wurde bereits unter **IM zur Bedrohung** erläutert.

IM zu Ressourcenbedarf

Das Gelände und die Bedrohungslage durch den militärischen Gegner entlang möglicher Marschrouten haben einen erheblichen Einfluss darauf, welche Gebiete mögliche Schlüsselstellen darstellen (vgl. Kap. 2.3.3) für den Einsatz von Ressourcen. Ein Mangel an verfügbaren Mitteln kann sich schwerwiegend auf das hochwertige Objekt auswirken in Abhängigkeit der Höhe des potentiellen Bedrohungsfaktors in einem Gebiet, durch das eine Marschroute führt. Man kann diesen Mangel an Ressourcen an solchen Gebieten als Ressourcenbedarf zur Erhöhung der Absicherung des zu schützenden Objekts auffassen. Für die Ermittlung eines solchen Ressourcenbedarfs werden die Faktoren der I_R mit Bedrohungsgraden aus I_T gewichtet. Schließlich muss ermittelt werden, an welchen Bereichen dieser Bedarf bezogen auf einen Mangel an verfügbaren Ressourcen am höchsten ist. Der Mangel an Verfügbarkeit lässt sich über die existierende Verfügbarkeits-IM der Ressourcen I_A ausdrücken mit $(I_1 - I_A)$, wobei I_1 die Einsmatrix ist, d.h. eine Matrix deren Elemente alle gleich der Zahl Eins (beziehungsweise dem

Einselment) sind. Die Gewichtung des Ressourcenbedarfs mit der Nicht-Verfügbarkeit wird als Ressourcenanforderung bezeichnet und deren Ergebnis in der IM I_D abgelegt. Die IM I_D enthält somit Faktoren, die die potentielle Anforderung einer Ressource für einen Bereich repräsentiert. Formal ist sie definiert als:

$$I_D = I_R I_T (I_1 - I_A) \quad (3.12)$$

I_D ist die Ressourcenanforderungs-IM, I_R repräsentiert die möglichen Marschrouten durch das Einsatzgebiet, I_T ist die Bedrohungs-IM, I_1 ist die Einsmatrix und I_A gibt die maximalen Verfügbarkeitswerte über alle Ressourcenverfügbarkeiten wieder.

IMs zu eigenen Truppen

Ein wesentlicher Aspekt aus Sicht der eigenen Truppen (engl.: Troops) sind deren Status und Fähigkeiten. Bei den Mitteln zur Erfüllung bestimmter Aufgaben sind neben deren Anwendungsmöglichkeit v.a. der zeitliche Faktor in Verbindung mit der Verfügbarkeit der Mittel ein wesentlicher Faktor. Die Verlegungszeit der eigenen Mittel von einem Punkt zu einem anderen ist ein Aspekt, der über jeweilige IMs abgebildet wird. Für jede Einheit, inklusive dem hochwertigen Schutzobjekt, wird eine IM angelegt, die die Zeit zur Erreichung der jeweiligen Zellen angibt. Neben der Verlegungszeit wird bei den Ressourcen der Einsatz der Fähigkeit ihrer Einsatzmittel zusätzlich mit einem weiteren Faktor abgebildet, der die Verfügbarkeit dieser Fähigkeit angibt, zu der sie in einem bestimmten Gebiet einsatzfähig ist. Dafür wird die Zeit t , die diese Ressource braucht um in einem bestimmten Gebiet einsatzfähig zu sein unter der Funktion $f_{avail}: R \rightarrow [0,1]$ auf einen Wert im Intervall $[0,1]$ abgebildet, der dem Verfügbarkeitsfaktor entspricht (siehe Formel 3.13).

$$f_{avail}(t) = \begin{cases} 1, & \text{if } t < \zeta \\ \frac{\eta - t}{\eta - \zeta}, & \text{if } \zeta \leq t \leq \eta \\ 0, & \text{if } t > \eta \end{cases} \quad (3.13)$$

Die Annahme, die hinter der Verwendung dieser Funktion steht, ist, dass der Verfügbarkeitsfaktor am aktuellen Standort, an dem sich ein Einsatzmittel befindet, hoch ist und aufgrund einer gegebenen Reichweite (z.B. Sensorreichweite, Wirkradius einer Waffe) einen optimalen Wert in seiner Umgebung behält. Je weiter der Abstand zu diesem Einsatzmittel zunimmt, desto mehr beginnt der Verfügbarkeitswert zu fallen, bis er schließlich ab einer bestimmten Distanz η den Wert 0 annimmt. Die Parameter $\zeta, \eta \in R$ mit $0 \leq \zeta < \eta$ sind Zeitintervallgrenzen, um den Wert der Verfügbarkeit zu steuern. Der Parameter ζ gibt dabei

die Reichweite in Sekunden an, innerhalb dessen eine Ressource eingesetzt werden kann, ohne dass man die gegenwärtige Position des Einsatzmittels ändern müsste.

Mit der Bewegungszeit ist auch ein effizienter Einsatz der Ressourcen verbunden, der bei der Frage welcher verfügbaren Ressource eine Aufgabe zugewiesen werden soll einen wichtigen Stellenwert einnimmt. Daher ist es nicht unerheblich zu wissen, in welchem Bereich eine Ressource im Vergleich zu allen anderen Ressourcen am schnellsten hinsichtlich der Bewegungszeit eingesetzt werden kann. Dafür wird die IM I_{Op} berechnet, die die schnellste Operationsreichweite einer Ressource beschreibt. In dieser IM wird den Zellen eine eindeutige Nummer zugewiesen. Diese Nummer entspricht der ID von der Ressource, die aufgrund ihrer Reisegeschwindigkeit und Nähe die kürzeste Zeit benötigt, um diese Zelle zu erreichen.

3.4.3 IM-Tree

Das Wissen ist in einer Baumstruktur organisiert, die wir als den *IM-Tree* bezeichnen [118]. Grundsätzlich gibt es zwei verschiedene Knotenpunkte, aus denen der Baum aufgebaut ist, Wissensknoten und Produktionsknoten. Wissensknoten sind IM-Knoten, die mit einer IM assoziiert sind und Wissen enthalten. Bei den Produktionsknoten wird zwischen zweierlei Knotentypen unterschieden. Der erste stellt die Berechnungsmodelle (engl.: Calculation Models; CM) dar. Sie erzeugen aus eingehenden Daten der Informationsquellen die Blattknoten des IM-Trees. Daneben gibt es noch die Kombinerungsalgorithmusknoten (engl.: Combination Algorithm nodes), die mit CA abgekürzt werden. Sie entsprechen Kombinerungsalgorithmen, die verschiedene IMs verarbeiten und eine neue IM als Resultat produzieren. Eine schematische Darstellung des *IM-Trees* ist in Abbildung 3-10 zu sehen.

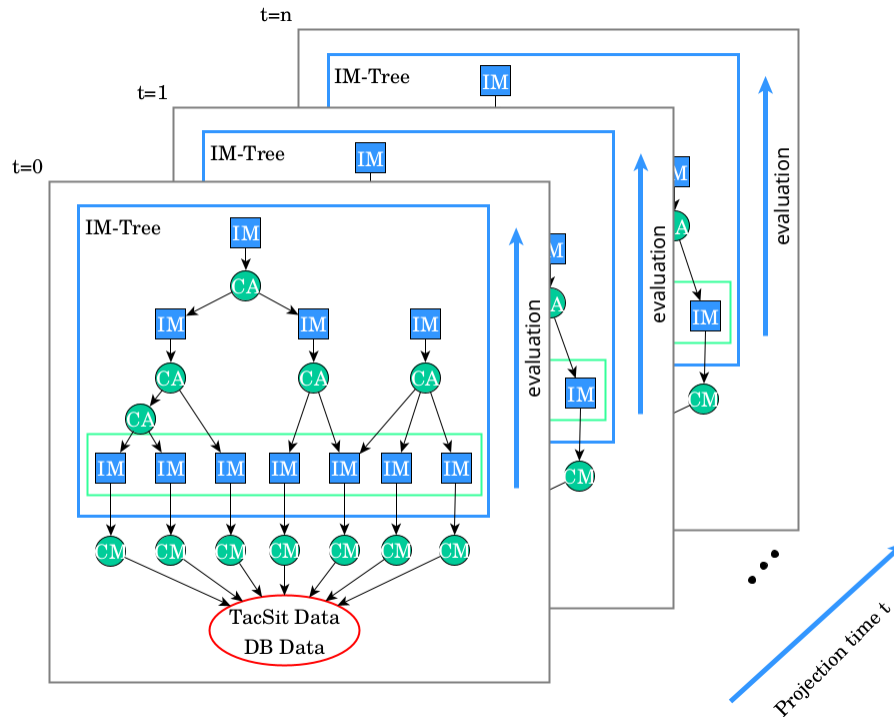


Abbildung 3-10: Schematische Darstellung des IM-Tree-Modells

Die Zusammenstellung der Knoten innerhalb des Baums bildet die Verständnisebene einer Situation ab. Sie definiert, wie verschiedene Informationen untereinander zusammenhängen und bildet damit das mentale Modell des Agenten (der IM-Tree ist durch ein pinkfarbenes Baumsymbol in Abbildung 3-1 symbolisiert). Blattknoten erhalten ihre Werte von Berechnungsmodellen, die die Informationen aus den aufbereiteten Daten der Datenaufbereitungs- und Situationsüberwachungsebene verarbeiten. Die Berechnung erfolgt dabei in zwei Schritten. Im ersten Schritt wird Wissen in Form von Faktoren entsprechend einer Berechnungsvorschrift ermittelt. Diese resultierenden Werte werden schließlich optional mit einer geeigneten Funktion räumlich propagiert, um deren Einfluss im Raum zu repräsentieren. Alle für die Berechnung notwendigen Informationen zu einer IM werden dabei aus den übermittelten Daten extrahiert und können auch Informationen aus bereits berechneten IMs als Eingabe heranziehen.

Ein CA-Knoten führt einen bestimmten Algorithmus auf mindestens eine oder mehrere IMs aus. Diese Algorithmen können entweder einfache arithmetische Operationen umfassen oder komplizierte Filterungs- oder Clusteralgorithmen, etc. Die Ausgabe eines CA-Knotens ist wiederum eine IM, die ihrerseits wieder direkt Eingabe eines weiteren CA-Knotens sein kann. Damit ist es möglich flexible, hierarchische Strukturen zu bilden. Der Unterschied zu einem Berechnungsmodell besteht darin, dass hier nur Daten aus IMs miteinander kombiniert werden. Im Gegensatz dazu verwenden die Berechnungsmodelle

aufbereitete Informationen aus der taktischen Lage, den Sensordaten der UAVs oder anderen Datenquellen und können Informationen aus bereits bestehenden IMs ebenfalls nutzen.

Da eine vollständige Auswertung des Baums unter Umständen lange dauern kann, wurde ein Mechanismus vorgesehen, der lediglich die Baumteile aktualisiert, die von einer Änderung betroffen sind. Die Information dazu wird aus dem Auslösereiz abgeleitet, die angibt, welche Blattknoten bei dem Aktualisierungsvorgang betroffen sind. Von allen betroffenen Blattknoten werden schließlich die Elternknoten bestimmt, bis man die Wurzelknoten ermittelt hat. Dadurch erreicht man, dass nur die Baumstrukturen aktualisiert werden müssen, die von den Änderungen in den jeweiligen Blattknoten betroffen sind. Durch diesen Mechanismus ist das Modell skalierbar und man gewinnt Performanz, was besonders bei größeren Karten und größeren IM-Baumstrukturen, in denen viele Informationen verarbeitet werden müssen, von Vorteil ist.

3.5 Impact Assessment - Situationsinterpretation

Auf Basis des maschinellen Situationsbewusstseins ist im Bereich der Folgeabschätzung eine Situationsinterpretation für die Bereitstellung der Assistenzleistung angesiedelt. Es bedarf eines intelligenten Interventionsmechanismus des Agenten, um zu entscheiden, unter welchen Gegebenheiten dem Nutzer Unterstützungsleistung angeboten wird. Diese Intervention sollte auf einfachen, nachvollziehbaren Regeln basieren, so dass die Transparenz (vgl. Kap. 2.2.7) der automatisierten Hilfestellung gewährleistet ist und der Nutzer die Handlungen des Agenten schnell auffassen und verstehen kann.

Damit die in Kap. 2.2.6 beschriebenen Effekte möglichst vermieden werden wurde die Assistenz des Agenten so konzipiert, dass der Mensch beim taktischen Vorgehen als Entscheidungsträger stets berücksichtigt wird und die Automation nicht selbstständig eigenmächtig Entscheidungen direkt ausführt. Der Agent soll entsprechend dem formulierten Ziel in Kap. 3.1.4.5 eine Assistentenrolle einnehmen, die dem Menschen nur in bestimmten Situationen unterstützt und sich ansonsten zurückhält. Onken und Schulte beschreiben in [119] ein Regelwerk, um ein solches Verhalten umzusetzen. Demnach ist die grundlegende Idee dem Nutzer seine Arbeit so lange wie möglich ohne Unterbrechungen seitens des Agenten durchführen zu lassen und bei Bedarf eine stufenweise Unterstützungsleistung anzubieten. Die dazu aufgestellten Regeln lauten wie folgt:

- 1 Wenn die Aufmerksamkeit des Menschen nicht auf die wichtigste Aufgabe gerichtet ist, richte die Aufmerksamkeit des Menschen auf diese
- 2 Wenn der Mensch nicht in der Lage ist, die Aufgabenschritte zur Bewältigung der Aufgabe auszuführen, vereinfache die Aufgabe in eine, die er handhaben kann
- 3 Wenn der Mensch nicht in der Lage ist, die Aufgabenschritte zur Bewältigung der Aufgabe auszuführen und die Kosten für ein Scheitern zu hoch wären, soll der Agent die Aufgabe selbst übernehmen.

Die Konzeption der Unterstützungsleistung orientiert sich an diesem Regelwerk. Da es sich bei der Wahl für die Bereitstellung einer Unterstützungsstufe um eine Entscheidung seitens des Agenten handelt, können hier die Methoden der Entscheidungsfindung aus Kap. 3.6 herangezogen werden. Für die Modellierung dieses Interventionsmechanismus wurde entschieden die Methode der expliziten Programmierung anzuwenden, d.h. die Prüfungen für den Grad der angebotenen Unterstützungsleistung werden explizit modelliert. Dadurch hat man als Entwickler die größte Kontrolle darüber, unter welchen Umständen ein bestimmte Unterstützungsgrad zu einer Situation ausgewählt werden soll und kann die Ereignisse, zu denen diese dem Nutzer angeboten wird, leicht festlegen und anpassen.

3.5.1 Modellierung von Assistenzsituationen

Bei der Bereitstellung von Assistenz ist zunächst festzulegen, welche Situationen überhaupt von dem Agentensystem unterstützt werden sollen und welche Merkmale diese Situationen auszeichnet. Das dafür nötige Wissen muss entweder direkt aus dem Wissen des Agenten stammen oder durch Anwendung etwaiger Datenanfragen und -verarbeitung extrahiert und aufbereitet werden können. Es ist also notwendig, die für die Situation nötigen Informationen festzulegen und die Schritte zur Gewinnung dieser Informationen zu erarbeiten. Die Situationen, für die eine Assistenzunterstützung zur Verfügung gestellt werden kann, werden Assistenzsituationen genannt.

Anschließend müssen für diese Assistenzsituationen die notwendigen taktischen Maßnahmen identifiziert und Stufen zugeordnet werden, die die aktuelle Kritikalität einer Situation und dem damit verbundenen als notwendig erachteten Unterstützungsgrads abbilden. Diese Stufen werden Kritikalitätsstufen genannt und werden durch einfache logisch verknüpfte Variablen beschrieben. Die taktischen Maßnahmen sind dabei so herunterzubrechen, dass sie entsprechend der aufgetretenen Kritikalitätsstufe den Unterstützungsgrad liefern, der für die aktuelle Situation angemessen ist. Das Resultat sind für die aufgetretene Situation geeignete Lösungsvorschläge. Der Prozessablauf ist schematisch in Abbildung 3-11 abgebildet.

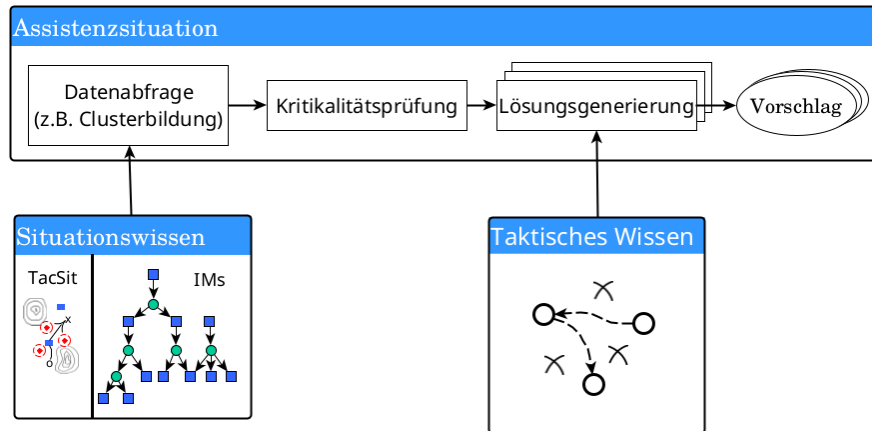


Abbildung 3-11: Schematische Darstellung des Prozessablaufs einer Assistenzsituation

Informationen, die für die jeweiligen Prüfungen erforderlich sind, werden mittels Datenanfragen aus dem IM-Tree und der taktischen Lage herangezogen. Jede Assistenzsituation enthält als Prozessbausteine die Logik der zu verwendenden IMs, sowie die Verarbeitungsschritte für die Datenverarbeitung, der Situationsinterpretation bzw. Kritikalitätsprüfung, sowie die zu einer eingetretenen Kritikalitätsstufe angewandte Lösungsstrategie, mit der Vorschläge für das taktische Vorgehen ermittelt werden. Die Situationsinterpretation geschieht anhand der durch die Datenanfrage gewonnenen Informationen. Die Lösungsstrategien richten den Grad der Automationsstufe nach der Kritikalität einer aufgetretenen Situation. Die Bedingungen der Kritikalitätsstufen einer Situation müssen darüber hinaus so aufeinander abgestimmt sein, dass sie nicht gleichzeitig eintreten und logisch nacheinander aufgebaut sind. Ebenso muss eine Priorisierung für die jeweiligen Situationen festgelegt werden, falls in einer aktuellen Lage mehrere Assistenzsituationen auftreten sollten. Für jede Situation, in der eine Assistenzunterstützung angeboten werden soll, werden Bedingungen für Kritikalitätsstufen definiert und mit einer Automatisierungsstufe verknüpft. Jede Automatisierungsstufe löst dabei definierte Verhaltensweisen aus. Man kann den Mechanismus als ein Expertensystem beschreiben, in dem die Bedingungen die Beschreibung einer Kritikalitätsstufe darstellen und die damit verbundenen Aktionen als automatisierte Verhaltensweisen. Die Prüfung der beschreibenden Bedingungen der jeweiligen Kritikalitätsstufe geschieht entsprechend einer priorisierten Reihenfolge, wobei die höchste Kritikalitätsstufe die höchste Priorität besitzt. Der Zusammenhang ist in Abbildung 3-12 schematisch dargestellt. Kritikalitätsstufe 0 bezeichnet einen neutralen Zustand, der angibt, dass die Assistenzsituation nicht eingetreten ist und deswegen auch kein Handlungsbedarf in Form einer Unterstützungsleistung notwendig ist. Bei der Prüfung des Eintretens einer Assistenzsituation werden die Bedingungen mit der höchsten Kritikalitätsstufe beginnend geprüft. Wenn

keine Bedingungen erfüllt sind, wird Stufe 0 gesetzt, was bedeutet, dass die gegenwärtig geprüfte Assistenzsituation nicht aufgetreten ist.

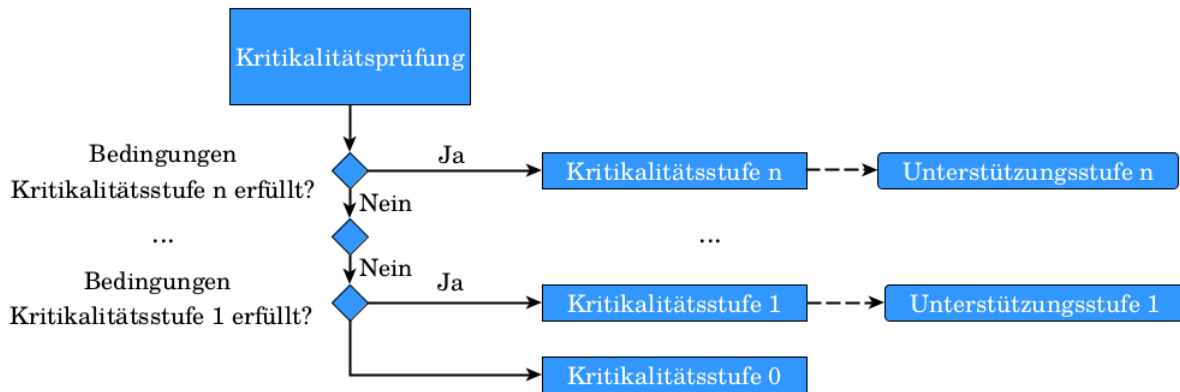


Abbildung 3-12: Schematischer Prozessablauf der Kritikalitätsprüfung einer Assistenzsituation

3.6 Decision Making - Taktisches Vorgehen

Die Bedrohungsanalyse bildet zusammen mit der Situationsrepräsentation die Grundlage für die taktische Entscheidungsfindung. Ein wichtiger Punkt bei der Nachempfindung taktischer Entscheidungsprozesse ist die Modellierung der zur Verfügung stehenden Mittel mit ihren Fähigkeiten, so dass der Agent ein Verständnis über deren Verwendung besitzt und damit brauchbare Lösungen anbieten kann. Da sich das Situationsbild jederzeit ändern kann, ist die taktische Entscheidungsfindung ein dynamischer Prozess, d.h. die getroffene Entscheidung kann sich jederzeit ändern.

Daneben ist der Aspekt der individuellen taktischen Vorgehensweise bzw. Präferenz ebenso zu beachten (vgl. Kap. 3.2). Eine Anpassung der Strategie zum Auffinden von Lösungen sollte daher berücksichtigt werden. Zudem müssen bei der Konzeption aufgrund der im militärischen Kontext herrschenden Charakteristika (vgl. Kap. 3.1.1) Methoden in Betracht gezogen werden, die auf sequentielle Entscheidungsprobleme anwendbar sind, mit Unsicherheiten umgehen können, als auch die Eigenschaft mitbringen in unbekanntem Umgebungen einsetzbar zu sein.

Es gibt eine Vielzahl an Herangehensweisen für die Modellierung eines Entscheidungsprozesses. Allgemein kann man sagen, dass Entscheidungsalgorithmen für das Entscheidungsproblem relevante Informationen aus der Umgebung ingestieren, verarbeiten und eine oder mehrere Lösungen für das gegenwärtige Problem erzeugen. Doch ist es meist nicht immer einfach den richtigen Ansatz zu wählen. Die Autoren in [120] gehen dieses Problem an und geben Richtlinien vor, anhand derer man sich bei der Auswahl geeigneter Entscheidungsalgorithmen orientieren kann. Es werden verschiedene Vorgehensweisen

vorge stellt und eine Reihe an Methoden, die für die jeweiligen Vorgehensweisen herangezogen werden können. Demnach besteht die unmittelbarste Möglichkeit für den Entwurf eines Entscheidungsalgorithmus in der **expliziten Programmierung**. Bei dieser Herangehensweise wird versucht alle möglichen Situationen, die eine Entscheidung erfordern zu antizipieren und explizit zu programmieren, welche Lösung als Reaktion auf eine gegebene Situation erfolgen soll. Dieser Ansatz ist zwar einfach zu verwirklichen, doch stößt dieser schnell an seine Grenzen, wenn die Anzahl der möglichen Situation und Entscheidungsmöglichkeiten zu komplex werden oder gar nicht erst erfasst werden können. Zudem kann es vorkommen, dass es zu einer Situation nicht eine eindeutige Lösung gibt und sich daher eine Modellierung als schwierig herausstellen kann. Der Ansatz eignet sich daher nur für einfache Problemfelder. Aufgrund der Charakteristiken einer militärischen Umgebung kann die explizite Programmierung zur Entscheidungsfindung deswegen ausgeschlossen werden bzw. als Teillösung für eine bestimmte Situation angewendet werden. Anstatt alle möglichen Situationen zu modellieren, besteht ein anderer Ansatz darin einen Datensatz an situativen Beschreibungen mit vorgegebenen Lösungen bereitzustellen und ein System damit zu trainieren. Dieser Ansatz ist der Grundgedanke des sog. **überwachten Lernens (engl.: supervised learning)**. Typischerweise wird dieser Ansatz für Klassifizierungsprobleme angewendet, für die ein solcher Datensatz existiert. Doch auch hier liegt die Problematik zugrunde, dass dieser Ansatz sich nur dann eignet, wenn es zu Situationen eindeutige Lösungen gibt. Zudem müssen genügend Datensätze vorliegen bzw. von Experten aus der entsprechenden Domäne bereitgestellt werden.

Ein anderer Ansatz besteht darin ein Leistungsmaß zu definieren, welches genutzt wird, um Lösungen untereinander zu vergleichen. Das Problem wird hier als ein **Optimierungsproblem** begriffen, in dem es darum geht über Simulationen geeignete Parameter zu finden, die das Leistungsmaß optimieren. Die Herausforderung liegt v.a. in einer geeigneten Definition dieses Leistungsmaßes, da dieses die resultierende Entscheidungsstrategie maßgeblich beeinflusst.

Mit der Optimierungsstrategie eng verbunden ist die Herangehensweise über eine **Planung**. Ein Planungsalgorithmus ist eine Form der Optimierung, dem ein Modell des Problems zugrunde liegt und die Suche nach einer Lösung leitet. Diese Art der Methodik wird meist für deterministische Probleme eingesetzt und eignet sich auch nur dann, wenn das zugrundeliegende Modell bekannt ist.

Für den Fall eines unbekanntes Modells des Problemfelds wird die Methodik des **Bestärkten Lernens (engl.: reinforcement learning)** eingesetzt. In dieser Art des Ansatzes agiert der Agent mit der Umgebung und lernt dessen Verhaltensregeln. Der Entwickler muss dafür ein Leistungsmaß definieren. Der Algorithmus optimiert dann das Verhalten des Agenten. Allerdings ist das Ergebnis nicht unbedingt das optimalste. Das Bestärkte Lernen kann deshalb zu heuristischen Methoden hinzugezählt werden.

In [121] wird die **Heuristik** als eine eigene Kategorie für Entscheidungsprobleme genannt. Im Gegensatz zur Optimierung wird bei einem heuristischen Ansatz eine Lösung gefunden, die ein gegebenes Problem zwar nicht optimal, aber hinreichend gut löst. Die meisten Heuristiken versuchen iterativ die gefundene Lösung über die Zeit hinweg zu verbessern. Doch obwohl Heuristiken es ermöglichen auch mit komplexen Sachverhalten umzugehen, gibt es keine Garantie dafür, dass die gefundene Lösung auch ein globales Optimum darstellt und es typischerweise nicht immer möglich ist zu bewerten, wie nah die gefundene Lösung an diesem Optimum ist.

3.6.1 Modellierung taktischer Entscheidungsfindung

Bei der Konzeption zur taktischen Entscheidungsfindung wurde ein modularer Ansatz verfolgt, so dass verschiedene taktische Vorgehensweisen einfach in den Agenten eingebracht werden können. Der generelle Aufbau der Komponente **Tactical Decision-making** ist im Datenflussdiagramm in Abbildung 3-13 illustriert.

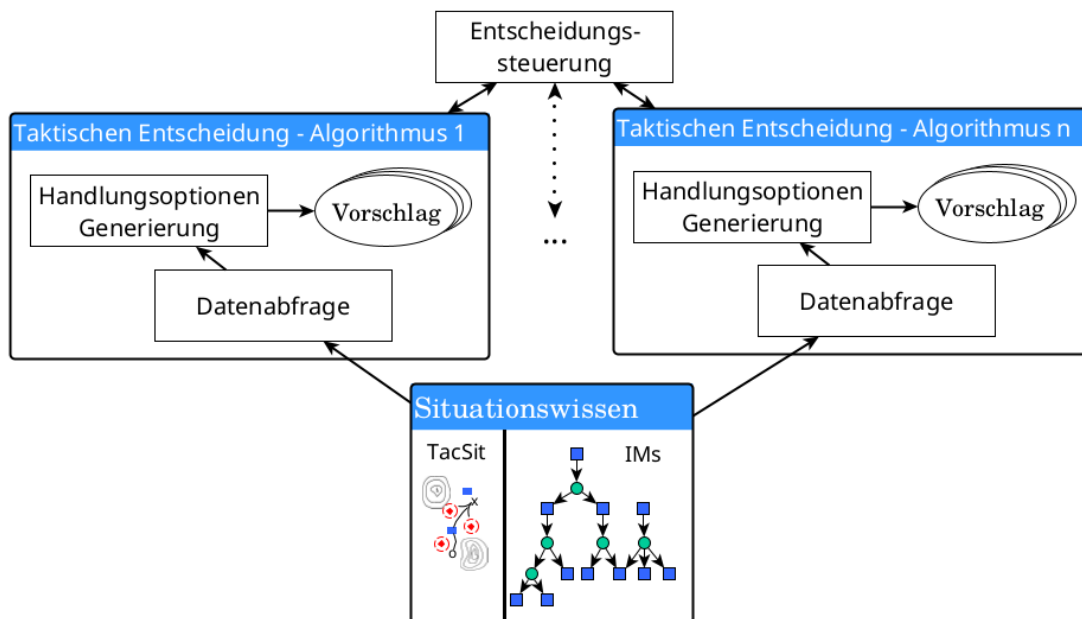


Abbildung 3-13: Schematischer Aufbau der Komponente **Tactical Decision-making**

Einstiegspunkt ist der Prozess zur *Entscheidungssteuerung*, in dem für eine extern gestellte Anfrage zu einer Situation eine passende taktische Entscheidungsfindung selektiert wird. Der Aufbau einer solchen Subkomponente der Entscheidungsfindung ist zweigeteilt. Analog zu den Assistenzsituationen wird über eine *Datenabfrage* das Wissen im IM-Tree, die zu der taktischen Vorgehensweise notwendigen

Informationen eingeholt. Diese werden in der Handlungsoptionen-Generierung verarbeitet und Lösungsvorschläge produziert, welche über die Entscheidungssteuerung zurück an die anfragende Instanz geleitet werden. Auf diese Weise erreicht man einen sehr flexiblen Architekturaufbau und kann neue taktische Vorgehensweisen leicht einbinden.

Im Rahmen dieser Arbeit werden zwei taktische Handlungen für den eingangs des Kapitels geschilderten Missionstyp (vgl. Kap. 3.1.3) betrachtet. Die erste bezieht sich auf die Aufgabenverteilung von Ressourcen, die mit ihren gegebenen Fähigkeiten an Zielobjekten operieren sollen. Das könnte bspw. der Einsatz eines Sensors sein, der für Aufklärungszwecke an einem Objekt genutzt wird. Diese Handlung besteht aus zwei Teilproblemen, der Bestimmung der Zielobjekte, sowie die Verteilung der zur Verfügung stehenden Fähigkeiten auf diese Zielobjekte unter gegebenen Bedingungen, die sich aus der taktischen Lage herausbilden. Für das erste Teilproblem wurden Suchstrategien entwickelt, deren Ziel es ist Zielobjekte zu identifizieren. Bei der Konzeption zur Verteilung der Fähigkeiten wurde ein formaler Ansatz gewählt, bei dem aus einer Menge an Zielobjekten über ein Leistungsmaß Einsatzmöglichkeiten heuristisch bewertet und Vorschläge generiert werden. Die zweite taktische Handlung ist die Positionierung der eigenen Einheiten im Einsatzgebiet für die Steigerung der Flexibilität hinsichtlich möglicher Situationsänderungen. Dieses Problem wird ebenfalls über die Berechnung eines Leistungsmaß angegangen. In einem dritten Ansatz wurde die Auswahl an taktischen Handlungen untersucht und dafür ein Markov Decision Process (MDP) verwendet.

3.6.2 Zielobjektbestimmung

Für die Ermittlung der Zielobjekte sind Suchstrategien vorgesehen, die auf IMs angewendet werden. Die IMs können als Kosten-IM bzw. Kostenmatrix aufgefasst werden. Es können dabei beliebig viele Suchstrategien entsprechend den missionsspezifischen Anforderungen erstellt werden. Die Schritte der Zielobjektbestimmung gestaltet sich in fünf Schritten (siehe Abbildung 3-14), Cost Values Query, Filtering Candidate Cells, Search Strategy, Filtering Targets und Target Objects Creation.

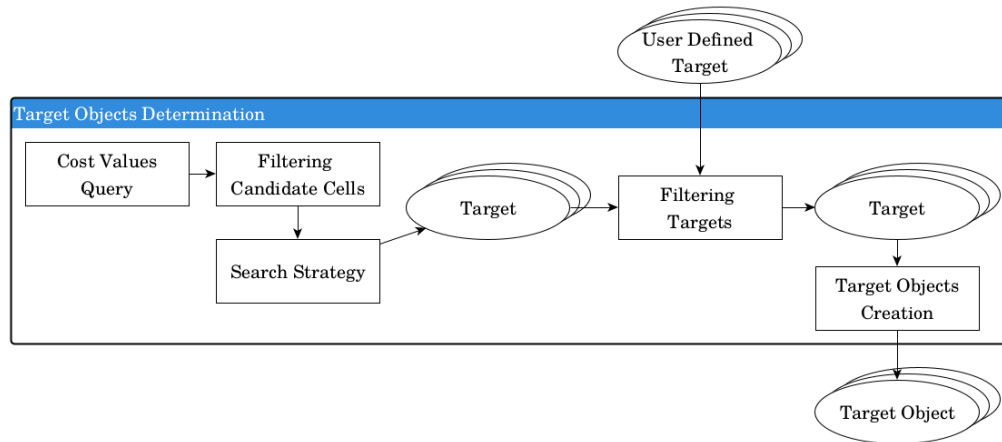


Abbildung 3-14: Prozessablauf für die Bestimmung von Zielobjekten

i) Im ersten Schritt werden Kostenwerte in Form einer IM, die als Ausgangsbasis der Suchstrategie dienen, angefragt bzw. ermittelt (Query Cost Values). ii) Anschließend erfolgt ein Filterungsprozess, in dem potentielle Kandidatenzellen aus der Kosten-IM, die für die Suche in Frage kommen, bestimmt werden (Filtering Candidate Cells). iii) Auf die so ermittelten Kandidatenzellen wird schließlich die Suchstrategie (Search Strategy) angewendet, um potentielle Ziele (Target) zu identifizieren. Diese Ziele stellen ein Zwischenergebnis dar. iv) Zur Koordination mit den Zielen, die der Nutzer bereits im System definiert hat (User specified Target), wird im darauffolgenden Schritt ein Abgleich vorgenommen (Filtering Targets). Dabei werden die Ziele des Agenten entfernt, die mit denen des Nutzers eine gewisse Überschneidung haben. Auf diese Weise erhalten die vom Nutzer gesetzten Ziele eine höhere Priorität. v) Nach diesem Filterungsprozess werden aus den Zielen schließlich Zielobjekte (Target Objects) generiert (Target Objects Creation), die mit zusätzlichen Informationen bestückt werden, bevor sie an den Nutzer herangetragen werden (z.B. Berechnungen zu dem Wert des Zielobjekts).

3.6.3 Aufgabenverteilung - Planbestimmung

Zur Bestimmung eines Aufgabenverteilungsplans für eine gegebene Zielobjektmenge T (engl.: targets) auf eine Ressourcenmenge A (engl.: available assets) wird ein formaler Ansatz verfolgt, bei dem eine Nutzfunktion verwendet wird. Eine Nutzfunktion dient als quantitative Abbildung der Güte von Präferenzen [122]. Die bei der Konzeption angewendeten Nutzfunktion $u: X \rightarrow R$ berechnet den Präferenzwert für ein Tupel $x \in X$ mit $x = (t, a)$, wobei $t \in T$ das Zielobjekt und $a \in A$ die Ressource repräsentiert. Die Menge R steht für den Raum der reellen Zahlen. Das Tupel drückt aus, dass die Ressource $a \in A$ mit der angeforderten Fähigkeit auf das Zielobjekt $t \in T$ angewendet wird. Ein Aufgabenplan besteht aus einer Menge an diesen Tupeln, bei dem jede Ressource maximal einmal vorkommt. Darüber hinaus soll die Menge T_{a_j} die Menge aller Zielobjekte sein, die der Ressource $a_j \in A$ mit $j = 1, \dots, \forall A \forall$ bereits

zugewiesen sind. Es werden im Algorithmus nur die Zielobjekte berücksichtigt, die noch keiner Ressource zugewiesen wurden und bezogen auf die Marschroute und aktuelle Position des Schutzobjekts noch vor diesem verortet sind. Mit anderen Worten werden alle bereits an Ressourcen zugewiesenen Zielobjekte und Zielobjekte, die das Objekt bereits passiert hat, vom Algorithmus ausgeschlossen. Um zu prüfen, ob ein Zielobjekt vor dem zu schützenden Objekt liegt, wird die aktuelle Position des Schutzobjekts sowie der zum Schutzobjekt nächstgelegene Punkt des Zielobjekts auf die Marschroute projiziert und die Länge vom Anfangspunkt dieser Route zu den jeweils projizierten Punkten verglichen. Ist die Länge des Routensegments vom Startpunkt der zu dem projizierten Zielobjektpunkt kleiner als die Länge des Routensegments vom Startpunkt zu der projizierten Schutzobjektposition, wird das Zielobjekt aus der Menge herausgefiltert. Formal lässt sich die gefilterte Zielobjektmenge T_F definieren als

$$T_F = \{t \vee t \in T, RouteSegLen(t, s) > RouteSegLen(o, s), t \notin T_{a_j} \forall a_j \in A\} \quad (3.14)$$

Die Funktion $RouteSegLen(t, s)$ liefert die Länge des Routensegments zwischen dem Anfangspunkt der Marschroute s und dem auf diese Route projizierten Referenzpunkt des Zielobjekts t . Analog gibt $RouteSegLen(o, s)$ die Länge des Routensegments zwischen dem Anfangspunkt von s und der auf die Route projizierten Position des Schutzobjekts zurück. Generell gilt $T_F \subseteq T$.

Die Nutzfunktion $u: T_F \times A \rightarrow R$ berechnet den Nutzwert für ein gegebenes Tupel (t, a_j) mit $t \in T_F$ und $a_j \in A$ folgendermaßen:

$$\begin{aligned} u(t, a_j) = & w_v val(t) + w_{dfttrap} (t_d(t, o, a_j)) \\ & - (w_{rest} t_{rest}(a_j) + w_{tra} t_{tra}(r, a_j) + w_{rec} t_{rec}(t, a_j)) \\ & + w_p setByuser(t) \end{aligned} \quad (3.15)$$

Die Faktoren $w_v, w_d, w_{tra}, w_{rec} \in R$ stellen Gewichtungsfaktoren dar. Mit der Funktion $val(t)$ wird der Aufklärungswert des Zielobjekts zurückgegeben. Die Funktion $t_{rest}(a_j)$ liefert den Zeitfaktor zurück, die Ressource a_j benötigt, um die ihr aktuell zugewiesenen Aufgaben zu erfüllen. Die Funktion $t_{tra}(r, a_j)$ schätzt die Zeit, die benötigt wird um die Ressource a_j zu dem Zielobjekt r zu bewegen. Bei dieser Schätzung wird die geschätzte Endposition des UAVs nach Abarbeitung aller ihr zugewiesenen Aufgaben verwendet. Die Funktion $t_{rec}(r, a_j)$ dient der Schätzung der Zeit, die a_j braucht, um die Aufgabe bezogen auf r abzuarbeiten. Der Term $t_d(t, o, a_j)$ bezeichnet eine Funktion, die die Zeitfaktordifferenz zwischen der Ankunftszeit des Schutzobjekts o und a_j zu dem Zielobjekt t berechnet. Schließlich gibt die Funktion

$setByUser(t)$ an, ob es sich bei dem Zielobjekt um ein vom Nutzer spezifiziertes Ziel handelt oder um eines, welches durch den Agenten identifiziert wurde. Der Rückgabewert ist hierbei 1, wenn es sich um ein vom Nutzer gesetztes Ziel handelt und andernfalls 0. Zielobjekte, die vom Nutzer gesetzt wurden, sollen eine höhere Priorität bei der Zuweisung an eine Ressource erhalten. Deshalb wird diesen Zielobjekten ein erhöhter Nutzwert entsprechend des gesetzten Gewichtungsfaktors $w_p \in R$ gegeben.

Die Funktion $f_{trap}: R \rightarrow [0,1]$ ist eine Funktion, die verwendet wird, um die Zeitdifferenz t auf einen Faktor zwischen 0 und 1 abzubilden. Die Funktion bildet dabei einen trapezförmigen Graphen ab, um Wahrheitsgrade abzubilden. Sie ist folgendermaßen definiert:

$$f_{trap}(t) = \begin{cases} 0, & \text{if } t < \alpha \\ \frac{t - \alpha}{\beta - \alpha}, & \text{if } \alpha \leq t \leq \beta \\ 1, & \text{if } \beta \leq t \leq \gamma \\ \frac{\delta - t}{\delta - \gamma}, & \text{if } \gamma \leq t \leq \delta \end{cases} \quad (3.16)$$

Die Parameter $\alpha, \beta, \gamma, \delta \in R$ mit $0 \leq \alpha < \beta < \gamma < \delta$ sind Begrenzungswerte, die das Trapezoid beschreiben. Die Annahme hinter der Verwendung dieser Funktion ist, dass die Reaktionszeit des Nutzers bei einer geringen Zeitdifferenz nicht mehr ausreicht, um angemessene Handlungsalternativen zu erkennen und umzusetzen. Daher wird der Nutzen der Handhabung des damit verbundenen Zielobjekts reduziert. Ist die Zeitdifferenz hingegen sehr groß, ist zwar ausreichend Reaktionszeit vorhanden, aber das Zielobjekt ist so weit entfernt, dass eine zu frühe Bearbeitung (noch) zu wenig Nutzen bringen könnte. Die Ursache hierfür liegt darin, dass sich entweder die Marschroute ändert und eine Ressource dann womöglich unnötig eingesetzt werden würde oder Daten bezogen auf das Zielobjekt (z.B. bei einer Aufklärung) wieder stark veraltet sind, sobald das Schutzobjekt in einen Bereich kommt, in dem diese Daten wieder relevant würden.

Nachdem mittels der Nutzfunktion die Nutzwerte für die gebildeten Tupel berechnet wurden, werden sie entsprechend der Nutzwerte in absteigender Reihenfolge sortiert. Dabei werden die Tupel herausgefiltert, deren Nutzwert kleiner als 0 ist. Anschließend werden Gruppen bestehend aus höchstens n Elementen gebildet, wobei n für die Anzahl der Ressourcen steht. Der Algorithmus iteriert über die geordnete Liste der Tupel und nimmt das erste Erscheinen einer Ressource genau einmal in eine Gruppe auf. In jeder Gruppe befindet sich damit jede Ressource höchstens einmal mit einem zugeordneten Zielobjekt. Eine Gruppe stellt einen möglichen Aufgabenplan dar. Da es aufgrund der möglichen Tupel-Kombinationen zu sehr vielen solcher Pläne führen kann, wird die Anzahl der zu bildenden Gruppen durch einen Parameter $numPlans$ begrenzt. Es werden die $numPlans$ besten Pläne gefiltert und zurückgegeben.

3.6.4 Einheitenpositionierung über ein Leistungsmaß

Bei der taktischen Positionierung geht es darum die Aufstellung der eigenen Einheiten im Verhältnis zueinander, dem militärischen Gegner und der Umgebung zu bewerten. Das Ziel bei der taktischen Positionierung hinsichtlich des betrachteten Missionstyps ist darauf ausgelegt eine hohe Flexibilität zu erreichen, so dass im Falle einer Situationsänderung Ressourcen, die für die Absicherung des hochwertigen Objekts genutzt werden, schnellstmöglich einsatzbereit sind. Die Bestimmung taktischer Positionen läuft in drei Schritten ab. Zunächst werden strategisch relevante Positionen ermittelt. Dazu werden über einen Anfragemechanismus Daten aus dem Wissen des Agenten angefragt und Positionsdaten extrahiert. Die angefragten Daten können dabei IMs sein, die mit Analysetechniken behandelt und Positionen ermittelt werden oder direkte Positionsdaten von in der taktischen Lage vorhandenen Entitäten. Für jede Ressource a wird eine neue potentielle Position p_a' anhand folgender Formel ermittelt:

$$p_a' = p_a + \alpha \left(\sum_{i \in S} w_i N(v_i) \right) \quad (3.17)$$

Dabei ist p_a die aktuelle Position von a , $i \in S$ ist die i -te strategisch relevante Position aus der Menge aller strategisch relevanten Positionen S und v_i der Vektor zwischen p_a und der Position von i . Die Funktion $N(\)$ normalisiert die Vektoren und wird mit einem Faktor w_i gewichtet, über den die Relevanz der jeweiligen strategischen Punkte festgelegt werden kann. Das Resultat der Summenformel gibt die Richtung an, in die a für die neue Position bewegt werden sollte. Der Parameter α gibt die Schrittweite an und kann genutzt werden, um die Entfernung zur neuen Position zu regeln. Schließlich wird die Entfernung zur neuen Position berechnet um zu prüfen, ob eine neue Positionierung Sinn ergibt. Ist die Entfernung unterhalb eines Schwellwerts th_m wird die neue Position verworfen, da sich die Ressource nach der Berechnung bereits an einer guten Position befindet. Andernfalls wird die neue Position als potentielle Zielposition betrachtet. Alle so gefundenen Positionen werden schließlich als Kandidatenmenge für mögliche Umpositionierungen zurückgeliefert.

In dem Konzept werden drei strategisch relevante Punkte für die mögliche Neuplatzierung einer Ressource betrachtet. Die Erste ist die Position des hochwertigen Objekts. Sie wurde gewählt, da die Nähe zum Schutzobjekt einen wesentlichen Faktor für die Ressourcenverfügbarkeit darstellt. Die Distanz zu dem Objekt sollte nicht zu groß sein, da sich dessen Bewegungsrichtung aufgrund der hohen Unsicherheit einer militärischen Lage blitzartig ändern kann. In diesem Fall müssen die Ressourcen neu orientiert werden. Um die Zeit der Umorientierung zu verringern sollte die Distanz nicht zu groß werden.

Zentrumspunkte von Gebieten des Ressourcenbedarfs, die aus I_D (vgl. Kap. 3.4.2.3) gewonnen werden, sind weitere strategische Punkte, die berücksichtigt werden. Dazu werden Regionen, die einen bestimmten Schwellwert th_D überschreiten gefiltert und zu Zellgruppen zusammengefasst (geclustert). Aus den daraus resultierenden Zellgruppen werden die Zentrumspunkte bestimmt.

Ein weiterer Faktor, der bei der Platzierung berücksichtigt wird, ist eine möglichst hohe Gleichverteilung der Ressourcen im Gebiet zu erreichen. Die Annahme dahinter ist, dass eine homogene Ressourcenverteilung einen schnelleren Einsatz an bestimmten Punkten im Einsatzgebiet ermöglicht. Zur Ermittlung dieser strategischen Punkte wird die IM I_{Op} (vgl. Kap. 3.4.2.3) herangezogen. Mit einem nach dem Lloyd-Algorithmus [123] inspirierten Vorgehen werden die Positionen der Ressourcen derart berechnet, dass sie ungefähr die gleiche Fläche bezogen auf den schnellsten Einsatz besitzen. Ausgangspunkt ist I_{Op} , aus dem die konvexen Hüllen der Zellenbereiche berechnet werden, die die gleiche Ressourcen-ID enthalten. Anschließend werden die einzelnen Schwerpunkte bestimmt und mit dessen Positionen eine neue I_{Op}' berechnet. Aus dieser I_{Op}' werden wieder konvexe Hüllen gebildet, die Schwerpunkte ermittelt und anhand der Positionen I_{Op}' aktualisiert. Dieser Vorgang wiederholt sich so lange, bis sich die Größe der Flächen zwischen den neu und vorherigen berechneten Operationsgebieten nicht maßgeblich ändert, d.h. kleiner als ein Wert ϵ ist.

3.6.5 Markov Decision Process (MDP)

Der Markov-Entscheidungsprozess⁵ (MEP; engl.: Markov Decision Process, MDP) ist eine formale Methode zeit-diskrete Entscheidungsprozesse unter stochastischen Bedingungen zu beschreiben [124]. Es dient v.a. zur Modellbildung und Auswertung in Umgebungen, in denen ein Entscheidungsträger Entscheidungen treffen muss, die mit einer bestimmten Unsicherheit verbunden sind. MDPs werden überwiegend als Planungsalgorithmen eingesetzt, um eine Strategie zu finden, die für den Anwender den größtmöglichen Nutzen verspricht. Dafür wird eine Umgebung mittels einer Menge an Zuständen modelliert, die ein Agent mit der Ausführung von einer Menge an Aktionen verändern kann. Ziel ist das System so zu steuern, dass eine optimale Strategie (engl.: optimal policy) gefunden wird. Diese Strategie gibt eine vollständige Abbildung von Zuständen nach Aktionen an, d.h. sie gibt an, welche Aktion man in einem gegebenen Zustand ausführen sollte. Zur Ermittlung einer solchen Strategie wird ein Leistungsmaß genutzt, mit dem ein Wert für die Wahl von Aktionen berechnet wird. Dieses Leistungsmaß bewertet die gewählte Strategie. Ziel ist es dieses Leistungsmaß zu optimieren, um die optimale Strategie zu finden. MDPs sind mittlerweile zu einem Standardformalismus für das Lösen von sequentiellen

⁵ benannt nach dem russischen Mathematiker Andrei Andrejewitsch Markow, im englischen Andrey Andreyevich Markov

Entscheidungsproblemen geworden, weswegen sich diese für die Modellierung im militärischen Kontext eignen (vgl. Kap. 3.1.1).

Formal ist ein MDP durch ein Tupel der Form S, A, p, r definiert:

- 4 **Zustandsraum** S : S steht für die Menge der möglichen Zustände, die das Modell des zu beschreibenden Systems annehmen kann. Ein Zustand $s \in S$ ist eine Repräsentation aller relevanten Informationen, die zur Beschreibung des Problems benötigt werden.
- 5 **Aktionsraum** A : A bezeichnet die Menge der möglichen Aktionen, die ein Agent ausführen und damit die Umwelt beeinflussen kann. Mit der Ausführung einer Aktion $a \in A$ ist es dem Agenten möglich von einem Zustand in einen anderen zu wechseln. Der Umweltzustand aus Sicht des Agenten ändert sich nur unter Anwendung einer Aktion.
- 6 **Transitionsfunktion** p : $p: S \times A \times S \rightarrow R$ beschreibt die Transitionsfunktionen, die die Wahrscheinlichkeit angibt, unter der ein Agent mit der Ausführung einer Aktion $a \in S$ von einem Zustand $s \in S$ in einen Zielzustand $s' \in S$ gelangt. Die Bezeichnung $p(s' \vee s, a)$ gibt die Wahrscheinlichkeit an, dass der Zustand s' durch Anwendung der Aktion a in Zustand s erreicht wird. Im Allgemeinen gelten die Bedingung $\forall s, a: \sum_{s'} p(s' \vee s, a) = 1$ mit $p(s' \vee s, a) \leq 1$ sowie die sog. Markov-Eigenschaft (engl.: Markov property). Das bedeutet, dass für den Wert von $p(s' \vee s, a)$ die Historie, wie man in den Zustand s gekommen ist, keinen Einfluss auf die Wahrscheinlichkeit haben darf, sondern lediglich der aktuelle Zustand und die ausgewählte Aktion. Alle für den Prozessverlauf notwendigen Informationen der Historie sind in dem aktuellen Zustand s enthalten.
- 7 **Belohnungsfunktion** r : $r: S \times A \times S \rightarrow R$ beschreibt die Belohnungsfunktion (engl.: reward function). Die Ausgabe ist der Belohnungswert $r(s, a, s')$, den der Agent erhält, wenn er eine Aktion $a \in A$ in einem Zustand $s \in S$ ausführt und ihn die Ausführung dieser Aktion in den Zustand $s' \in S$ überführt. Belohnungen werden eingesetzt, um den Agenten zu einem gewünschten Verhalten zu führen, d.h. er würde darüber zu gewünschten Zuständen geführt und von unerwünschten Zuständen ferngehalten. Das Ziel des Agenten ist es die Sequenz an Belohnungen zu maximieren.

Ein mit diesem Tupel beschriebener MDP kann genutzt werden, um die Entwicklungen der Zustände eines stochastischen Systems zu modellieren. Ziel bei dem Lösen eines durch ein MDP beschriebenes Problem ist es eine Strategie (engl.: policy) π zu finden, die der Agent nutzt, um den bestmöglichen Belohnungswert zu erhalten. Es ist ein Optimierungsproblem, in dem es gilt ein spezifiziertes Optimalitätskriterium zu erfüllen. Dieses Kriterium charakterisiert die Strategie, die dazu führt die

bestmöglichen Belohnungen zu erhalten. Daher ist eine geeignete Wahl des Optimalitätskriteriums entscheidend. Eine Übersicht über populäre Kriterien ist in [124] aufgelistet.

Optimalitätskriterien können über die Angabe einer Wertfunktion (engl.: value function) beschrieben werden. Für eine gegebene Strategie π und Kriterium bildet eine solche Funktion einen Zustand s_0 entsprechend des gewählten Kriteriums auf einen Wert ab. Dieser Wert gibt die erwartete Belohnung an, die man erhält, wenn man unter dem gegebenen Kriterium die Strategie π anwendet, d.h. der Agent handelt in Zustand s_0 gemäß der Strategie π . Das Lösen eines MDPs wird durch die Wertfunktion in ein Optimierungsproblem überführt und es gilt die Strategie zu finden, die diese Wertfunktion maximiert.

Zur Lösung eines MDPs gibt es eine Vielzahl an Algorithmen. Die Wahl des Algorithmus ist dabei u.a. abhängig von dem Optimierungskriterium. Einige bekanntere Algorithmen werden in [124] vorgestellt.

3.6.6 MDP-Modellierung

Ein wichtiger Aspekt bei der Modellierung des Zustandsraums ist die Größe beherrschbar zu lassen und zugleich alle relevanten Informationen zu berücksichtigen, die Einfluss auf die Entscheidungsfindung nehmen können. Mit zunehmender Anzahl an möglichen Zuständen steigt auch der Rechenaufwand. Wenn ein Zustand durch eine bestimmte Anzahl an Variablen beschrieben wird und jede dieser Variablen konkrete diskrete Werte annehmen kann, müssen für die Definition des Zustandsraums alle möglichen Kombinationen von diesen Werten betrachtet werden. Das kann in Abhängigkeit von der Variablenanzahl und der jeweiligen Granularität der Diskretisierung der Variablen zu einer kombinatorischen Explosion führen und Berechnungen daher unter Umständen ineffizient oder gar unmöglich machen. Dieses Problem wird auch als "Fluch der Dimensionalität" bezeichnet, ein Begriff, der vom Mathematiker Richard Bellman eingeführt wurde [125]. Bei einer komplexen Umgebung, wie es in der militärischen Domäne vorherrscht, stellt die Identifikation der Variablen eine große Herausforderung dar. Die Verwendung eines Ersatzmaßes, um den Effekt anderer Variablen auszudrücken kann eine Möglichkeit sein den Zustandsraum zu reduzieren. Diese und weitere Aspekte/Techniken zur Modellierung eines MDPs sind u.a. in [126] anhand von konkreten Anwendungsbeispielen zusammengefasst worden.

Um die nötigen Einflussfaktoren auf die Zustandsdefinition herauszufinden, ist es sinnvoll die grundlegenden Aktionen näher zu betrachten. Aus diesen lassen sich dann sinnvolle Zustandsvariablen ableiten. Im Rahmen der Modellierung des MDPs beschränkte man sich aus Gründen der Vereinfachung bei der Konzeption des Entscheidungsproblems auf Aufklärungsentscheidungen von im Einsatzgebiet befindlichen militärischen Gegnern. Dabei wurden folgende drei Aktionen als mögliche Handlungsoptionen festgelegt:

- **Route umplanen:** Umplanen der aktuellen Marschroute des Schutzobjekts auf eine Alternativroute
- **Aufklärung von Feind x:** Eine Ressource verwenden, um Feind x zu beobachten bzw. aufzuklären
- **Nichts tun:** Keine Handlungsoption unternehmen

Aus diesen Aktionsmöglichkeiten wurden Einflussfaktoren abgeleitet, die auf getroffene Annahmen beruhen und bei der Zustandsbeschreibung berücksichtigt werden. Sie werden im Folgenden näher erläutert. Dafür werden zunächst folgende Notationen eingeführt:

N_E bezeichnet die Anzahl der gegnerischen Einheiten im Missionsgebiet. N_U bezeichnet die Gesamtanzahl der in der Mission beteiligten Ressourcen mit entsprechender Sensorik für Aufklärungsmissionen. Weiterhin soll N_A mit $N_A \leq N_U$ die Anzahl der Ressourcen angeben, die gegenwärtig für Aufklärungsmissionen zur Verfügung stehen. Während des Missionsablaufs kann es vorkommen, dass u.U. Ressourcen aufgrund bestimmter Gegebenheiten (z.B. Datenlinksverlust, Beschädigungen, ...) nicht erreichbar sind bzw. nicht zur Verfügung stehen, um ihnen Aufgaben zuzuweisen.

3.6.6.1 Zustandsbeschreibung

Als entscheidende Einflussfaktoren über die Sinnhaftigkeit zur (erneuten) Aufklärung eines militärischen Gegners wurden zwei Variablen identifiziert. Dies ist zum einen die **Unsicherheit** (engl.: uncertainty) u_e und zum anderen die **Spanne** (engl.: margin) m_e des aktuellen Bedrohungsgrades der gegnerischen Entität e . Mit diesen beiden Variablen wird jede bekannte gegnerische Einheit beschrieben. Die zugrundeliegende Annahme hinter der Wahl dieser Variablen ist, dass eine erneute Aufklärung eines Gegners nur Sinn ergibt, wenn man ein verändertes Aufklärungsergebnis erwartet. Es wird als nicht zweckmäßig erachtet, die kostbaren Aufklärungsressourcen an einen Auftrag zu binden, wenn man sich vorher schon ziemlich sicher ist, welches Ergebnis der Einsatz liefern wird. Weiterhin wird angenommen, dass es überflüssig ist, einen Gegner erneut aufzuklären, der zwar mit großer Unsicherheit behaftet ist, man jedoch nur eine geringe Änderung des Bedrohungsgrades erwartet. Gründe dafür könnten zum Beispiel sein, dass der Gegner zu weit entfernt ist, um unabhängig vom konkreten Feindtyp eine Bedrohung darzustellen.

Der Faktor für die **Unsicherheit** ist ein Maß für die Verlässlichkeit der beobachtbaren Informationen und wird für jeden Referenzpunkt und der aktuellen Position des Schutzobjekts bestimmt. Bei der Berechnung wird zunächst für jede beobachtbare Variable (siehe Kap. 3.4.1.4) dessen Wahrscheinlichkeitsverteilung unter Berücksichtigung der aktuellen Evidenzen ermittelt. Anschließend wird dessen Abweichungen von den aktuellen Evidenzen berechnet. Die Differenzen werden gemittelt und mit dem Alter des Aufklärungsergebnisses multipliziert, um den Einfluss des zeitlichen Faktors bei der

Unsicherheit mit einzubeziehen. Je älter ein Aufklärungsergebnis ist, desto größer soll die Unsicherheit werden. Formal lässt sich der Unsicherheitsfaktor u der gegnerischen Entität e ausdrücken mit

$$u(e) = \frac{\sum_{b \in B} f_{norm} (|P_{marg}(b) - P_{evid}(b)|)}{|B|} f_{recAge}(e), \quad (3.18)$$

wobei B die Menge der beobachtbaren Variablen bzw. Informationsvariablen (siehe Kap. 3.4.1.4) darstellt, $P_{marg}(b)$ die Wahrscheinlichkeit der Variable $b \in B$ ermittelt und $P_{evid}(b)$ die Wahrscheinlichkeit der Evidenz der Variable b berechnet. Die Funktion $f_{recAge}(e)$ liefert die vergangene Zeit seit der letzten Aufklärung des Feindes e in Sekunden.

Der Faktor für die **Spanne** ist das Maß für die mögliche Veränderung des Bedrohungsgrads, wenn man durch erneute Aufklärung bessere Ergebnisse erzielen sollte. Dabei werden als Berechnungsgrundlage die Einheitentypen gewählt, der mit dem aktuell identifizierten Typ verwechselt werden könnten und in einen geringeren bzw. höheren Bedrohungsgrad resultieren würde. Beispielsweise könnte eine Person mit einer Handfeuerwaffe mit einer Person, die ein MANPAD trägt, verwechselt werden. In diesem Fall würden für diese beiden möglichen Einheitentypen jeweils der Bedrohungsgrad und die Differenz ermittelt werden. Da eine Person mit Handfeuerwaffe weniger Bedrohung darstellt als ein MANPAD, würde entsprechend die Bedrohungswahrscheinlichkeit bei einer Handfeuerwaffe wesentlich geringer ausfallen als bei einer MANPAD-Bewaffnung bei sonst gleichen Merkmalen (z.B. Distanz, Geschwindigkeit, etc.). Formal lässt sich die Spanne m für einen Gegner e ausdrücken mit

$$m(e) = P_{thr_{high}}(e) - P_{thr_{low}}(e) \quad (3.19)$$

wobei $P_{thr_{high}}(e)$ den höchsten möglichen Bedrohungsgrad und $P_{thr_{low}}(e)$ den niedrigsten möglichen Bedrohungsgrad für den Feind e zurückliefert. Auch bei dieser Berechnung wird für jeden Referenzpunkt der Faktor der Spanne bestimmt.

Neben diesen beiden Variablen, die für jede gegnerische Einheit bestimmt werden, werden zur Beschreibung eines Zustands noch zwei weitere Einflussfaktoren hinzugefügt. Für die Frage, ob eine Ressource zur Aufklärung genutzt werden soll, ist die **Anzahl der verfügbaren Ressourcen** (number recon resources, N_A) relevant. Als zweite zusätzliche Variable wird der **Bedrohungsgrad der gesamten Route** (threat to route, Thr) durch alle militärischen Gegner betrachtet. Dadurch kann beurteilt werden, ob die Aufklärung einzelner Gegner noch zweckmäßig ist oder die Marschrouten neu geplant werden sollte.

Diese vier gewählten Variablen wurden als Grundlage für die Modellierung des Zustandsraums herangezogen. Die Gesamtzahl der Variablen hängt damit vorwiegend von N_E und N_U ab.

Zur Beschreibung eines Zustands werden die Variablen als Vektor dargestellt. Wenn U für die Zufallsvariable der Unsicherheit steht, M für die Zufallsvariable der Spanne, N_U für die Anzahl der UAVs und Thr für die Zufallsvariable des Bedrohungsgrads, kann die Anzahl der möglichen Zustände S_V durch folgende Formel ausgedrückt werden:

$$S_V \quad (3.20)$$

wobei mit U_V, M_V und Thr_V die Kardinalitäten der Variablen gemeint ist. Mit zunehmender Anzahl an Gegnern wächst der Zustandsraum bereits um ein Vielfaches. Bei einer Diskretisierung von $U_V = 3$ und $N_U = Thr_V = 4$ würden sich bei $N_E = 3$ beispielsweise schon 11664 mögliche Zustände ergeben. Besonders deutlich wird das Problem, wenn man bedenkt, dass die Übergangswahrscheinlichkeiten als Matrix dargestellt werden, um ein MDP zu lösen. Für jede Aktion hat diese Matrix eine Größe von $S_V \times S_V$, was bei der Zustandsanzahl im genannten Beispiel einer Größe von $11.664^2 = 136.048.896$ entspricht. Das hat einen erheblichen Einfluss auf den Speicherbedarf und Rechenaufwand. Um die Anzahl der Zustände zu reduzieren wurden deswegen die beiden Variablen der Unsicherheit und Spanne zu einer Variablen mit der Bezeichnung **Aufklärungswert** (engl.: recon value) zusammengefasst. Dieser Wert stellt das Pendant zu den Aufklärungswerten aus der IM, die für die Berechnung von Aufklärungsrouten genutzt wird, dar und beschreibt den Aufklärungswert gegnerischer Einheiten. Die Berechnung der Variablen erfolgt durch folgende Vorschrift:

$$rv_i = \alpha \ln(u_i + (1 - l_u)) + \beta \ln(m_i + (1 - l_m)) \quad (3.21)$$

Dabei ist u_i und m_i der Faktor für die Unsicherheit bzw. Spanne bezogen auf die i -te gegnerische Einheit. Die natürliche Logarithmusfunktion \ln besitzt Eigenschaften, die folgende Kriterien erfüllen: Erstens existiert ein Grenzwert, unter dem das Resultat negativ wird. Dieses Limit wird über die Parameter $l_u, l_m \in R$ gesteuert. Dadurch ist sichergestellt, dass Werte unterhalb dieses Schwellwerts den resultierenden Aufklärungswert reduzieren. Das bedeutet, dass eine niedrige Unsicherheit oder eine niedrige Spanne auch dafür sorgt, dass der Aufklärungswert niedriger ausfällt. Das ist im Sinne der Bedeutung dieser beiden Variablen. Niedrige Werte sollen gegen ein erneutes Aufklären sprechen und deswegen den Aufklärungswert reduzieren. Die zweite Eigenschaft der \ln -Funktion bezieht sich auf deren Grenzwert gegen unendlich, welcher bei 0 liegt, wenn $x \rightarrow \infty$. Das bedeutet, dass ein Wert keinen beliebig großen Einfluss auf das Gesamtergebn hat, wenn ein bereits hoher Wert noch höher wird. Auf diese Weise wird verhindert, dass ein hoher Wert einen niedrigen überwiegt und der Einfluss der Variablen mit niedrigem Wert nahezu keinen Einfluss mehr auf den Aufklärungswert hat. Die Parameter $\alpha, \beta \in R$ sind

Gewichtsfaktoren für die Linearkombination. Ein Beispiel des Funktionsverlaufs des Aufklärungswerts ist in Abbildung 3-15 dargestellt.

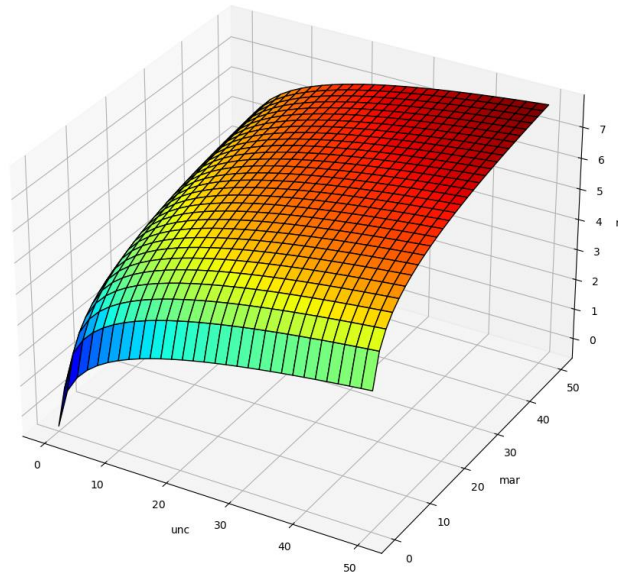


Abbildung 3-15: Graphische Darstellung des Aufklärungswerts mit $\alpha = \beta = 1, l_u = 0.35, l_m = 0.07$

Damit wird ein Zustand $s \in S$ durch die drei diskreten Variablen Aufklärungswert R , Anzahl der verfügbaren UAVs N_A und Bedrohungsgrad der Gesamtroute Thr beschrieben. Dabei ist die Anzahl der benötigten Variablen für die Beschreibung der Aufklärungswerte abhängig von der Anzahl der militärischen Gegner N_E . Die Gesamtanzahl der Variablen n_{var} zur Beschreibung eines Zustands berechnet sich damit zu $n_{var} = N_E + 2$. Die Zustandsbeschreibung besteht damit aus einem Tupel aus n_{var} Variablen, wobei die Variablen so angeordnet sind, dass zuerst für alle militärischen Gegner die Aufklärungswerte angegeben werden, gefolgt von den Werten von N_A und Thr . Die Indizes der Variablenpositionen beschreiben den militärischen Gegner, auf den sich die Werte beziehen. Für zwei militärische Gegner ergäbe sich damit ein Tupel der Form $(\mathfrak{R}_{c_0}, \mathfrak{R}_{c_1}, N_A, Thr)$.

3.6.6.2 Aktionsraummodellierung

Der Aktionsraum A bildet die eingangs erwähnten Handlungsoptionen ab, die genutzt werden, um von einem Zustand s in einen gewünschten Zielzustand s' zu gelangen. Eine Aktion $a \in A$ wird als Vektor $a = (a_1, a_2, \dots, a_{N_E+1})$ mit $a_i \in \{0,1\}; i \in \{1,2, \dots, N_E + 1\}$ repräsentiert. Der Nullvektor, d.h. $a = (0,0, \dots, 0)$, steht für die Aktion **Nichts tun**. Der Vektor mit $a_{N_E+1} = 1$ repräsentiert die Aktion **Route umplanen**. Bei der Aktion **Aufklärung von Feind x** variiert die Anzahl der Möglichkeiten in Abhängigkeit

der insgesamt am Missionsgeschehen beteiligten gegnerischen Einheiten N_E , wobei bei den beschreibenden Vektoren dieser Aktion $a_{N_E+1} = 0$ gilt. Das heißt die Permutationen von $(a_1, a_2, \dots, a_{N_E})$ repräsentieren die Möglichkeiten der Aktion **Aufklärung von Feind x**. Die Anzahl der Einsen in diesen Vektoren überschreitet dabei nicht die Anzahl der zur Verfügung stehenden Aufklärungsressourcen, d.h. es gilt $\sum_{i=2}^{N_E+1} a_i \leq N_U$. Mit $N_E = 2$ ergeben zum Beispiel die Permutationen $a = (1,0,0)$ (Mit Ressource 1 Gegner 1 aufklären), $a = (0,1,0)$ (mit Ressource 2 Gegner 2 aufklären), $a = (1,1,0)$ (mit Ressource 1 Gegner 1 und Ressource 2 Gegner 2 aufklären). Die Anzahl der sich daraus ergebenden Aktionen für den Aktionsraum A berechnet sich damit für N_E gegnerische Einheiten und N_U verfügbaren Aufklärungsressourcen folgendermaßen:

$$A \vee 2 + \sum_{i=0}^{N_U} \binom{N_E}{i} \quad (3.22)$$

3.6.6.3 Übergangswahrscheinlichkeiten

Die Funktion $p: S \times A \rightarrow \Delta S$ beschreibt die Übergangswahrscheinlichkeit von einem Zustand $s \in S$ zu einem Zielzustand $s' \in S$ unter Anwendung der Aktion $a \in A$ in s . Sie beschreibt demnach das Verhalten der Umgebung unter Beeinflussung der ausgeführten Aktionen. Um dieses Verhalten zu modellieren wird die Tatsache der Unabhängigkeit der Variablen des Zustandsraums ausgenutzt. Das Wissen über den Aufklärungswert R ist unabhängig von der Anzahl der verfügbaren Aufklärungsressourcen N_A und dem Grad der Bedrohung der Marschroute Thr . Damit kann die Unabhängigkeitsbeziehung zwischen zwei Variablen x und y der Form

$$P(x, y) = P(x)P(y) \quad (3.23)$$

genutzt werden, wobei $P(x)$ die Wahrscheinlichkeit der Variable x ist und $P(y)$ die Wahrscheinlichkeit der Variable y . Angewendet auf die Variablen des Zustandsraums ergibt sich damit folgende Rechenvorschrift:

$$P(s'|s, a) = P(N'_A|N_A, a)P(t'|t, a) \prod_{i=0} P(r'_i|r_i, a) \quad (3.24)$$

Die Variablen $t, t' \in Thr$ sind die diskreten Bedrohungswerte bezogen auf die Marschroute, $r_i, r'_i \in R$ sind die diskreten Aufklärungswerte des militärischen Gegners i im Zustand $s \in S$ bzw. dem Zielzustand $s' \in S$. Schließlich ist $a \in A$ die Aktion, die in Zustand s ausgeführt wird.

3.6.6.4 Belohnungen

Weiterhin ist eine nicht zu unterschätzende Herausforderung eine geeignete Wahl der Belohnungsfunktion, da sie maßgeblich die Strategie beeinflusst. Die Funktion muss so gewählt sein, dass das gewünschte Verhalten des Agenten auch entsprechende Belohnungswerte generiert, während unerwünschtes Verhalten “Bestrafungspunkte” zur Folge hat. Dabei gilt, dass die Festlegung von Belohnungen nicht der Platz ist, um dem Agenten Vorwissen darüber zu vermitteln, wie der Agent das gewünschte Ziel erreichen kann bzw. was man von ihm erwartet. Bei der Wahl einer geeigneten Belohnungsfunktion muss beachtet werden, dass sie eine Art der Kommunikation zum Agenten darstellt, um ihm mitzuteilen, was man von ihm erwartet und nicht wie man möchte, dass er ein Ziel erreicht.

Die Funktion $r: S \times A \rightarrow R$ bildet die Belohnungen ab. Die Werte werden in einer Matrix $A \times S \times D^{NE}$ gespeichert. Der Ausdruck D^{NE} , wobei D die Kardinalität der diskreten Zeitentfernungen zwischen einer gegnerischen Einheit und einer Aufklärungsressource darstellt, ist die Anzahl der möglichen Kombinationen von Zeitentfernungen zwischen jedem Gegner und Aufklärungsressource. Die Entfernung wird nicht in dem Zustandsraum abgebildet, um dem “Fluch der Dimensionalität” (vgl. Kap. 3.6.6) entgegenzuwirken. Dies erfordert zwar, dass D^{NE} MDPs gelöst werden müssen, allerdings bleibt der Zustandsraum dadurch beherrschbar.

3.6.6.5 Optimalitätskriterium

Neben der Belohnungsfunktion gibt es noch eine weitere Möglichkeit das Verhalten des Agenten über die Wertefunktion zu beeinflussen. Sie gibt an, wie wertvoll ein Zustand unter einer Strategie für die verschiedenen ausführbaren Aktionen ist, d.h. sie gestaltet den Belohnungsprozess. Abhängig von dem gewählten Optimalitätskriterium fällt die Wertfunktion entsprechend anders aus. Für die Umsetzung wurde das Diskontierungskriterium gewählt, da die Annahme ist, dass zukünftige Belohnungen an Wert verlieren. Es ist definiert als

$$E[r_0 + \gamma r_1 + \gamma^2 r_2 + \dots + \gamma^t r_t + \dots \vee s_0] = E \left[\sum_{t=0}^{\infty} \gamma^t r_t \right] \quad (3.25)$$

$E[\]$ bezeichnet den Erwartungswert und r_t den Belohnungswert im Zeitschritt t . Der Diskontierungsfaktor $\gamma \in [0, 1]$ ist ein Faktor, der in Abhängigkeit des Zeitpunkts t die Belohnungen gewichtet. Es werden also zukünftige Belohnungen diskontiert.

Für das Diskontierungskriterium sieht die Definition der Wertfunktion folgendermaßen aus:

$$V_{\gamma}^{\pi}(s) = E^{\pi}[r_0 + \gamma r_1 + \gamma^2 r_2 + \dots + \gamma^t r_t + \dots | s_0 = s] = E^{\pi} \left[\sum_{t=0}^{\infty} \gamma^t r_t | s_0 = s \right] \forall s \in S \quad (3.26)$$

Schließlich gilt es einen Algorithmus anzuwenden, der das MDP löst. Der value iteration Algorithmus ist der am weitesten verbreitete Algorithmus, um ein MDP zu lösen, bei denen ein Diskontierungskriterium zugrunde liegt.

3.7 Human-Machine-Interaction - Mensch-Maschine-Kollaboration

Schließlich gilt es die Zusammenarbeit zwischen Mensch und Maschine zu ermöglichen. Ausgangspunkt für eine Interaktion seitens des Agenten bildet die Situationsinterpretation (vgl. Kap. 3.5). Auftretende Situationen werden sequentiell abgearbeitet, d.h. es wird jeweils nur immer eine Assistenzsituation an den Nutzer herangetragen. Dementsprechend sind zwei Operationsmodi des Agenten vorgesehen, die nachfolgend im Unterkapitel **Interventionsmechanismus und Agentenzustand** erläutert werden. Anschließend wird auf die Aufbereitung von Mitteilungen für den Nutzer eingegangen.

3.7.1 Interventionsmechanismus und Agentenzustand

Im Zuge der Konzipierung werden zwei Modi des Agenten unterschieden. Der erste Modus ist ein passiver Modus, in dem der Agent nicht eingreift und die Umgebung lediglich beobachtet. Dies entspricht der Grundforderung von [119] den Menschen die Arbeit selbst durchführen zu lassen. Man kann dies als Regel 0 interpretieren, in der der Agent eine Beobachterrolle einnimmt. In diesem passiven Modus liegt der Fokus rein auf dem Aufbau eines maschinellen SA und der Prüfung definierter Assistenzsituationen. Tritt eine Assistenzsituation auf, wechselt der Agent in den aktiven Modus. In diesem Modus wird entsprechend der auftretenden Situation und der Kritikalitätsstufe ein automatisiertes Verhalten ausgelöst, welches dazu führt, dass der Agent in Interaktion mit dem Menschen tritt. Dabei wird dem Nutzer das aufgetretene Problem und potentielle Lösungsansätze kommuniziert. Der Agent verbleibt in diesem Modus solange, bis die Situation gelöst wurde, d.h. es kann zu einem Zeitpunkt immer nur eine Unterstützungsleistung zu einer Assistenzsituation aktiv sein. Gelöst ist eine Situation dann, wenn entweder der Nutzer selbst manuelle Tätigkeiten unternimmt, die die Bedingungen der Situation derart ändern, dass sie nicht mehr erfüllt sind oder er in Interaktion mit dem Agenten tritt und durch Annehmen/Ablehnen von Lösungsvorschlägen die Situation löst. Entgegen der Regel (3) des Regelwerks (vgl. Kap. 3.5) wird der Agent jedoch niemals selbstständig eine Aufgabe ausführen, sondern immer auf eine Bestätigung bzw. Eingabe des Nutzers warten. Die Annahme dahinter ist, dass die Wahl eines taktischen Vorgehens auf Erfahrungen und Intuition

basiert, sowie eine auf persönliche Präferenz ausgerichtete Tätigkeit ist. Ein direktes Eingreifen des Agenten, um beispielsweise Einheiten auf der Karte zu verschieben, könnten dazu führen, dass es entgegen dem taktischen Vorgehen des Kommandanten gerichtet ist und daher kontraproduktiv sein kann. Allerdings ist eine Abstufung der Entscheidungshilfe vorgesehen. Sollte der Nutzer keinerlei Eingaben vollziehen und die Situation in der aktuellen Kritikalitätsstufe nicht weiterbestehen, wird das Assistenzsystem die Kommunikation selbstständig abbrechen und eine Zeit lang warten, bis es wieder mit der Prüfung fortsetzt. Die Annahme hinter dieser Designentscheidung ist, dass das System dann davon ausgeht, dass der Nutzer sich mit anderen wichtigen Tätigkeiten beschäftigt. Um zu verhindern, dass die gleiche Situation sofort wieder zurückkehrt und um keine Störung zu verursachen, wartet das System ein bestimmtes Zeitfenster ab, bevor es wieder in den passiven Beobachtungsmodus wechselt. Die Übergänge und Zustände bzw. Modi des Agenten sind schematisch in Abbildung 3-16 abgebildet.

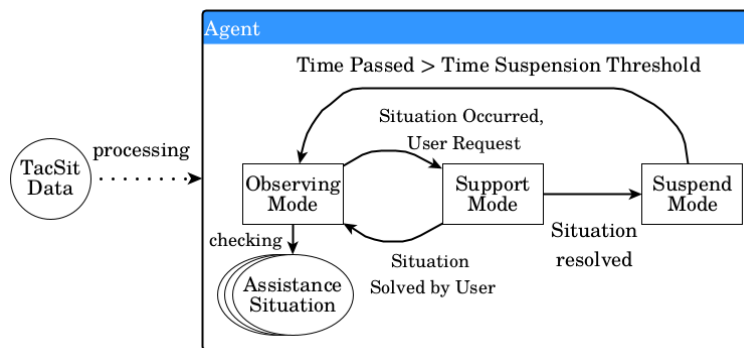


Abbildung 3-16: Zustandsbeschreibung des Agenten zum Assistenzmodus

3.7.2 Mitteilungen und Eingabeverarbeitung

Ein wichtiger Bestandteil bei der Konzeption ist die Aufbereitung der vom Agenten errungenen Erkenntnisse und Empfehlungen in eine für den Menschen interpretierbare Form. Schließlich müssen die Ergebnisse und Antworten des Agenten dem Menschen in verständlicher Form präsentiert werden. Zur Generierung einer präsentierbaren Form von Mitteilungen zählen auch die zu einem Sachverhalt bezogene Interaktionsmöglichkeiten, die es dem Nutzer ermöglichen Antworten zu geben.

Dazu zählt auch die Transparenz des Agenten. Nicht zuletzt ist die Transparenz ein wichtiger Faktor für eine schnellere Nachvollziehbarkeit für den Nutzer. Beim Auftreten einer Assistenzsituation ist daher die Ursachenforschung und -kommunikation unerlässlich. Um die Ursache einer aufgetretenen Assistenzsituation dem Menschen näherzubringen wird deswegen hierfür ein Mechanismus eingeführt, der eine Analyse der aufgetretenen Assistenz unternimmt. Neben den für die Assistenzsituation relevanten

Prüfregeln wird hierbei vor allem auf die Baumstruktur des IM-Trees zurückgegriffen (vgl. Kap. 3.4.3). Da jeder Knoten des Baums mit einer semantischen Bezeichnung bzw. Beschreibung versehen ist, können über geeignete Rückwärtssuchverfahren die IMs gefunden werden, die einen entscheidenden Anteil an dem resultierenden Wert der IM haben, aus welcher das Risiko berechnet wurde.

In diesem Bereich sind auch auf theoretischer Ebene Verfahren vorgesehen, die Verknüpfungen zwischen den angewandten Algorithmen in der **Tactical Decision-Making**-Komponente und weiteren Wissensrepräsentationen (z.B. Ontologien) herstellen, um die Nachvollziehbarkeit, Verständlichkeit und Erklärbarkeit von den Ausgaben der Entscheidungsalgorithmen zu ermöglichen. An dieser Stelle deuten sich bereits gewisse Richtlinien an, die sich auf den Einsatz bestimmter Methoden für die Lösung von Problemen beziehen. Damit eine vernünftige Erklärung überhaupt abgeleitet werden kann, sind Algorithmen notwendig, die das ermöglichen. Das Gebiet der sog. Explainable AI ist ein eigenes Forschungsgebiet und beschäftigt sich v.a. mit der Fragestellung, wie man die durch Algorithmen gefundenen Entscheidungen dem Menschen nachvollziehbar machen kann. Dieser Aspekt wurde bei dem Entwurf des Konzepts mitberücksichtigt, soll jedoch nicht der primäre Fokus dieser Arbeit sein.

Die aufbereiteten Informationen, d.h. die Benachrichtigung, zusätzliche Erklärungen und Lösungsvorschläge, werden schließlich an den Nutzer herangetragen.

Eingehende Anfragen des Nutzers werden ebenfalls entgegengenommen und entsprechend dem Anfragetypus Funktionen zur Beantwortung der jeweiligen Anfragen ausgelöst. Auch hier bietet sich die Möglichkeit mittels geeigneter Methoden wie beispielsweise probabilistischer Modelle, die die taktische Absicht des Nutzers abzuschätzen und entsprechend Parameteranpassungen in der Wissensmanagementebene vornehmen, um damit eine Anpassung des Agenten an das jeweilige taktische Vorgehen des Nutzers vorzunehmen. Dieser Aspekt wurde im Konzept berücksichtigt, liegt jedoch nicht im Fokus dieser Arbeit. Sowohl die Erklärbarkeit als auch die Absichtserkennung sind an sich komplexe Themengebiete, die einen eigenen Forschungsraum aufspannen.

3.8 Agentensystementwurf

Die einzelnen Komponenten sind in einem Agentensystemarchitekturentwurf mit einer Schnittstelle zum menschlichen Operator zusammengefügt worden (Abbildung 3-17). Der Entwurf wurde in einer ersten Version in [118] präsentiert und besteht aus vier Bestandteilen: dem Agenten, dem Nutzer, der taktischen Kontrollschnittstelle und der Umgebung.

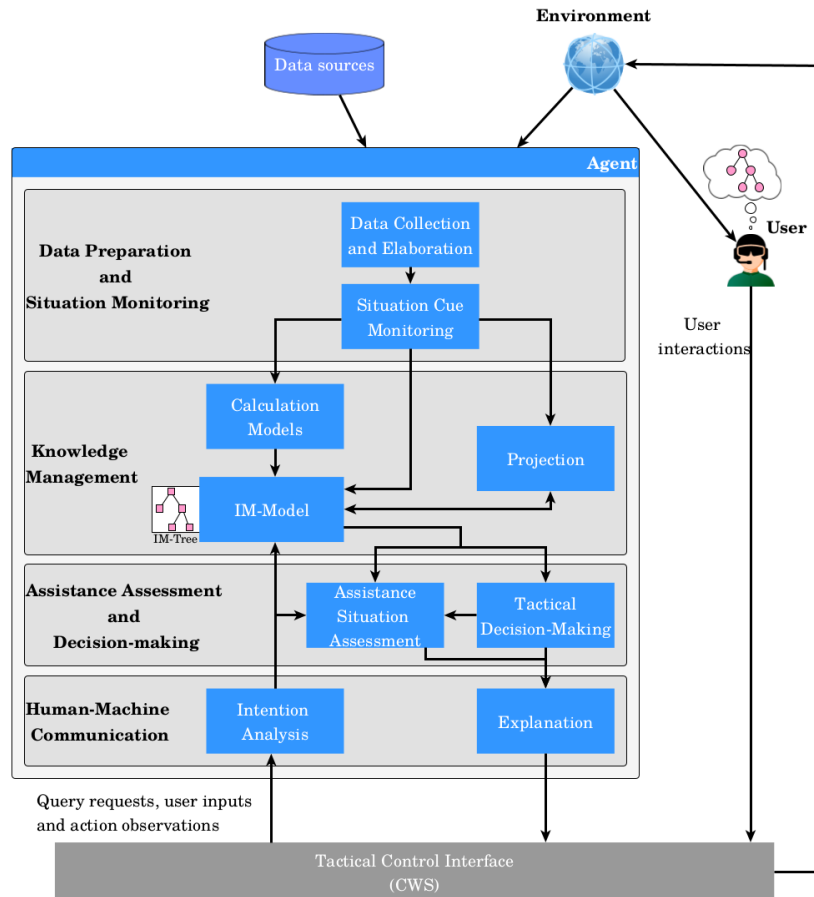


Abbildung 3-17: Systemarchitektur

Beide Akteure, der Agent als auch der Operateur kommunizieren über die taktische Kontrollschnittstelle (Tactical Control Interface, TCI), die dem CWS entspricht. Der Agent entnimmt die Informationen aus der Umgebung, den Interaktionen mit dem Menschen und anderen sonstigen zugänglichen Informationsquellen, wie Datenbanken.

Der Aufbau des Agenten gliedert sich in vier Ebenen. Die erste Ebene ist die **Datenaufbereitung und Situationsüberwachung (Data Preparation and Situation Monitoring)**. Sie beschäftigt sich mit der Aufbereitung von Daten und führt Prüfungen nach signifikanten Änderungen durch. Zweite Ebene bildet das **Wissensmanagement (Knowledge Management)**, die für die Generierung und Verwaltung von Wissen über die taktische Situation verantwortlich ist. Die Ebene **Folgenabschätzung und Entscheidungsfindung (Impact Assessment and Decision-Making)** enthält die Logik zur Prüfung nach potentiellen Assistenzsituationen und Entscheidungsfindungsfunktionen. Diese drei Ebenen enthalten damit grundlegende Komponenten, die auch in vielen anderen Agentenarchitekturen vorhanden sind (siehe Kap.

2.6.2). Wesentlicher Unterschied ist, dass der Agent darauf ausgelegt ist eine Assistenzrolle einzunehmen und mit dem Menschen kollaborativ zusammenarbeitet. Zur Bewerkstelligung dieser Zusammenarbeit ist v.a. die letzte Ebene, **Mensch-Maschine-Kommunikation (Human-Machine Communication)**, vorgesehen. Sie umfasst Komponenten, die für die Kommunikation zwischen Mensch und Maschine notwendig sind. Konzeptionell ist hier auch eine Komponente eingebettet, die für Absichtserkennungen des Menschen zuständig ist.

3.8.1 Datenaufbereitung und Situationsüberwachung

In dieser Schicht werden die über die **Data Collection and Elaboration**-Komponente eingehenden Daten aus der Umgebung und anderen Informationsquellen empfangen bzw. eingelesen, relevanten Daten gefiltert und für die **Situation Cue Monitoring**-Komponente zur Weiterverarbeitung aufbereitet. Diese Schicht entspricht im Wesentlichen dem Bereich der Informationsbeschaffung (Object Assessment).

Die eingehenden Daten werden im **Situation Cue Monitoring** entsprechend dem in Kap. 3.3 geschilderten Prüfmechanismus analysiert. Ein Datenfluss besteht zwischen den Berechnungsmodellen (**Calculation Models**), die die aufbereitenden Daten verarbeiten und dem **IM-Model**, sowie der **Projection** zur Parameteranpassung bzw. bei dem **IM-Model** auch für die Durchführung eines Bewertungsprozesses. Ein Auslösereiz startet den Bewertungsprozess in der Wissensmanagementebene, wodurch Teilstrukturen des Wissensmodells aktualisiert werden, die mit diesem Auslösereiz assoziiert sind. Alle aufbereiteten Daten werden dafür an die Wissensmanagementschicht weitergeleitet, inklusive der Information, die den Auswertungszyklus gestartet hat.

3.8.2 Wissensmanagement

Die Wissensmanagementebene besteht aus den Komponenten **Calculation Models**, **IM-Model** und **Projection**. Über diese Elemente wird unter Zuhilfenahme eines mentalen Modells, dem IM-Tree (pinkfarbenes Symbol am **IM-Model** in Abbildung 3-17), das Situationsbild erzeugt. Die Komponenten bilden damit einen wesentlichen Bereich der Situationsrepräsentation (Situation Assessment) ab. Dabei werden alle notwendigen Informationen im **IM-Model** hinterlegt und können durch andere Komponenten angefragt werden. Die **Projection**-Komponente bietet die Möglichkeit Positionen von Entitäten aus der taktischen Information in die Zukunft zu projizieren und damit zukünftige Situationsentwicklungen abzuschätzen. Da bei der Vorhersage von einer Situationsentwicklung die Verhaltensweisen entsprechend einer Doktrin und Absichten des militärischen Gegners einbezogen werden können, ergeben sich daraus komplexere Ansätze im Vergleich zu Vorhersagen, die rein Bewegungsrichtungen berücksichtigen. Aus diesem Grund wurde für die Projektion eine eigene Komponente vorgesehen. Das Resultat einer möglichen Projektion wird wiederum in einen separaten IM-Tree abgespeichert. Auf diese Weise können zukünftige

Situationsrepräsentationen für beliebige Zeitpunkte in der Zukunft berechnet werden, die wiederum verwendet werden können, um daraus Schlussfolgerungen zu ziehen, etwa für die Wahl einer geeigneten Handlungsoption. Zwar ist die **Projection**-Komponente streng genommen Bestandteil der Folgenabschätzung (Impact Assessment), wurde aber dieser Schicht zugeordnet, da eine Projektion einer Situation ebenso eine Repräsentation ist und damit Wissen darstellt.

3.8.3 Folgeabschätzung und Entscheidungsfindung

In der Komponente **Assistance Situation Assessment** wird das Eintreten einer Assistenzsituation geprüft und bei Eintreten einer Situation eine zu der Kritikalitätsstufe definierte Lösungsstrategie unter Verwendung des taktischen Wissens angewendet. Die Lösungsvorschläge werden als Empfehlungen an den Nutzer über die Mensch-Maschine-Kommunikationsschicht und Taktische Kontrollschnittstelle weitergereicht.

Alle Assistenzsituationen, die in dem Agentensystem hinterlegt werden, werden sequentiell abgearbeitet. Dabei wird für jede Assistenzsituation geprüft, ob eine assoziierte Kritikalitätsstufe aufgetreten ist. Die Reihenfolge der Abarbeitung gibt die Priorisierung einer Assistenzsituation vor. Tritt eine Assistenzsituation ein, versucht der Agent eine Lösung zur taktischen Vorgehensweise mit Hilfe der Entscheidungsfindungsfunktionen der **Tactical Decision-making**-Komponente entsprechend der Automationsstufe zu finden.

3.8.4 Mensch-Maschine-Kommunikation

Als Austauschmedium zwischen Mensch und Maschine dient das **Tactical Control Interface (TCI)**. Hierüber werden analog zu dem CWS (vgl. Kap. 2.2.5) Informationen ausgetauscht und die SA des Menschen und Maschine abgeglichen und koordiniert. Zusätzlich kann der Nutzer Einfluss auf die getroffene Entscheidung des Agenten nehmen und Lösungsvorschläge modifizieren. Das TCI ist schließlich die Schnittstelle, über die getroffene Entscheidungen in Aktionen umgesetzt werden und die Umwelt beeinflussen.

Um die Analyseergebnisse dem Menschen mitzuteilen müssen die Informationen und Lösungsvorschläge für den Menschen aufbereitet werden. Dies geschieht in der Mensch-Maschine-Kommunikationsebene. Die **Explanation**-Komponente erzeugt eine für den Menschen verständliche Form der Situation und Lösungen und analysiert die Ursache für die aufgetretene Assistenzsituation entsprechend dem Rückwärtssuchverfahren im IM-Tree (vgl. Kap. 3.7.2).

Die **Intention Analysis**-Komponente verarbeitet Nutzereingaben, ermittelt dessen Absicht und beeinflusst mit den Resultaten Parameterwerte im IM-Model oder gibt Antworten an die **Assistance Situation Assessment**-Komponente weiter.

4 | IMPLEMENTIERUNG IN DER DOMÄNE MANNED-UNMANNED TEAMING

Der Agentenentwurf wurde in einem Forschungssimulator technisch für Missionsszenarien aus der Domäne des **Manned-Unmanned-Teaming (MUM-T)** umgesetzt. Bevor die technische Realisierung des Agentenkonzepts beschrieben wird, wird zunächst diese Domäne vorgestellt. Dabei werden zudem die für die Implementierung betrachteten Missionsszenarien beschrieben und auf das Konzept des **Task-Based-Guidance (TBG)** eingegangen, ein Konzept, welches bereits im Simulator umgesetzt wurde und zur Bedienung bzw. Kommandierung von unbemannten Einheiten genutzt wird. Daran anschließend wird der **Forschungssimulator** vorgestellt, in dem das Agentensystem integriert wurde. Anschließend folgt die Schilderung der Implementierung des Agentensystems, das auf den Namen **TacARA: Tactical Analysis and Reconnaissance Assistant** (dt.: TakARA: Taktische Analyse und Aufklärungsassistentin)⁶ getauft wurde, sowie die **Integration im Hubschraubersimulator** mit dem Interaktionsmechanismus zwischen Mensch und Maschine und der Interventionssteuerung.

4.1 Manned-Unmanned-Teaming (MUM-T)

In der modernen Kriegsführung erhalten unbemannte Systeme eine immer größere Bedeutung, welcher v.a. durch den Fortschritt im Bereich der KI begründet ist. Der Einbezug unbemannter Systeme in die Missionsplanung erweitert das Spektrum taktischer Vorgehensweisen und reduziert zugleich das Risiko für Menschen in feindlichen Territorien. Im Bereich der Aufklärung beispielsweise können mit geeigneten Sensoren ausgestattete unbemannte Fluggeräte (engl.: Unmanned Aerial Vehicles, UAVs) im Gefechtsfeld operieren, gezielt Informationen zu örtlichen Umfeldern sammeln (siehe Kap. 2.4) und diese an eine andere bemannte Komponente übertragen. Dadurch ist es menschlichen Operateuren möglich aus sicherer Entfernung Aufklärungsergebnisse für eine bestimmte Operation zu beschaffen, ohne dass sich diese in die Gefahrenzone begeben müssen.

Manned-Unmanned-Teaming (MUM-T) beschreibt das Konzept der Operation bemannter und unbemannter Einheiten im gleichen räumlichen, zeitlichen und intentionalen Kontext. Typischerweise kollaborieren bemannte und unbemannte Einheiten, um ein gemeinsame Arbeitsziel zu erreichen. Dabei können Interaktionen auf taktischer Ebene zwischen menschlichen Operateuren und hoch automatisierten unbemannten Fahrzeugen stattfinden. Das Konzept wird sowohl zu Land, als auch über die See und Luft

⁶ in den folgenden Ausführungen wird die englische Abkürzung TacARA verwendet

eingesetzt. Neben der bereits erwähnten Erweiterung taktischer Möglichkeiten und Gefahrenreduktion für menschliche Einsatzkräfte, trägt die Verknüpfung zwischen menschlicher Intelligenz und der KI in Planungs- und Entscheidungsprozessen dazu bei, die Flexibilität während der Ausführung einer Mission, sowie deren Erfolgsaussichten zu steigern. Allerdings sind mit diesem Konzept auch Herausforderungen verbunden. Die zusätzliche Aufgabe des Kommandierens der UAVs und die Sensorinformationsauswertung erhöhen die Arbeitsbelastung der Besatzung im Cockpit. Zudem benötigt die Steuerung eines herkömmlichen UAVs viel mentale Kapazitäten und ist ohne Zuhilfenahme von Automatisierung nahezu undenkbar. Am IFS wurde deswegen ein Konzept entwickelt, welches der Besatzung an Bord des Hubschraubers erlaubt die UAVs auf eine höhere Abstraktionsebene zu führen, ohne dass ein Eingreifen in Navigation- und Sensorsteuerungselemente notwendig ist. Dieses Konzept ist die auftragsbasierte Führung (engl.: Task-Based-Guidance, TBG).

4.1.1 Task-Based-Guidance (TBG)

Ein zentrales Konzept, auf dem die Umsetzung des Agentensystems aufbaut, ist die auftragsbasierte Führung der UAVs aus dem Cockpit heraus. Mit der auftragsbasierten Führung (engl.: Task-Based Guidance; TBG) ist gemeint, dass der Kommandant an Bord des Hubschraubers Aufträge an die UAVs verteilen kann, ohne sich um konkrete Navigations- und Managementaufgaben kümmern zu müssen. Die Befehle werden auf einer Abstraktionsebene erteilt, die der einer Kommandierung eines Soldaten im Schlachtfeld ähnelt. Die konkrete Durchführung zum Erreichen des Ziels, welches durch den Befehl gegeben ist, entscheidet die zu empfangene Instanz selbst. Jedes UAV ist mit einem Softwareagenten ausgestattet, welcher in der Lage ist abstrakte Befehle entgegenzunehmen, zu interpretieren und notwendige Schritte bzw. Teilaufgaben zur Erfüllung dieses Befehls selbstständig abzuleiten und auszuführen. Ein menschliches Eingreifen ist daher nicht erforderlich. Die UAVs stehen dabei in einem Delegationsverhältnis zum Nutzer und werden von diesem befehligt, indem er über eine taktische Kontrollschnittstelle ein UAV auswählt, auf ein Objekt oder eine Position auf der Karte klickt und die gewünschte Aktion aus einem kontextsensitiven Menü auswählt (d.h. dem Nutzer werden nur realisierbare Optionen zur Auswahl angeboten). Als Schicht zwischen Piloten und den hochautomatisierten Werkzeugen stehen sie in einem an das Supervisory-Control-Verhältnis nach [127] angelehnten Agent-Supervisory-Control-Verhältnis [128].

Die Umsetzung des TBG-Konzepts erfolgte in Vorgängerprojekten (siehe [129] und [130]). Der Agent auf Seiten der UAVs hatte hierzu die Fähigkeit Aufträge zu verstehen und diese unter Verwendung der ihm zur Verfügung stehenden technischen Hilfsmittel umzusetzen. Doch trotz der Vereinfachung der Führung der UAVs durch das TBG-Konzept, wird die Besatzung in dynamischen Lagen, in denen es gilt eine Situation taktisch zu bewerten und Handlungsoptionen abzuleiten, besonders gefordert. Zeitkritische und/oder mit hoher Beanspruchung gekennzeichnete Situationen können zu ineffektiven taktischen

Maßnahmen führen, die den gewinnbringenden Nutzen der UAVs einschränken [6]. TacARA soll diesem Umstand Abhilfe schaffen und bei der Situationsbewertung Hilfestellungen geben, sowie den effektiven Nutzen der UAVs während einer Mission steigern.

4.1.2 UAV-Einsatzzwecke

Für die Umsetzung der automatisierten Entscheidungsfindung zur Generierung taktischer Handlungsoptionen führte man im Zuge einer Experimentalkampagne zu einem Vorgängerprojekt mittels einer qualitativen Befragung von erfahrenen Hubschrauberpiloten eine Vorabstudie durch, um mögliche Einsatzzwecke der UAVs für die Missionstypen eines Transporthubschraubers in Erfahrung zu bringen. Dabei wurden keine Limitierungen seitens der UAV-Ausstattung spezifiziert, damit die Piloten bei ihren Überlegungen nicht eingeschränkt waren. Die Piloten wurden darüber befragt, welche Einsatzzwecke sie bei den UAVs sehen, nachdem sie das Konzept des TBGs in einem Hubschraubersimulator des Instituts für Flugsysteme (IFS) erprobt hatten [6]. Die befragten Piloten waren hauptsächlich Transporthubschrauberpiloten. Sie gaben folgende Handlungsoptionen bezüglich der Einsatzmöglichkeiten der UAVs an:

- Aufklärung eines Objekts (z.B. Route, Gebiet, gegnerische Einheit, ...)
- Verlegung eines UAVs zu einem Ort
- UAV als Relay zur Kommunikationssicherung
- Überwachung eines bestimmten Gebiets
- Angreifen bestimmter Ziele (z.B. gegnerische Stellungen)
- Andere bestimmte Taktiken (z.B. Ablenkungsmanöver, wie Show-Of-Force, bei dem UAVs zu Einschüchterungszwecken absichtlich niedrig über feindliche Stellungen fliegen)

Bei den Aufklärungsaufgaben sahen die Piloten v.a. die Informationsbeschaffung gegnerischer Positionen, sowie die Begutachtung von Landezonen oder zur Schadensbewertung gegnerischer Einheiten, aber auch die Absicherung von Flugrouten bzw. Aufklärung von Gebieten, die strategische Relevanz für eine Mission haben. Die Überwachungsaufgabe unterscheidet sich von der Aufklärungsaufgabe derart, dass bei der Überwachung ein UAV kontinuierlich ein Gebiet bzw. Objekt beobachtet und ein Warnsignal gibt, sobald sich etwas Unerwartetes ergibt (z.B. das Auftreten einer gegnerischen Einheit). Eine normale Aufklärungsmission dagegen hat eine spezifizierte Anfangs- und Endzeit, die sich entsprechend der Dauer der Aufklärung, die ein UAV für ein Objekt benötigt, ergibt.

Eine Herausforderung, mit denen Piloten während der Ausübung eines Einsatzes konfrontiert werden, sind plötzliche Situationsänderungen, die die Besatzung zwingen, eine andere Hubschrauberroute einzuschlagen. Bei der Beauftragung von zur Verfügung stehenden Einsatzkräften für die vom Kommandanten an Bord des Hubschraubers vorgegebenen Missionen besteht damit die Gefahr, dass diese bei einer solchen Lageänderung strategisch ungünstig positioniert sind und damit nicht schnell genug einsatzfähig sind, um auf die Änderung adäquat reagieren zu können. Die taktische Verlegung eines UAVs zu bestimmten Orten wird deshalb als nützlich angesehen, um bei Situationsänderungen schnell reagieren zu können und die UAVs schnellstmöglich einsatzfähig zu haben. Daher muss der Kommandant nicht nur festlegen, welche Aufgaben von den verfügbaren Ressourcen erledigt werden müssen, sondern er muss diese auch intelligent positionieren, um sicherzustellen, dass derartige Situationen möglichst vermieden werden und Maßnahmen schnell ergriffen werden können. Damit verbunden ist die Nutzung des UAVs als Relay zur gesicherten Informationsübertragung.

Die Angriffsmöglichkeit wird primär zum Zweck der Flugwegabsicherung gesehen. Andere Einsatzzwecke, wie z.B. Ablenkungsmanöver oder Show-Of-Force, sind spezielle Taktiken, die unter die Kategorie "Andere bestimmte Taktiken" zusammengefasst wurden.

Aus Gründen der Vereinfachung wurden für die Umsetzung die Handlungsoptionen der UAVs auf speziell die ersten beiden Handlungsmöglichkeiten, die Verlegung eines UAVs und die Aufklärung von Objekten, beschränkt. Bei der Aufklärung wurde die Einschränkung auf der Karte eingetragene gegnerische Einheiten bzw. Punkt-Aufklärung und Routenaufklärung getroffen, damit das Problemfeld eingegrenzt und vereinfacht wird. Routenaufklärung in diesem Fall heißt, dass ein UAV-Sensor entlang einer vorgegebenen Route geführt wird und das umliegende Gebiet darum aufklärt wird. Die Gebietsaufklärung wurde ausgeschlossen, da hierbei meist vordefinierte Aufklärungsmuster eingesetzt werden und dadurch eine höhere Komplexität in das System gebracht wird. Aus den Erkenntnissen der Befragung und den Gegebenheiten des bestehenden Forschungssimulators wurden schließlich eine Beschreibung eines Missionskontexts erarbeitet, in dem das Agentensystem implementiert wurde.

4.1.3 Betrachtete Missionsszenarien

Die Implementierung orientierte sich an militärischen Transporthubschraubermissionen im MUM-T-Kontext. Ein Transporthubschrauber ist ein Mehrzweckhubschrauber, der verwendet wird, um Truppen bzw. Personen und/oder Ausrüstungsgegenstände zu transportieren. In einem konventionellen Transporthubschraubercockpit gibt es üblicherweise zwei Arbeitsplätze, auf die die Aufgaben an Bord des Hubschraubers aufgeteilt werden. Der Kommandant (Air Mission Commander) ist der verantwortliche Luftfahrzeugführer und zuständig für das Missionsmanagement. Der zweite Pilot hat die Primäraufgabe den

Hubschrauber zu fliegen, d.h. er ist zuständig für die Navigation, Kommunikation und dem Systemmanagement.

Die Missionen, die für die Implementierung betrachtet werden, sind dadurch gekennzeichnet, dass drei unbemannte Luftfahrzeuge von den Piloten an Bord des Hubschraubers für Aufklärungszwecke mit Hilfe des TBG-Bedienungskonzepts kommandiert werden. Alle UAVs sind homogen ausgestattet und können rein für Aufklärungszwecke eingesetzt werden, d.h. es gibt keine Bewaffnung. Auch der Hubschrauber verfügt über keine Waffensysteme. Bei den in den Missionsszenarien betrachteten Bedrohungen handelt es sich vorwiegend um gegnerische Bodeneinheiten. Ziel dabei ist es von einem Startpunkt zu einem Zielpunkt zu fliegen und den Flugweg mit Hilfe der UAVs abzusichern. Da die eigenen Truppen über keine Waffen verfügen ist die einzige Maßnahme Ausweichrouten zu planen, um Bedrohungen zu umfliegen. Unter Bezug des in Kap. 3.1.3 beschriebenen Missionstyps entspricht der Transporthubschrauber mit den Piloten an Bord dem hochwertigen Objekt, welches es zu schützen gilt. Die Ressourcen stellen die drei UAVs dar mit der Fähigkeit mittels ausgestatteter elektrooptischer Sensorik Aufklärung zu betreiben. Die Flugrouten des Hubschraubers bilden die Marschrouten ab, entlang derer Sicherungsmaßnahmen eingeleitet werden.

4.1.4 Einbindung von TacARA in das Arbeitssystem

Die Aufgabe von TacARA ist als taktische Assistenz auf Seite der Besatzung in dem Hubschraubercockpit zu fungieren und kollaboriert mit dem Air Mission Commander. Dabei steht TacARA zum Nutzer bzw. dem Menschen in einem Kooperationsverhältnis. Das für dieses Problemfeld erstellte Arbeitssystem ist in Abbildung 4-1 dargestellt.

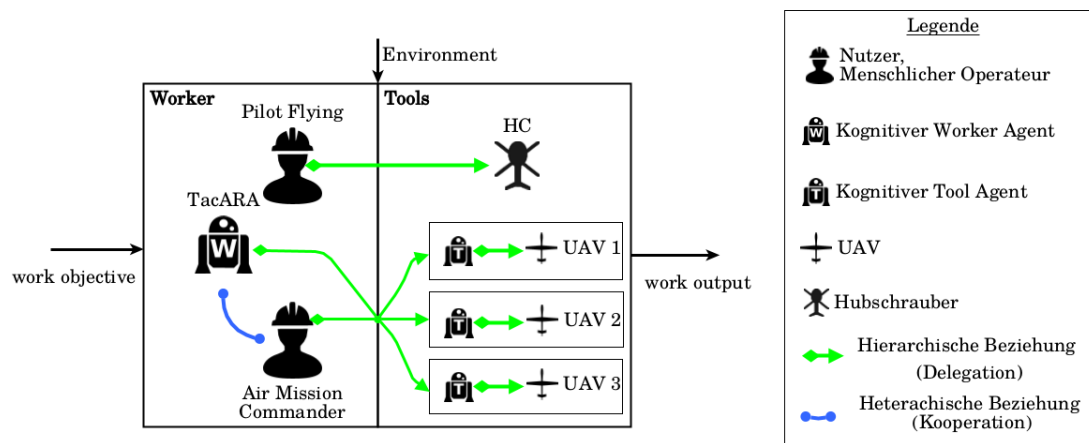
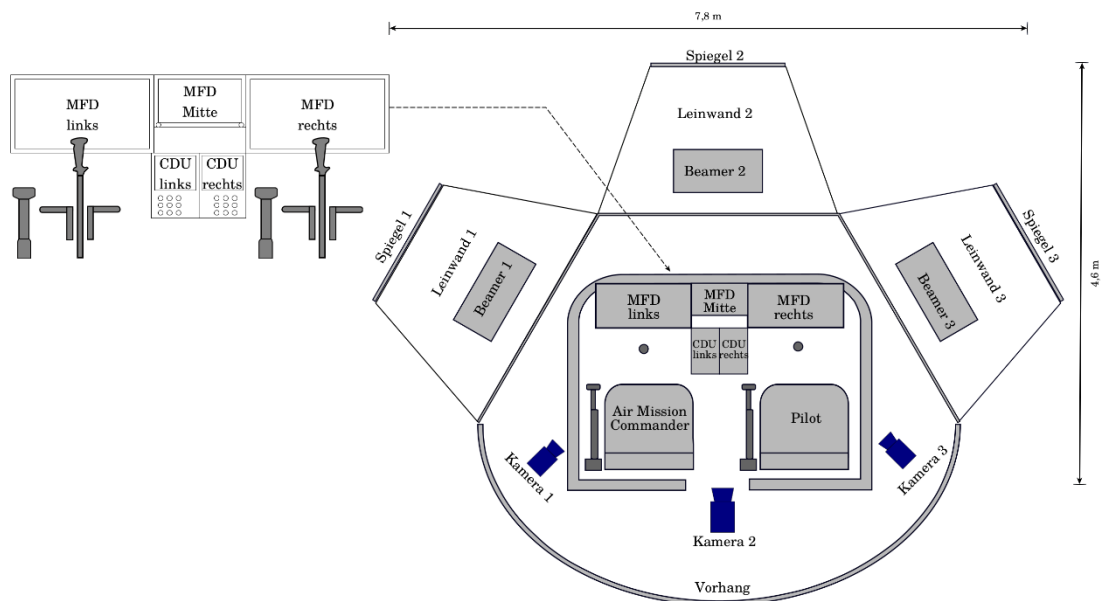


Abbildung 4-1: Schematische Darstellung der Anwendung: TacARA in der Domäne des MUM-T für Transporthubschraubermissionen

Es werden zwei menschliche Nutzer unterschieden, der Pilot Flying und der Air Mission Commander. Der Pilot Flying ist der alleinige Verantwortliche für die Navigation und Überwachung der Systeme des Hubschraubers, während der Air Mission Commander das Missions-Management übernimmt und die UAVs kommandiert. Die Automation, die das TBG-Konzept ermöglicht, ist in der Darstellung durch die drei kleinen Symbole “Kognitiver Tool Agent” veranschaulicht. Sowohl der Pilot Flying als auch der Air Mission Commander stehen zu dem Hubschrauber bzw. den UAVs in einem Delegationsverhältnis. Auch die an Bord der UAVs eingesetzten kognitiven Agenten stehen zu den Luftfahrzeugen analog zum Pilot Flying in einem Delegationsverhältnis. TacARA ist ebenfalls befugt Aufgaben an die UAVs direkt zu verteilen, weswegen von ihr auch ein Delegationsverhältnis zu den UAVs angelegt ist. Allerdings kann sie dies nur mit expliziter Zustimmung des Air Mission Commanders tun. Das Einholen der Zustimmung, wie auch die Empfehlungsweitergabe zu möglichen Handlungsoptionen an den Air Mission Commander wird über das Kooperationsverhältnis ausgedrückt.

4.2 Forschungssimulator

Im Zuge experimenteller Auswertungen wurde das Agentensystem in einem Forschungssimulator für Transporthubschraubermissionen des Instituts für Flugsysteme (IFS) integriert (siehe Abbildung 4-2 (a) und (b)).



(a) Schematische Übersicht über den Aufbau des Simulatorcockpits mit Außensichten und die Anordnung der Displays im Cockpit



(b) Fotografische Sicht des Hubschraubersimulators, in dem die Experimente durchgeführt werden

Abbildung 4-2: Aufbau des Simulatorcockpits

Bei dem Simulator handelt es um ein komplexes System bestehend aus einem zweisitzigen Transporthubschrauber-Cockpit, einer Außensichtanlage und mehreren Rechnern, die in einem Netzwerk miteinander verbunden sind. Auf den Rechnern laufen verschiedene Softwareeinheiten, die für den laufenden Betrieb des Simulators zuständig sind. Die Kommunikation zwischen den einzelnen Softwaremodulen verläuft im Hintergrund über einem lokalen Netzwerk. Datenströme, die zwischen den Anwendungen ausgetauscht werden, sind durch die gerichteten Kanten in Abbildung 4-3 gekennzeichnet. Das integrierte TacARA-System ist ebenfalls eingetragen. Als Kommunikationsmittel zwischen den einzelnen Teilsystemen dient eine Publish-Subscribe-Bibliothek namens *AnyCom*, ein am IFS entwickeltes Toolkit für nachrichtenbasierte Interprozesskommunikation zwischen mehreren Teilnehmern in einem Rechnernetzwerk. Nachrichten werden hier in Form von Datenpaketen zwischen den einzelnen Anwendungen im Simulator ausgetauscht. Möchte man Daten versenden, werden diese in entsprechende Nachrichten-Objekte serialisiert und an einen Server gesendet. Dieser Server verteilt die eingehenden Nachrichten dann an alle Teilnehmer, die sich für den entsprechenden Nachrichtentyp als Abonnent eingetragen haben. Die Nachrichten können zu verschiedenen, definierbaren Zeitintervallen regelmäßig versendet werden.

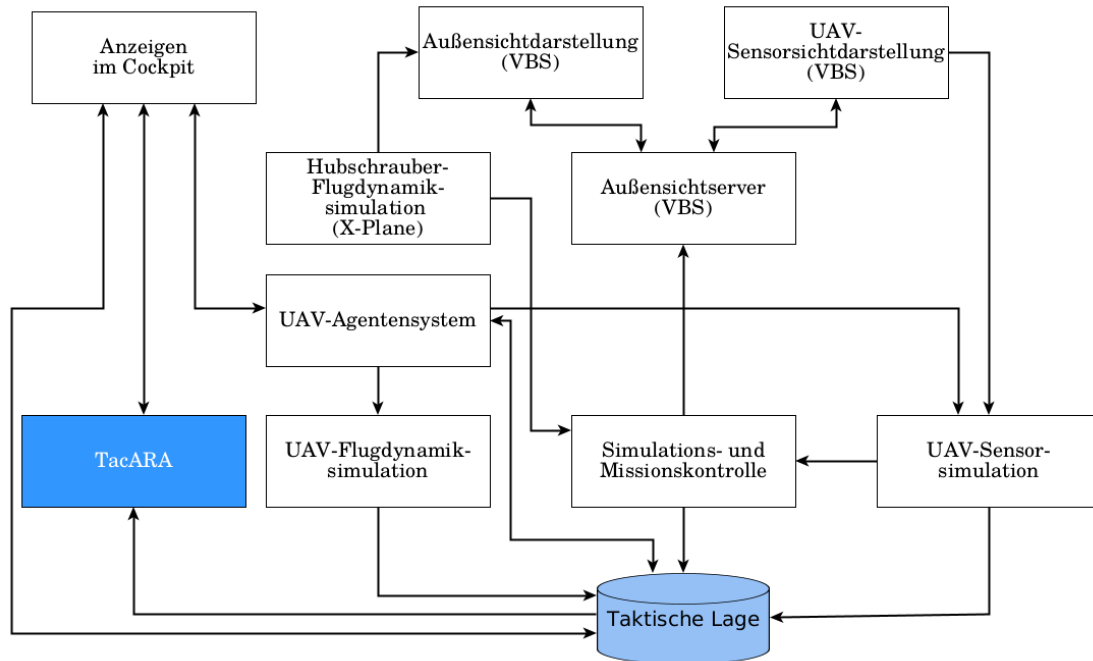


Abbildung 4-3: Relevante Teilsysteme des Simulators, das TacARA-System ist in blau hervorgehoben

Die für den Simulatorbetrieb notwendigen Module und Schnittstellen (weiße Kästen) wurden bis auf Ausnahme des UAV-Agentensystems mit der Programmiersprache *C++*⁷, u.a. unter Zuhilfenahme der Bibliotheken *Qt*⁸ und *boost*⁹ realisiert. Das UAV-Agentensystem wurde in der Programmiersprache *Java*¹⁰ und u.a. mit der Bibliothek *Drools*¹¹ umgesetzt.

Alle Aufgaben, die für die Steuerung des Hubschraubers und die Kontrolle der UAVs ausgeführt werden müssen, können von beiden Arbeitsplätzen aus über Bedien- und Anzeigeeinstrumente im Cockpit getätigt werden. Die Touchbildschirme (MFD links/rechts, siehe Abbildung 4-2 (a)) stellen eine integrierte taktische Kontrollschnittstelle dar, über die u.a. eine taktische Karte eingesehen werden kann und Interaktionen mit dem System möglich sind. Die taktische Karte zeigt alle bekannten/erfassten Einheiten (unabhängig von der Zugehörigkeit), Strukturen und Lufträume an. Die UAVs werden über die drei Module

⁷ <https://cplusplus.com/>

⁸ <https://www.qt.io>

⁹ <https://www.boost.org>

¹⁰ <https://www.java.com/de/>

¹¹ <https://www.drools.org/>

UAV-Flugdynamiksimulation für die Abbildung der Flugdynamik, der UAV-Sensorsimulation für die Sensoren und dem UAV-Agentensystem simuliert. Letzteres setzt u.a. das TBG-Konzept um, damit die UAVs aus dem Cockpit heraus auf einer abstrakten Ebene geführt werden können. Die UAV-Sensoren werden mittels der UAV-Sensor-Simulation technisch modelliert. Die UAVs sind mit elektrooptischen Sensoren und einer unterstützten Zielerkennungssoftware zur Datenverarbeitung ausgestattet. Die Aufklärungsergebnisse werden den Piloten als verarbeitete Daten in Form einer Einheit auf der Karte dargestellt. Konnte die Zielerkennung das Objekt eindeutig identifizieren, wird auch die Zugehörigkeit und der Typ des Objekts angegeben. Die taktische Lage enthält alle Positionsdaten der Entitäten (Einheiten, taktische Elemente, etc.), sowie weitere Informationen (z.B. Letzte Aufklärungszeit, Einheitentyp, etc.). Über das Modul der Simulations- und Missionskontrolle werden schließlich die Missionen gestartet/gestoppt und bietet die Möglichkeit das Missionsgeschehen außerhalb des Cockpits zu überwachen, Aufzeichnungen der Datenströme zu kontrollieren, sowie das Missionsgeschehen aktiv während der Laufzeit zu beeinflussen, in dem u.a. Einheiten versetzt, hinzugefügt oder entfernt werden können. Die Informationen über die taktische Lage werden in der Datenbank *Taktische Lage* gespeichert und im gesamten System verteilt, so dass jedes Modul benötigte Daten aus dieser anfragen kann.

Außerhalb des Cockpits befinden sich drei mittels Rückprojektion erzeugte Außensichten, die ein Blickfeld von ca. 180° in der Horizontalen und ca. 45° in der Vertikalen abbilden. Das Cockpit selbst ist stationär und bewegt sich nicht. Zur Außensichtsimulation (Außensichtdarstellung) und Darstellung des Videostreams der UAV-Sensoren (UAV-Sensorsichtdarstellung) kommt die Software *Virtual Battlespace 3 (VBS 3)*¹² der Firma *Bohemia Interactive* zum Einsatz. Synchronisiert werden alle Instanzen über einen eigenen Server (Außensichtserver), auf dem ebenfalls VBS läuft. Die Flugphysik des Helikopters (Hubschrauber-Flugdynamiksimulation) wird mithilfe der Software *X-Plane 10*¹³ von *Laminar Research* simuliert. Es handelt sich hierbei um eine generische Flugphysiksimulation, die lose an dem Flugmodell des mittelschweren Mehrzweckhubschraubers *Sikorsky S-76* angelehnt ist. Über Flugsteuerungselemente im Cockpit wird das Hubschraubermodell in *X-Plane 10* gesteuert. Die Daten aus *X-Plane 10*, die die aktuelle Lage des Hubschraubers beschreiben werden schließlich mit einem Hubschraubermodell in der Simulationswelt von *VBS 3* synchronisiert. Die UAV-Flugdynamiksimulation ist eine eigene Entwicklung für die Abbildung des Flugverhaltens der UAVs.

¹² <https://bisimulations.com/products/virtual-battlespace>

¹³ <https://www.x-plane.com>

4.3 TacARA: Tactical Analysis and Reconnaissance Assistant

Den internen Aufbau des Agenten ist in dem Moduldiagramm in Abbildung 4-4 abgebildet. Alle Module des Agenten wurden mit der Programmiersprache *Python*¹⁴ programmiert. Eingerichtet wurde Python über die Python-Distribution *Anaconda*¹⁵, die u.a. im Bereich des wissenschaftlichen Rechnens bzw. in der Simulationwissenschaft eingesetzt wird und eine Paketverwaltung für die komfortable Verwaltung von zusätzlichen Bibliotheken bereitstellt.

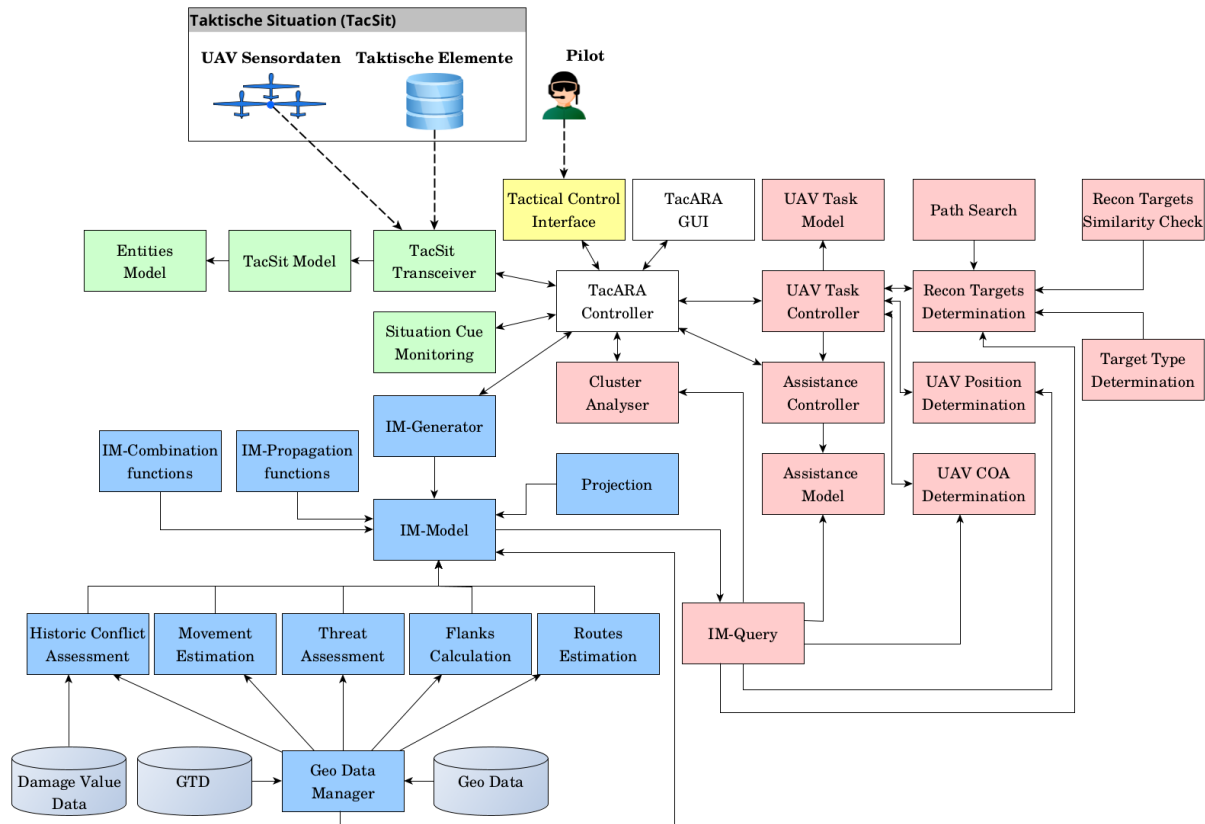


Abbildung 4-4: Moduldiagramm des Agenten

Die Farben kennzeichnen die einzelnen Ebenen des Agentenkonzepts (siehe Abbildung 3-17). Grün markiert sind die Module der Datenaufbereitung und Situationsüberwachung, blau die Module für die Umsetzung der Wissensmanagement-Ebene, rot die Module für die Ebene der Folgenabschätzung und

¹⁴ <https://www.python.org/>

¹⁵ <https://www.anaconda.com/>

Entscheidungsfindung und gelb die Module, die für die Umsetzung der Mensch-Maschine-Kommunikation angelegt wurden. Gestrichelte Kanten geben den Datenfluss von außerhalb an, durchgezogene Kanten markieren den Datenfluss innerhalb des Agenten. Die einzelnen Modulgruppen können auch mit den Phasen des OODA-Modells (vgl. Kap. 2.3.2) verglichen werden. Die Datenaufbereitungs- und Situationsüberwachungsmodulebene können zusammen mit den als Datenstrom ankommenden Sensordaten der UAVs und taktischen Lageinformationen als Teil der Phase der Beobachtung zugeschrieben werden. Die blau eingefärbten Module können der Orientierungsphase zugeordnet werden, in dem sich u.a. das kognitive Modell des Agenten befindet (IM-Model) und die rot gefärbten Module entsprechen der Entscheidungsphase, was in dem Fall des Agenten die Bereitstellung einer Unterstützungsstufe für den Piloten bedeutet. Gelb hinterlegt ist schließlich die Schnittstelle zum Menschen, über die der Agent seine getroffenen Vorschläge mitteilen kann. Die Ausführung der Aktionen bedeutet aus Sicht des Agenten die für den Piloten ermittelte Unterstützungsleistung. Die Umsetzung der Module werden pro Agentenschicht im Einzelnen vorgestellt.

4.3.1 Datenaufbereitung und Situationsüberwachung

Alle eingehenden Nachrichtenobjekte aus der taktischen Lage werden im `TacSit Transceiver` entgegengenommen. Konkret werden hier die für die Verarbeitung relevanten Daten wie Positionen der verschiedenen Einheiten, sowie Aufklärungsergebnisse der UAVs, empfangen und in interne Datenklassenobjekte, die im Entitätenmodell (`Entities Model`) hinterlegt sind, umgewandelt. Die erzeugten Objekte werden in einem internen Datencontainer (`TacSit Model`) gespeichert, mit dem der Agent im weiteren Prozessverlauf arbeitet. Neben allen Daten, die aus der taktischen Lage und UAV-spezifischen Nachrichtenobjekten stammen, enthält der Datencontainer auch Piloteninteraktionen, die über die Kontrollschnittstelle im Cockpit getätigt wurden. Sie werden von dem `Tactical Control Interface` empfangen und über den `TacARA Controller` an den `TacSitTransceiver` weitergeleitet. Dort werden sie schließlich in das `TacSit Model` integriert. Die Interaktionen umfassen manuell gesetzte Aufklärungsziele in Form von Routensegmenten, Klassifizierungen von Einheiten oder Anfragen, die an `TacARA` gestellt werden (siehe dazu Kap. 4.4.1). Aus einem Missionsnachrichtenobjekt werden zudem die Informationen herausgefiltert, die die Mission charakterisieren, wie z.B. das Auftragsziel, vorgegebene Missionszeit oder Luftraumordnungsstrukturen.

Der erstellte Datencontainer wird an das Situationsüberwachungsmodul (`Situation Cue Monitoring`) weitergereicht. In diesem Modul wird das `TacSit Model` anhand definierter Prüfungen auf signifikante Situationsänderungen (vgl. Kap. 3.3) untersucht. Zum Abgleich dienen Daten eines Datencontainers aus dem vorangegangenen Iterationsschritt, der in dem Modul gespeichert wird. Ist dieser nicht vorhanden, wird der Bewertungsprozess initial ausgeführt. Ansonsten folgen die Prüfmechanismen.

Dabei wird der Datencontainer zunächst auf eine Änderung des Situationstyps hin geprüft. Für diese Prüfung wurden zwei Situationstypen angelegt:

- **Transit:** beschreibt Situationen, in denen der Hubschrauber entlang einer geplanten Flugroute fliegt. Die initiale Planungsphase, in der der Hubschrauber noch am Boden am Startpunkt einer Mission steht, wird ebenfalls zu diesem Situationstyp gezählt.
- **Landezonenannäherung:** beschreibt Situationen, in denen sich der Hubschrauber einer Landezone innerhalb eines mit Gegnern besetzten Gebiets annähert. Sobald der Hubschrauber eine Route hin zu einem Landepunkt besitzt und sich in einem bestimmten Umkreis der Landezone befindet, wird dieser Situationstyp gesetzt.

Bei der Prüfung wird analysiert, ob die Bedingungen des Situationstyps Landezonenannäherung erfüllt sind. Ist dies der Fall, wird dieser als aktueller Situationstyp gesetzt, in jedem anderen Fall wird der Situationstyp Transit gesetzt. Für beide Situationstypen sind jeweils Konfigurationsdateien für Parametereinstellungen der Bedrohungsbewertung (vgl. Kap. 3.4.1) und Gewichtung der Berechnung der Aufklärungs-IM I_V (vgl. Kap. 3.4.2.3) und angelegt worden. Genauere Ausführungen hierzu werden in den Kap. 4.3.3 und 4.3.4.3 vorgestellt. Liegt eine Änderung des Situationstyps vor, wird ein Signal an den TacARA Controller geleitet, der wiederum über den IM-Generator den Auswertungsprozess des IM-Trees startet. Dabei werden die für den nun aktuellen Situationstyp gültigen Parameter aus der entsprechenden Konfigurationsdatei geladen und über das IM-Model gesetzt. Anschließend erfolgt die Auswertung.

Hat sich der grundlegende Situationstyp nicht geändert, folgen Prüfungen auf Änderungen der taktischen Lage mit entsprechenden Vergleichsalgorithmen. Bei der Umsetzung wurden folgende Prüfungen implementiert:

- Erscheinen/Verschwinden von Einheiten von der taktischen Lage
- Statusänderung von Einheiten (Gesinnungsänderung, z.B. von “Unknown” zu “Enemy”)
- Signifikante Positionsänderungen von Einheiten (Aktuelle Position unterscheidet sich von der vorherigen um einen bestimmten Schwellwert)
- Missionsbezogene Änderungen (Änderung des Missionsziels, Intelligence Reports)
- Änderung der primären Flugroute des Helikopters (z.B. Umplanung durch den Piloten)
- Manuelles Setzen von Aufklärungszielen durch den Piloten

Die Prüfungen sind dabei mit Labeln des Knotens im IM-Tree verknüpft, der von dieser Änderung betroffen ist. Wenn sich beispielsweise nur die primäre Flugroute zwischen mehreren Iterationsschritten ändert, so werden alle IMs aktualisiert, die sich auf diese Flugroute beziehen.

4.3.2 Datenanfragen

Angefragte Daten zur Situationsinterpretation und taktischen Entscheidungsfindung entstammen sowohl aus dem TacSit Model und dem Situationswissen, welches über den IM-Tree im IM-Model aufgebaut wurde. Aus dem TacSit Model können u.a. Einheitenpositionen, Geschwindigkeitsvektoren und geometrische Daten (z.B. Eckpunkte von Routen) abgefragt werden. Anfragen an das IM-Model werden über das IM-Query-Modul gesteuert. Es können darüber entweder direkt IMs zu gegebenen Labels (z.B. Bedrohung) angefragt werden oder mittels vordefinierter Filtermechanismen diese auf bestimmte Informationen hin aufbereitet werden (z.B. Filterung von Werten, die einen Schwellwert über- oder unterschreiten).

Unter Zuhilfenahme des Moduls Cluster-Analysis können über eine Datenanfrage an das IM-Query-Modul zudem Mengen von Zellen mit ähnlichen Eigenschaften gruppiert werden. Dabei können neben dem Label, welches die IM bestimmt, die Mindestgröße und Schwellwerte spezifiziert werden, die für die Zellgruppierung verwendet werden sollen.

4.3.3 Wissensmanagement - Bedrohungsmodul

In diesem Abschnitt wird das Bedrohungsmodul (Threat Assessment) als Bestandteil der Wissensmanagementebene beschrieben. Die Berechnungen der Bedrohungswerte erfolgt für jede bekannte gegnerische Einheit und bezieht sich auf Referenzpunkte. Diese Referenzpunkte sind die aktuelle Helikopterposition, sowie Punkte entlang der Primärflugroute des Helikopters. So kann nicht nur die Bedrohungslage hinsichtlich des Helikopters abgeschätzt werden, sondern auch die Bedrohung entlang der Flugstrecke selbst. Die Resultate werden in das IM-Model geleitet und dort in die Bedrohungs-IM I_T (vgl. Kap. 3.4.2.3) integriert. Als mögliche Werte für die Informationsvariable "target type" wurden bei der Umsetzung die Typen "Person gunner", "Person manpad", "Jammer", "Jeep gunner", "Jeep manpad", "Tank" und "SAM" (Surface to Air Missile; Flugabwehrrakete/-system, SAM) hinterlegt. Die für die Variable terrain benötigten Geländeinformationen werden nicht, wie andere Daten durch Aufklärungsergebnisse der UAVs gewonnen, sondern aus den IMs des IM-Trees angefragt.

Für die Implementierung wurde als Grundlage die BN-Toolbox¹⁶ für MATLAB¹⁷ von [101] herangezogen. Die Software unterliegt der GNU General Public License (GPL)¹⁸, die es grundsätzlich erlaubt die Software zu studieren, abzuändern und zu kopieren bzw. zu verbreiten. Die Toolbox wurde analysiert und Elemente, die für die benötigte Umsetzung relevant sind, in Python re-implementiert. Die Implementierungen finden sich in den Python-Modulen `bnet.py`, `dbn.py` und `engine.py`, sowie `toolbox_engine.py`. Sie enthalten die für die Berechnung notwendige Logik. Der Verarbeitungsprozess mit den elementaren Klassen ist in Abbildung 4-5 abgebildet.

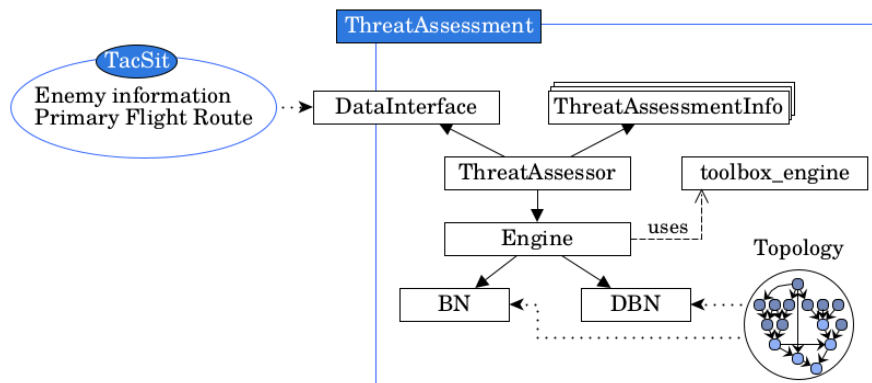


Abbildung 4-5: Verarbeitungsprozess der Bedrohungsbewertung. Die gepunkteten Pfeile deuten eingehende bzw. bereitgestellte Daten bzgl. der zu verwendeten Topologie an. Der gestrichelte Pfeil zeigt die Verwendung des Python-Moduls `toolbox_engine.py` an und die normale

Eingehende Daten werden aus dem TacSit Model-Datencontainer in der Schnittstelle `DataInterface` des Moduls entnommen und für die Verarbeitung vorbereitet. Dazu wird zum einen die primäre Flugroute segmentiert und Referenzpunkte entlang der Route berechnet. Zum anderen werden relevante Informationen über die gegnerischen Entitäten gefiltert. Die Logik zur Auswertung der Bedrohung ist in der Klasse `ThreatAssessor` des `ThreatAssessment`-Moduls verortet. Sie dient als Controller-Instanz und enthält Informationen zum Aufbau des DBNs, speist die externen Daten in das DBN ein und steuert die Auswertung der Bedrohungswahrscheinlichkeit. Bei der Erstellung eines Objekts der Klasse `ThreatAssessor` können die maximal zu berücksichtigenden Zeitschritte und die Art des Netzes angegeben

¹⁶ <https://github.com/bayesnet/bnt>

¹⁷ <https://www.mathworks.com/products/matlab.html>

¹⁸ <https://www.gnu.org/licenses/licenses.html#GPL>

werden. Letzteres Argument hat als zulässige Werte “static”, “dynamic”, “unrolled” und “dbn”. Die Topologie des DBNs wird durch zwei Matrizen repräsentiert. Die Beschreibung der Kanten innerhalb eines Zeitschritts wird durch die Matrix *intra* und die Kanten zwischen zwei Zeitschritten durch die Matrix *inter* abgebildet. Die Matrixrepräsentation folgt dabei folgender Konvention: Sei B die Matrix und $i, j \in 0, 1, 2, \dots, N$ die Zeile bzw. Spalte mit N als die Gesamtanzahl an Variablenknoten. Ein Eintrag $B_{ij} = 1$ gilt genau dann, wenn X_i Elternknoten von X_j ist, d.h. eine Kante von $X_i \rightarrow X_j$ existiert, ansonsten gilt $B_{ij} = 0$. Die Indexierung entspricht dabei der Nummerierung der Knoten des DBN (siehe Abbildung 3-5). Da das DBN 15 Knoten besitzt, gilt $N = 15$ und damit haben die Matrizen jeweils eine Dimension von 15×15 . Für *inter* ergibt sich die Einheitsmatrix und für *intra* die Matrix:

$$intra = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 1 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix}$$

Alle Berechnungen mit dem DBN zur Inferenz werden in der Klasse *Engine* (im *engine.py*-Modul) und ausgelagerten Funktionen im Modul *toolbox_engine* durchgeführt. Ein Objekt vom Typ *Engine* hält als Referenz eine Objektinstanz des Netzes vom Klassentyp *BN* bzw. *DBN*, die die Repräsentation des (dynamischen) bayes’schen Netzes sind. Die Topologie des Netzes wird über die beschriebenen Matrizen bereitgestellt (angedeutet in Abbildung 4-5 durch gepunktete Pfeile). Die Instanziierung der Klasse übernimmt der Controller *ThreatAssessor*. Resultate der Bedrohungsbewertung werden pro gegnerische Einheit in einem Objekt der Klasse *ThreatAssessmentInfo* gebündelt. In dieser Klasse werden für jede Kombination aus Routenreferenz- und Gegnerpositionen die berechneten Werte der Variablen gespeichert. Bei der Berechnung werden zuerst die Evidenz für die betrachtete Kombination aktualisiert, wobei u.a. die Entfernung und Bewegungsrichtung für die aktuell betrachtete Kombination berechnet wird. Wenn für die Kombination bereits eine Evidenz vorliegt, werden die Beobachtungen für den aktuellen Zeitschritt hinzugefügt. Ist die maximale Anzahl an Zeitschritten erreicht, wird der älteste Zeitschritt entfernt. Sollte für die Kombination noch keine Evidenz

vorliegen, wird eine Neue erstellt. Anschließend werden für die Informationsvariablen die vorhandenen Absolutwerte mittels definierter Grenzwerte (siehe Anhang A.1.2; vgl. Kap. 3.4.1.4) in Evidenzwerte überführt. Darauf folgend werden dann die Werte für die Hypothesenvariablen und die mittlere Bedrohung auf der Route durch die gegnerische Einheit berechnet. Nachdem die Berechnungen für alle gegnerischen Einheiten abgeschlossen sind, wird neben der Helikopterposition die Routenposition herausgefiltert, die die höchste Bedrohung aufweist. Die so ermittelten Werte werden pro Gegner in ein Nachrichtenobjekt serialisiert und über das Netzwerk verschickt, u.a. an das IM-Modell, welches die Information zur Situationsrepräsentation in die militärische Stärke gegnerische Kräfte (REDFOR; vgl. Kap. 3.4.2.3) integriert.

4.3.4 Wissensmanagement - Situationsrepräsentation

Grundlage des IM-Modells (IM-Model) sind die in Kap. 3.4.2.3 definierten IMs. Formal lässt sich eine IM als zwei dimensionale Matrix $I \in R^{m \times n}$ mit $m \in N$ Zeilen und $n \in N$ Spalten definieren. Als Datenstruktur zur Repräsentation dieser Matrix im Rechner wurde daher ein zweidimensionales Array gewählt. Damit ein Situationswissen mittels eines IM-Trees (vgl. Kap. 3.4.3) aufgebaut werden kann, müssen die kontinuierlichen Daten der taktischen Lage diskretisiert werden. Dafür ist ein Abbildungsmechanismus notwendig, was als Schnittstelle zwischen taktischen Lageinformationen und Repräsentation der Situation durch IMs angesehen werden kann. Dieser Mechanismus ist durch das **Zellgitter** realisiert, dessen Realisierung zuerst erläutert wird. Es fasst Klassen zusammen, die für die Repräsentation des Zellgitters im Einsatzgebiet und Umrechnungen angelegt wurden. Über diese Umrechnungsmethoden ist es erst möglich die Informationen in den **IM-Tree** einzugliedern, dessen klassenhierarchischer Aufbau anschließend vorgestellt wird.

4.3.4.1 Zellgitter

Bei der Realisierung wurde ein hexagonales Zellgitter gewählt, welches über das Operationsgebiet gespannt wird. Der Grund für die Wahl eines hexagonalen Gitters sind v.a. Vorteile bei der Abstandsberechnung. Jedes Zentrum bzw. jeder Mittelpunkt einer Zelle hat den gleichen Abstand zu allen benachbarten hexagonalen Zellen. Zudem verhält sich die Anordnung der Zellen eher den Kurvenflügen von Luftfahrzeugen (im Gegensatz zu beispielsweise Rastergittern), weswegen die Wahl auf diese Gitterart fiel. Das Gitter wurde aus hexagonalen Zellen mit flacher Oberseite zusammengesetzt und ein Offset-Koordinatensystem verwendet, um die Position einer Zelle auszudrücken. Die Koordinaten einer Zelle werden durch ein (x, y) Tupel beschrieben, wobei x die Zeile und y die Spalte im Zellgitter angibt (siehe Abbildung 4-6). Für jedes Einsatzgebiet wurde ein Startpunkt, sowie Breite und Höhe definiert, an dem das Zellgitter aufgespannt wird.

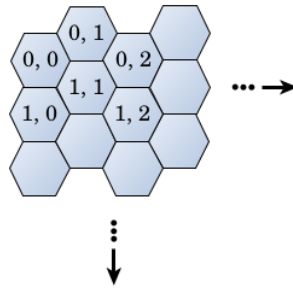


Abbildung 4-6: Darstellung des verwendeten Zellgitters mit Beispielkoordinaten zur Verdeutlichung des Koordinatensystems

Die Klasse `HexGrid` als Bestandteil des `IM-Model`-Moduls repräsentiert das über ein Gebiet gelegtes hexagonales Zellgitter. Sie stellt Methoden für die Umrechnung von georeferenzierten Koordinaten zur Zellposition, sowie für die Abfrage von Zellen, die von einem geometrischen Objekt (z.B. Polygon oder Route) abgedeckt werden, zur Verfügung. Zur Visualisierung des Zellgitters wurde eine weitere Klasse `HexGridRenderer` angelegt, in der für die Visualisierung der verschiedenen IMs Farbinsintervalle definiert sind.

4.3.4.2 IM-Tree

Für die Umsetzung des IM-Trees als Bestandteil von `IM-Model` wurde eine Klassenstruktur angelegt, die die einzelnen Knoten repräsentieren. Obwohl es formal keine Unterscheidung zwischen IMs und DMs gibt, da beide Elemente als Matrix dargestellt werden können, wird hier die Unterscheidung dennoch getroffen, da für die DMs keine Funktion benötigt wird, um die Werte der Matrix zu befüllen. Im Falle einer DM werden die Daten stets über einen Kombinationsalgorithmus berechnet. Bei den IMs dagegen ist diese Funktion notwendig. Dabei handelt es sich um Funktionen, die für die jeweilige IM die Daten aus gegebenen Informationen der taktischen Lage oder anderen zur Verfügung stehenden Datenquellen, berechnet. Abbildung 4-7 zeigt ein vereinfachtes UML-Diagramm der Klassenhierarchie für den IM-Tree.

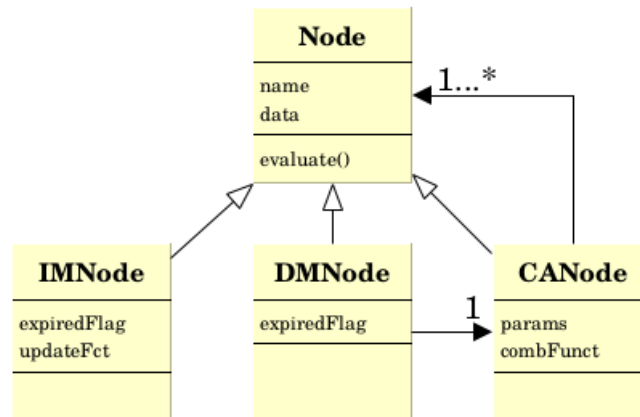


Abbildung 4-7: UML-Klassendiagramm für die Umsetzung des IM-Trees

Die Klasse **IMNode** repräsentiert einen IM-Knoten, **DMNode** einen DM-Knoten bzw. einen Knoten, welcher kein Blattknoten ist und **CANode** steht für einen Kombinerungsalgorithmusknoten. Gemeinsame Attribute und Funktionen sind in der Oberklasse **Node** ausgelagert. Jeder Knoten hält ein Namensfeld (**name**), in das semantische Informationen hinterlegt werden können, die den Knoten beschreiben, und ein Datenfeld **data**, welches zur Repräsentation einer IM durch ein zweidimensionales Array dient.

Die Klasse **IMNode** enthält eine Funktion **updateFct**, die die Logik für die Generierung der Daten des entsprechenden IM-Knotens beinhaltet. Der Generierungsprozess dieser Daten besteht im Wesentlichen aus zwei Schritten. Im ersten Schritt werden die Wissenswerte für einen bestimmten Sachverhalt mit einem Berechnungsmodell berechnet (z.B. die militärische Stärke feindlicher Einheiten). Informationen zur Berechnung der Werte werden aus dem übergebenen Datencontainer, der vom Datenaufbereitungsmodul bereitgestellt wird, entnommen. Im zweiten (optionalen) Schritt folgt mittels einer auf den Werten angewendete Propagierungsfunktion eine räumliche Verteilung innerhalb des IM-Gitters. Die Klasse **CANode** hält mindestens eine oder mehrere Instanzen vom Typ **Node**, denn eine Eingabe eines Kombinerungsalgorithmus können sowohl IMs als auch DMs sein. Über die Funktion **combFunct** wird die Kombinerungsvorschrift der Eingabeelemente bestimmt. Die Funktion verarbeitet die Eingaben und liefert eine resultierende 2-D-Matrix zurück. Folgende Kombinerungsalgorithmen wurden für die Erstellung des IM-Trees angelegt:

- **DM_lincomb**: Linearkombination der Eingabematrizen
- **DM_lincomb_lower_bound**: Linearkombination der Eingabematrizen mit Grenzwert. Ein Eintrag kann einen festgelegten unteren Grenzwert nicht unterschreiten

- `DM_product`: Bildet das Hadamard-Produkt bzw. elementweise Produkt aus den Eingabematrizen
- `DM_maximum`: Wählt das elementweise Maximum aus den Eingabematrizen
- `DM_minimum`: Wählt das elementweise Minimum aus den Eingabematrizen
- `DM_filter_in`: Setzt elementweise die Werte der Eingabematrix A auf 0, wenn die Eingabematrix B einen Wert gleich oder kleiner als 0 an der gleichen Position besitzt
- `DM_filter_out`: Setzt elementweise die Werte der Eingabematrix A auf 0, wenn die Eingabematrix B Werte an der gleichen Position größer als 0 besitzt
- `DM_r_fct`: Wendet eine R-Funktion auf die einzelnen Werte einer Eingabematrix an
- `DM_trapezoid_fct`: Wendet eine trapezförmige Funktion auf die einzelnen Werte einer Eingabematrix an
- `DM_reverse`: Setzt Werte auf 0, falls ein Eintrag größer als 0 ist und auf 1, falls ein Eintrag 0 ist
- `DM_assign_uav_operation_range`: Berechnet die Operationsreichweite für die einzelnen UAVs
- `DM_rec`: Berechnet den Aufklärungsfaktor für das gegebene Aufklärungsalter
- `DM_edge_recognition`: Ermittelt die Kanten eines Gebiets, indem Werte von Zellen, die den Wert 1 enthalten, auf 0 gesetzt werden, wenn dessen Nachbarszellen ebenfalls alle den Wert 1 haben
- `DM_flood_fill`: Algorithmus, der zusammenhängende Zellen, die den gleichen Einflusswert aufweisen, gruppiert

Ein `DMNode` hält mindestens genau ein `CANode` als Instanz. Der assoziierte `CANode` spezifiziert die Berechnungsvorschrift des jeweiligen `DMNode`.

Aus diesem Klassenmodell werden schließlich Objekte erzeugt und so zusammengesetzt, dass ein IM-Tree gebildet wird, der das mentale Modell des Agenten repräsentiert. Die Logik für die Erzeugung des IM-Trees ist in einer separaten Klasse, der `IM-Tree-Builder` hinterlegt. Die dort abgelegte Definition legt die hierarchische Anordnung fest und bestimmt damit, wie Informationen zusammenhängen. Der vollständige IM-Tree ist in Anhang A.3 abgebildet. Die für die Generierung von IMs genutzten Kombinerungs- und Propagierungsfunktionen sind in den jeweiligen Modulen `IM-Combination functions` und `IM-Propagation functions` ausgelagert. Um Rechenzeit zu reduzieren, wurden die IMs zu terrainbezogenen Daten und historischen Konflikten einmalig bei der Initialisierung des IM-Trees

berechnet, da hier die Annahme zugrunde gelegt wurde, dass sich diese Daten über die Gesamtdauer einer Mission nicht ändern. Bei einer Situationsauswertung werden die Daten aus dem TacSit Model genutzt und die IMs dazu generiert. Ein IM-Model ist schließlich mit dem TacSit Model assoziiert, auf welches es sich bezieht. Auf diese Weise bilden die Entitätsdaten zusammen mit den erzeugten IMs eine Einheit.

Trefferwahrscheinlichkeits- und Schadenswerte, die zur Berechnung der historischen Konflikte genutzt werden, werden aus einer hinterlegten Datenbank (Damage Value Data) geladen. Es handelt sich hierbei um Schätzwerte, die umso größer ausfallen, desto höher die effektive Wirkung gegenüber dem Hubschrauber ist. Die für die Implementierung genutzten Werte sind in Anhang A.4 hinterlegt. Die militärische Stärke verbündeter Einheiten wird ebenfalls aus vorhandenen Werten aus der Datenbanktabelle abgefragt.

4.3.4.3 Zuordnungen anwendungsspezifischer Elemente

Für die in Kap. 3.4.2.3 erläuterten IMs müssen Zuordnungen der für den gewählten Missionstyp spezifischen Objekte getroffen werden. Für die Absicherung des Hubschraubers ist eine zielgerichtete Aufklärung entlang der geplanten Flugroute notwendig. Die primäre Flugroute und potentielle andere Flugroute, die der Hubschrauber in einer Mission einschlagen könnte entsprechen den Marschrouten, die in der IM I_R abgelegt werden. Mögliche Flugrouten werden in dem Routes Estimation-Modul ausgewertet. Dabei werden Flugrouten zu potentiell neuen Missionszielen und über andere Meldepunkte, ermittelt. Potentielle Missionsziele, sowie die Meldepunkte sind für jede Mission spezifiziert worden. Bei der Berechnung möglicher Marschrouten (vgl. Kap. 3.4.2.3) ermittelt der Agent mit dem Routes Estimation-Modul Flugrouten zu potentiellen Missionszielen und alternative Flugrouten, die über alternative strategische Punkte liegen. Diese Flugrouten können auch direkt über Konfigurationsdateien in das Modul eingespeist werden. Die so berechneten Routen werden über einen Diskretisierungsvorgang in die IM I_R (Candidate Routes, siehe Anhang A.3) überführt. Dabei wird auch ein spezifizierter Pufferradius mit einbezogen. Die Werte der Zellen enthalten Wahrscheinlichkeitswerte, die angeben, wie wahrscheinlich eine dieser möglichen Routen vom Hubschrauber geflogen wird. Die zentrale Fähigkeit der UAVs in den betrachteten Missionsszenarien ist die Aufklärungsfähigkeit. Hierbei entscheidend ist v.a. die Verfügbarkeit der UAV-Sensoren. Mit der Verfügbarkeits-IM I_A kann die Verfügbarkeit eines UAV-Aufklärungssensors abgebildet werden. Die Zeit, die benötigt wird, um einen UAV-Sensor für Aufklärungszwecke an einem bestimmten Ort zur Verfügung zu haben wird als Eingabe für die Funktion f_{avail} (vgl. Kap. 3.4.2.3) genutzt. Dem entgegen steht die Zeit des Hubschraubers, welche angibt, wann dieser an einer bestimmten Position sein wird. Das wird durch die Aufklärungsnützlichkeit repräsentiert.

Bei der Umsetzung der IM I_{ccmm} hat man sich auf den Fahrzeugtyp “Jeep” beschränkt, da in den Experimenten auch nur dieser Fahrzeugtyp genutzt wurde.

Als Berechnungsgrundlage für die IM der Aufklärungswerte I_V (vgl. Kap. 3.4.2.3) wurden als Terraintypen Berge (Mountains), Berghänge (Mountainsides), Engpässe/Täler (Choke Points) und flaches Gelände (Ground) gewählt (siehe Anhang A.3). Die jeweiligen Informationen zu diesen Elementen wurden über Kombinationsalgorithmen in IMs umgewandelt. Für die taktischen Elemente wurde die Primärflugroute (Primary Route), die linke und rechte Flanke der Primärroute (Left/Right Flank Primary Route), Alternativrouten (Alternative Route), die Landezone (Landing Site) und mögliche Kandidatenrouten (Candidate Routes) festgelegt. Bei letzterem handelt es sich um berechnete Möglichkeiten, die aufgrund der aktuellen Lage bzw. Missionsänderung eintreten können. Die Berechnung dieser erfolgt über das `Routes Estimation`-Modul. Die Berechnung der Flanken erfolgt über das `Flank Calculation`-Modul, das als Eingabe die Primärflugroute entgegennimmt und zu dieser in einem bestimmten Abstand jeweils links und rechts davon parallele Routen zieht, die die Flanken darstellen. Dabei werden Routensegmente, die über Berghänge bzw. Gebirge verlaufen, entfernt. Alle anderen taktischen Elemente sind in der `Taktischen Lage` durch geometrische Formen beschrieben und werden über einen entsprechenden Diskretisierungsvorgang in IMs überführt.

4.3.5 Folgenabschätzung - Assistenzsituationen

Die Folgenabschätzung ist die Situationsinterpretation bzw. die Prüfung des Eintretens einer Assistenzsituation. Der Agent nutzt die Module der taktischen Entscheidungsfindung, um die Handlungsoptionen zu einer eingetretenen Assistenzfunktion zu erzeugen. Wesentliche Module zur Kontrolle der Assistenzleistung und Prüfung der Assistenzsituation sind die `Assistance Control`, die die Kontrolle über die Erkennung und angebotene Hilfestellung an den Piloten übernimmt, das `Assistance Model`, welches die Assistenzsituationen enthält, sowie die `IM-Query` und `Cluster Analyser`, die für die Datenabfrage einer Assistenzsituation genutzt werden.

Die Assistenzsituationen wurden als Klassenobjekte realisiert, die zwei zentrale Methoden besitzen. Die erste Methode dient zur Prüfung über das Eintreten einer Situation entsprechend der jeweiligen Kritikalitätsstufen. Die zweite Methode bildet die Logik der Lösungsgenerierung zu einer aufgetretenen Situation und Kritikalitätsstufe ab. Eine Lösungsgenerierung bündelt Anfragen an Module zur taktischen Entscheidungsfindung. Der Kommunikationsweg geht dabei über den `UAV Task Controller` und an das jeweilige Modul.

Die Assistenzsituationen sind in einer geordneten Liste hinterlegt und werden iterativ über den `Assistance Controller` durchgearbeitet und kontinuierlich auf ein Eintreten geprüft. Sobald eine

Assistenzsituation eingetreten ist, wechselt der **Assistance Controller** das Verhalten des Agenten in den automatisierten Unterstützungsmodus und generiert für diese Situation einen Dialog, der an die jeweilige Kritikalitätsstufe angepasst ist. Zudem wird gegebenenfalls der Lösungsmechanismus der Assistenzsituation angestoßen, um für die Situation eine taktische Handlungsoption zu ermitteln. Bei der Umsetzung wurden vier Assistenzsituationen technisch realisiert (siehe Tabelle 4-1).

Assistenzsituation	Verwendete IM	Beschreibung
Hot Spot	Threat-IM	Annäherung an Bedrohungspunkte entlang der Flugroute
Movement	Movement-IM	Bewegungstendenzen feindlicher Einheiten zur Route
Demand Spots	UAV-Demand-IM	Abschätzung, in welchen Gebieten UAV-Anforderung besteht
Landing Site	LandingSite-IM	Annäherung an Landezone

Tabelle 4-1: Assistenzsituationen

Für jede der aufgeführten Assistenzsituationen wurden Kritikalitätsstufen mit entsprechenden Bedingungen erstellt. Eine Assistenzsituation enthält die Logik für die notwendigen Abfragen an das IM-Model, welche über die **IM-Query** abgefragt werden. Dieses Modul kann einfache Datenabfragen an das **IM-Model** stellen und nutzt u.a. Methoden des Moduls **Cluster Analyser**, um auf angefragten Daten zu clustern und so für eine Assistenzsituation relevante Informationen zu einer Situation zu extrahieren. Bei der Interpretation einer **Hot Spot**-Assistenzsituation etwa wird die **Bedrohungs-IM** mit dem Puffer der Primärroute gefiltert und die Zellen zu Clustern erstellt. Dabei werden die Zellen, die einen bestimmten Bedrohungswert überschreiten und entsprechende Nachbarzellen in Gruppen zusammengefasst. Zusätzlich werden nur Zellgruppen zu Clustern gebildet, die eine bestimmte Größe (d.h. Zellanzahl) haben, um sehr kleine Cluster auszuschließen. Die auf diese Weise erzeugten **Cluster-IMs** dienen weiterhin als Grundlage für Abfragen, um die Bedingungen der Assistenzsituationen zu prüfen. Im Rahmen der Implementierung wurden die Unterstützungsstufen auf folgende Automationsstufen heruntergebrochen:

- **Stufe 0:** Keine Unterstützung (Passiver Modus)
- **Stufe 1:** Visueller Hinweis zu aufkommender Assistenzsituation
- **Stufe 2:** Vorschlagsgenerierung von Aufklärungsrouten
- **Stufe 3:** Vorschlagsgenerierung von UAV-Aufgaben (meint Aufklärung als auch Verlegung)

Die Anordnung der Assistenzsituation in der vorher erwähnten Liste definiert deren Prioritäten der Bearbeitung. Das heißt, dass das erste Element in dieser Liste die höchste Priorität besitzt und das letzte Element die Niedrigste.

4.3.6 Taktische Entscheidung - Aufklärungsschwerpunkte

Wie bereits erwähnt wurde bei der Aufklärung der Fokus auf Routen getroffen. Das bedeutet, dass die Algorithmen darauf ausgelegt sind, Aufklärungsrouten zu bestimmen. Es gibt drei Arten von Suchstrategien für die Aufklärungsroutenbestimmung. Die erste richtet sich entlang einer vorhandenen primären Flugroute des Hubschraubers für Aufklärungsrouten im Gelände, die zweite beschäftigt sich mit möglichen Annäherungswegen durch gegnerische Kräfte und die dritte umfasst die Absicherung der Landezone. Alle Suchstrategien eint das entsprechend im Kap. 3.6.2 beschriebene Vorgehen zur Bestimmung von Zielobjekten:

- Der Festlegung der Kosten-IM (Cost Values Data Query)
- Der Identifikation von Startzellen für Aufklärungspfade (Filter Candidate Cells)
- Der Suche nach Aufklärungspfaden basierend auf einer Kostenkarte (Search Strategy)
- Dem Abgleich zw. Aufklärungspfaden des Agenten und denen des Piloten (Filter Targets)
- Der Erstellung von Aufklärungsrouten anhand der Aufklärungspfade (Target Objects Creation)

4.3.6.1 Aufklärungsrouten im Gelände

Zunächst wird der Algorithmus zur Bestimmung von Aufklärungsrouten im Gelände erläutert. Die Analyse erfolgt dabei innerhalb eines festgelegten Radius r_p um die Primärroute des Hubschraubers. In geografischen Informationssystemen und der räumlichen Analyse bezeichnet man einen solchen Bereich bzw. Zone als Pufferzone bzw. Puffer¹⁹. Dieser Begriff wird fortan genutzt.

Im ersten Schritt werden die potentiellen Startzellen von der Kosten-IM bzw. Kostenmatrix herausgefiltert. Dabei werden nur die Zellen betrachtet, die sich innerhalb des spezifizierten Puffers befinden. Sie stellen die Startzellen möglicher Aufklärungspfade dar. Wenn der Wert einer Zelle einen Schwellwert $\tau_{rec} \in R$ überschreitet, wird sie zu einer Liste an möglichen Aufklärungspfadstartzellen

¹⁹ https://en.wikipedia.org/wiki/Buffer_analysis

hinzugefügt. Theoretisch kann jede beliebige IM als Kostenmatrix herangezogen werden. Für die Implementierung des Algorithmus wurde die IM I_V genutzt, die die Aufklärungswerte pro Zelle enthält.

Sobald die Kandidatenzellen identifiziert wurden, werden sie nach ihrer Nähe zum Hubschrauber sortiert. Das geschieht anhand der Zeitdistanzwerte, die der Hubschrauber benötigt, um die jeweiligen Zellen zu erreichen. Anschließend iteriert der Algorithmus durch die Kandidatenzellen und versucht mögliche Aufklärungspfade nach einer bestimmten Strategie zu finden. Dabei wird ein heuristischer und richtungsorientierter Suchalgorithmus angewendet, welcher versucht, Zellen mit den gleichen Zelltypen in einem Pfad aufzunehmen. Das Ziel dieser Suche ist es, Pfade zu finden, die derart gestaltet sind, dass sie zu den Ergebnissen ähnlich sind, die von einem menschlichen Operator manuell erzeugt würden. Die Intention dahinter ist, dass sie vom Menschen schnell verständlich sein sollen. Deshalb sollten die Pfade nicht zu kompliziert, so geradlinig wie möglich sein und sich an geographischen bzw. taktischen Merkmalen auf der Karte orientieren. Dazu sollten die Zellen des Pfades denselben Zelltyp haben wie die Startzelle, damit der resultierende Pfad leicht als Aufklärungsziel eines bestimmten Elementtyps erkannt werden kann. Der Zellentyp bezeichnet das zugrundeliegende topografische oder taktische Element im Bereich einer Zellenposition. Wenn, z.B., die Ausgangsposition der Zelle der topografische Typ "Berghang" zugeordnet ist, versucht der Algorithmus, Zellen in den Pfad aufzunehmen, die ebenfalls diesen Typ aufweisen. Es kann vorkommen, dass einer Zelle mehrere Typen zugeordnet sind, z. B. einen "Berghang" und eine "Primäre Flugroute" oder "Choke Punkt" und "Berghang". Um einen eindeutigen Zellentyp zu bestimmen, wird ein Zellentyp-Bestimmungsalgorithmus verwendet, der anhand von Prioritätswerten den dominantesten Zelltyp einer Zelle ermittelt. Generell haben taktische Elemente immer eine höhere Priorität als topographische Elemente. Die Schritte zur Bestimmung der nächsten Zellposition für einen Pfad wird durch ein priorisierten Auswahlalgorithmus durchgeführt (siehe Algorithmus in Anhang A.5.2).

Der Suchalgorithmus beginnt mit der Startzelle und fügt sie dem resultierenden Pfad hinzu, der durch eine Liste von Zellen repräsentiert wird. Für jede zuletzt hinzugefügte Zelle werden die Nachbarzellen, die den gleichen Zelltyp wie die Ausgangszelle haben, bestimmt. Von diesen präferierten Zellen wählt der Algorithmus jene aus, die in der gleichen Richtung liegen, wie der bisherige Pfadverlauf vorgibt. Jede Zelle hat n Nachbarn, d.h. es gibt n mögliche Richtungen, in denen der Pfad fortgesetzt werden kann. Wenn es keine Pfadrichtung gibt, wählt der Algorithmus jene aus, die der Richtung der Flugroute am nächsten folgt. Wenn es eine vorherige Pfadrichtung gibt, aber alle präferierten Nachbarzellen in eine andere Richtung gehen, wird die Zelle mit dem höchsten Wert ausgewählt. Sobald die nächste Zelle bestimmt worden ist, wird eine Terminierungsprüfung durchgeführt. Die Suche ist beendet, wenn eine der folgenden Bedingungen erfüllt ist:

- Es konnte kein nächster Zellkandidat für die Zelle bestimmt werden
- Der Kostenwert der ausgewählten Zelle ist kleiner gleich einem Mindestschwellwert
- Die Pfadlänge (einschließlich der selektierten Zelle) hat einen Maximalwert erreicht
- Die geschätzten Kosten der Aufklärungsarbeit sind größer gleich gegebener Maximalkosten

In jedem Iterationsschritt werden alle Aufklärungspfad-Kandidatenzellen, die in einem gefundenen Pfad enthalten sind, aus der Kandidatenliste entfernt und der Algorithmus setzt die Suche nach potenziellen Aufklärungspfaden mit der verbleibenden Kandidatenliste fort, bis kein Aufklärungspfad-Startkandidat mehr übrig ist.

4.3.6.2 Aufklärungsrouten für Annäherungswege gegnerischer Kräfte

Bei der Annäherung gegnerische Kräfte wird über die IM für die Geländefähigkeit (I_{ccmm}) als Kostenmatrix ein A*-Algorithmus [131] angewendet, um den kürzesten Pfad zu Zielpunkten zu bestimmen. Je nach Situation werden damit mögliche Aufklärungsziele bestimmt. Bei einer gegnerischen Einheit, deren Bewegungstendenz die Hubschrauberoute schneidet, wird der kürzeste Weg hin zur Route mit dem A* auf I_{ccmm} ermittelt und als potentielles Aufklärungsziel beim Agenten mit aufgenommen.

4.3.6.3 Aufklärungsrouten für die Absicherung einer Landezone

Nähert sich der Hubschrauber der Landezone an, werden ebenfalls mögliche Annäherungswege von in der Nähe befindlichen militärischen Gegnern ermittelt. Dazu werden zunächst acht Flankenpunkte um die Landezone gesetzt. Aus diesen acht Punkten werden nur die betrachtet, die in einem erreichbaren Gebiet und nicht in dem Einflussbereich der eigenen Einheiten liegen. Anschließend wird zu jedem Paar aus Flankenpunkt und gegnerischer Einheit der kürzeste Weg mittels des A*-Algorithmus ebenfalls mit der Kostenmatrix I_{ccmm} berechnet. Jeder so erreichbare Flankenpunkt gilt als bedroht. Aus benachbarten bedrohten Flankenpunkten werden schließlich Aufklärungsziele gesetzt, in dem sie miteinander verbunden werden. Besitzt ein bedrohter Flankenpunkt keine weiteren bedrohten Flankenpunkte wird ein diagonales Routenstück, das rechtwinklig zu der Verbindungslinie zwischen dem Mittelpunkt der Landezone und dem bedrohten Flankenpunkt ist, gesetzt. Auch hier werden zudem die möglichen Annäherungswege als potentielles Aufklärungsziel betrachtet. Weiterhin werden alle gegnerischen Einheiten, die die Landezone auf diese Weise bedrohen könnten zusammengefasst und ein weiteres Aufklärungsziel ermittelt, indem eine Verbindungslinie zwischen all diesen Einheiten gezogen wird. Ein Beispiel der Landezonenabsicherung ist in Abbildung 4-8 zur Verdeutlichung des Algorithmus schematisch dargestellt.

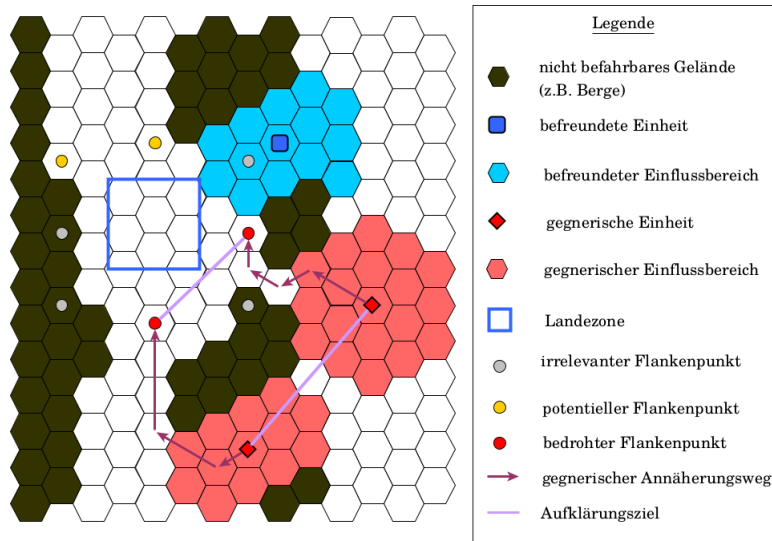


Abbildung 4-8: Beispieldarstellung der Identifikation von Aufklärungszielen zur Absicherung der Landezone. Die Aufklärungsziele, die sich aus den Annäherungswegen der gegnerischen Einheiten ergeben sind nicht eingezeichnet, damit der Annäherungsweg zu erkennen ist

4.3.6.4 Erzeugung von Aufklärungszielen und Abgleich mit Nutzereingaben

Um die gefundenen Aufklärungspfade mit denen, die der Pilot manuell in die Karte eingezeichnet hat, zu koordinieren, führt das Agentensystem mittels dem Modul *Recon Targets Similarity Check* eine Ähnlichkeitsprüfung zwischen den gefundenen Pfaden mit den Aufklärungszielen des Piloten durch. Die Aufklärungsziele des Piloten werden zunächst diskretisiert, um einen entsprechenden Zellpfad zu ermitteln. Für jeden Pfad werden schließlich die Zellen geschätzt, die durch einen UAV-Sensor abgedeckt würden, wenn dieser den Pfad aufklären würde. Anschließend wird die Anzahl der sich überlappenden Zellen ermittelt. Daraus wird der gemeinsame Anteil berechnet und geprüft, ob ein bestimmter Schwellwert überschritten ist. Ist er überschritten, wird der Pfad, der durch das Agentensystem identifiziert wurde, ignoriert. Die vom Piloten eingetragenen Aufklärungsrouten erhalten somit höhere Priorität als die von TacARA.

Aus den übrig gebliebenen Pfaden werden Aufklärungsobjekte bzw. Aufklärungsziele generiert, sofern die Pfadlänge eine bestimmte Mindestlänge besitzt. Dazu wird aus dem Pfad eine Aufklärungsrouten erstellt, indem er geglättet und vereinfacht wird. Zudem wird der Aufklärungswert für diese Route berechnet. Dafür werden die Aufklärungswerte rund um den Aufklärungspfad in einem bestimmten Pufferradius, der der durchschnittlichen Sensorreichweite eines UAVs entspricht, aufsummiert und im Aufklärungsobjekt gespeichert.

Die erstellten Aufklärungsziele bilden zusammen mit den vom Piloten vorgegebenen Aufklärungszielen die Eingabe für den Algorithmus zur Bestimmung von UAV-Aufklärungsmissionen.

4.3.7 Taktische Entscheidung - UAV-Einsätze

Für die Umsetzung der in Kap. 4.1.2 ausgewählten UAV-Einsatzzwecke in geeignete Algorithmen wurden diese zunächst auf das taktische Vorgehen analysiert und diese in Teilaufgaben heruntergebrochen. Bei einer Aufklärungsmission sind im Wesentlichen zwei Teilaufgaben verbunden. Zunächst erfolgt die Identifikation von Aufklärungsschwerpunkten, d.h. die Bestimmung bzw. Festlegung potentieller Aufklärungsobjekte. Anschließend muss der Befehlshaber bestimmen, welches UAV die Aufklärung des Objekts durchführen soll. Ähnlich verhält es sich bei der Verlegung eines UAVs. Hierzu müssen zunächst strategische Punkte festgelegt werden, an denen UAVs positioniert werden könnten. Schließlich muss auch hier entschieden werden, ob und welches UAV man umpositionieren möchte. Insgesamt wurden daraus drei Algorithmen identifiziert, die die Tätigkeiten des Kommandanten abbilden sollen:

- die Identifikation von Aufklärungsschwerpunkten
- die Vergabe von Aufklärungsmissionen an die UAVs
- die Bestimmung strategisch relevanter Punkte für potentielle UAV-Verlegungen

Die Steuerung der Entscheidungsfindung zur Handlungsoptionsgenerierung übernimmt das Modul `UAV Task Controller`. Dieses Modul entspricht der Entscheidungssteuerung im Konzept (vgl. Kap. 3.6) Für die Umsetzung der Algorithmen wurden entsprechende Module angelegt. Das `Recon Targets Determination`-Modul bestimmt unter Zuhilfenahme von Pfadsuchalgorithmen (`Path Search`) mögliche Aufklärungsschwerpunkte, was der Umsetzung der Beschreibung des Algorithmus zur Identifikation von Zielobjekten (vgl. Kap. 3.6.2) entspricht. Die Vergabe von Aufklärungsaufgaben erfolgt über das Modul `UAV COA Determination` und die Bestimmung strategisch relevanter UAV-Positionen übernimmt das Modul `UAV Position Determination`. Diese beiden Module sind Umsetzungen der Algorithmen zur Aufgabenverteilung (vgl. Kap. 3.6.3) und taktischen Einheitenpositionierung (vgl. Kap. 3.6.4). Die Umsetzung der einzelnen Algorithmen wird in den folgenden Unterkapiteln beschrieben.

4.3.7.1 Bestimmung von UAV-Positionierungen

In der Berechnung der Positionsbewertung entspricht die aktuelle Position des Hubschraubers jener des Schutzobjekts (vgl. Kap. 3.6.4). Da die UAVs die Ressourcen darstellen, entspricht die Anforderung der Ressourcenverfügbarkeit I_D und die Zentrumspunkte der Gleichverteilung des Operationsgebiets I_{Op} . Ebenso wird der Status der UAVs berücksichtigt. Wenn aufgrund eines Datenlinkausfalls ein UAV nicht

verfügbar ist, wird es im Algorithmus ignoriert. Der Algorithmus bestimmt die neuen Positionen für die UAVs, indem er die Vektoren von jeder gegenwärtigen UAV-Position hin zu den strategischen Punkten berechnet.

Aus dem TacSit Model werden die Helikopterposition und die der UAVs angefragt. Die UAV-Anforderungs-Cluster ergeben sich aus einer Clusteranalyse über das Modul IM-Query der IM I_D (siehe Formel 3.12).

4.3.7.2 Bestimmung von UAV-Aufklärungsplänen

Im Rahmen der Umsetzung zur Bestimmung von Aufklärungsmissionen für UAVs wurden zwei Methoden verfolgt. Zunächst wird der formale Ansatz vorgestellt, der in der größer angelegten Experimentalkampagne eingesetzt wurde. Danach wird der Ansatz präsentiert, welcher ein Markov Decision Process (MDP) als Grundlage für die Entscheidungsfindung anwendet. Dieser Ansatz wurde in einem gesonderten Experiment evaluiert. Beide Algorithmen dienen zur Bestimmung von möglichen Aufklärungsmissionen für die zur Verfügung stehenden UAVs.

Bei dem formalen Ansatz werden Tupel bestehend aus Aufklärungsziel und UAV gebildet, d.h. die Menge der Zielobjekte T (vgl. Kap. 3.6.3) entspricht der der gesetzten Aufklärungsziele und die UAVs bilden die Menge der dem Hubschrauber verfügbaren Ressourcen A . Der beim Vergleich herangezogene Vergleichspunkt für die Filterung der Ziele ist jeweils der Startpunkt einer Aufklärungsroute, da diese so ausgerichtet sind, dass deren Ausrichtung der Bewegungsrichtung des Hubschraubers entlang der Flugroute entspricht (vgl. Kap. 4.3.6).

Da für die Implementierung und das Missionsgeschehen von genau einem Hubschrauber ausgegangen wird, werden lediglich Tupel aus Aufklärungsziel und UAV gebildet. Sobald die Nutzwerte für jedes Aufklärungsziel und UAV berechnet wurde, werden Aufklärungspläne generiert.

Zunächst werden die UAV-Aufklärungs-Tupel entsprechend der berechneten Nutzwerte in absteigender Reihenfolge sortiert. Dabei werden die Tupel herausgefiltert, deren Nutzwert kleiner als 0 ist. Anschließend werden Gruppen bestehend aus höchstens n Elementen gebildet, wobei n für die Anzahl der UAVs steht. Der Algorithmus iteriert über die geordnete Liste der Tupel und nimmt das erste Erscheinen eines UAVs genau einmal in eine Gruppe auf. In jeder Gruppe befindet sich damit jedes UAV höchstens einmal mit einem zugeordneten Aufklärungsziel. Eine Gruppe stellt einen möglichen Aufklärungsplan dar. Da es aufgrund der möglichen Tupel-Kombinationen zu sehr vielen solcher Aufklärungspläne führen kann, wird die Anzahl der zu bildenden Gruppen durch einen übergebenen Parameter (*numRecPlans*) begrenzt. Es werden die *numRecPlans* besten Aufklärungspläne gefiltert und zurückgegeben. Die Schritte für die Bestimmung dieser Pläne sind im Algorithmus im Anhang A.5.4 zu finden.

4.3.7.3 Bestimmung der taktischen Vorgehensweise (Modellierung mit MDP)

Die Möglichkeiten von Verwechslung zwischen Einheitentypen ist manuell festgelegt und in einer zweidimensionalen quadratischen Matrix `mistakes_target_type` gespeichert. Die Einträge der Matrix orientieren sich an den definierten Werten der Variable `target_type` (siehe Kap. 3.4.1.4). Die Dimensionen dieser Matrix entsprechen der Anzahl an möglichen Werten der Variable `target_type`. Die Indexierung des Werts in `target_type` entspricht der Zeile und Spalte in der Matrix `mistakes_target_type`. Das Element innerhalb der Matrix in Zeile i und Spalte j nimmt den Wert 1 an, wenn der gegnerische Einheitentyp i mit dem Einheitentyp j verwechselt werden könnte, ansonsten ist der Wert an dieser Position 0. Die Matrix ist symmetrisch, denn, wenn Gegnerotyp i mit j verwechselt werden kann, gilt dies auch in umgekehrter Richtung, d.h. Gegnerotyp j kann mit i verwechselt werden. In Anhang A.2 ist die verwendete Matrix angegeben.

Für das Lösen des MDPs wurde die MDP-Toolbox für Python²⁰ verwendet. Sie stellt Klassen und Funktionen für die Lösung von zeit-diskreten Markov-Entscheidungsprozessen bereit. Die Klassen und Funktionen wurden auf der Grundlage der MATLAB MDP-Toolbox der Abteilung für Biometrie und künstliche Intelligenz des INRA Toulouse (Frankreich) entwickelt [132]. Die Software unterliegt der sog. BSD 3-Clause License²¹. Sie kann daher frei studiert, verwendet, verändert, kopiert und verbreitet werden. Einzige Bedingung hierbei ist, dass der Copyright-Vermerk des ursprünglichen Programms nicht entfernt werden darf. Darauf wurde bei der Implementierung selbstverständlich geachtet.

Um die MDP-Toolbox nutzen zu können und das durch das MDP beschriebene Problem damit zu lösen ist eine Zustandsbeschreibung mit s gemäß $0 \leq s < S \forall s \in N_0$ notwendig. Dazu ist eine eindeutige Umrechnung eines Zustandsvektors nach s und zurück bzw. eine (De-)Codierung erforderlich. Dafür wurden entsprechende Funktionen angelegt, die ein Zustandsvektor auf einen Zahlenwert umwandelt und umgekehrt. Die Umrechnung orientiert sich an der Umrechnung von Zahlen zwischen unterschiedlichen Basissystemen und folgt einer ähnlichen Weise, wie die der Umrechnung zwischen Binär- und Dezimalzahlen. Der Unterschied besteht darin, dass nicht nur eine Basis verwendet wird, sondern beliebig unterschiedliche Basen. Als Basen wird die Anzahl der möglichen, diskreten Werte verwendet, die jede Variable annehmen kann. Die Basen können also je nach Variablen variieren. Während man bei binären Zahlen bei den einzelnen Ziffern bzw. Positionen von Bitwertigkeit spricht, passt der Begriff der Wertigkeit in diesem Fall nicht wirklich, da sich die Basen bei den Positionen unterscheiden können. Deswegen wird

²⁰ <https://github.com/sawcordwell/pymdptoolbox>

²¹ <https://opensource.org/licenses/BSD-3-Clause>

im Folgenden von Dimensionen der einzelnen Ziffern bzw. Positionen gesprochen. Die Dimension an einer Ziffer ergibt sich aus der Dimension der vorangehenden Ziffer multipliziert mit der Anzahl der möglichen Werte der vorangehenden Ziffer. Die erste Ziffer besitzt die Dimension Eins. Bei der Umrechnung eines Tupels nach s werden alle Ziffern mit den jeweiligen Dimensionen multipliziert und anschließend alle Produkte aufaddiert. Der Vorgang soll an einem einfachen Zahlenbeispiel verdeutlicht werden. Für dieses Beispiel wird die Diskretisierung mit $R \vee 6; N_A = 5; \vee Thr \vee 4$ angenommen, sowie vier militärische Gegner. Für das Beispieltupel (5,0,1,4,3,2) lassen sich die Dimensionen der einzelnen Variablen wie folgt berechnen:

$$\begin{aligned}
 \dim(\mathcal{R}c_0) &= 1 & \dim(\mathcal{R}c_1) &= 1 * 6 = 6 \\
 \dim(\mathcal{R}c_2) &= 6 * 6 = 36 & \dim(\mathcal{R}c_3) &= 36 * 6 = 216 \\
 \dim(num) &= 216 * 6 = 1.296 & \dim(thr) &= 1.296 * 5 = 6.480
 \end{aligned}$$

Tabellarisch lässt sich der Zustand für dieses Tupel wie in Tabelle 4-2 darstellen.

Variable	$\mathcal{R}c_0$	$\mathcal{R}c_1$	$\mathcal{R}c_2$	$\mathcal{R}c_3$	N_A	Thr
Dimension	1	6	36	216	1.296	6.480
Wert	5	0	1	4	3	2

Tabelle 4-2: Tabellarische Darstellung des Beispielzustands (5, 0, 1, 4, 3, 2)

Damit ergibt sich folgende Umrechnung des Tupels nach s :

$$s = 5 * 1 + 0 * 6 + 1 * 36 + 4 * 216 + 3 * 1.296 + 2 * 6.480 = 17.753$$

Die Rückrechnung von s zu den Tupelwerten sieht in diesem Beispiel folgendermaßen aus:

$$\begin{aligned}
 17.753 \div 6 &= 2.958 \quad \text{Rest } 5 \Rightarrow \mathcal{R}c_0 = 5; \quad s' = 2.958 \\
 2.958 \div 6 &= 493 \quad \text{Rest } 0 \Rightarrow \mathcal{R}c_1 = 0; \quad s' = 493 \\
 493 \div 6 &= 82 \quad \text{Rest } 1 \Rightarrow \mathcal{R}c_2 = 1; \quad s' = 82 \\
 82 \div 6 &= 13 \quad \text{Rest } 4 \Rightarrow \mathcal{R}c_3 = 4; \quad s' = 13 \\
 13 \div 5 &= 2 \quad \text{Rest } 3 \Rightarrow num = 3; \quad s' = 2 \\
 2 \div 4 &= 0 \quad \text{Rest } 2 \Rightarrow thr = 2; \quad s' = 0
 \end{aligned}$$

Ebenso wie die Zustände müssen auch die Aktionen auf ganze Zahlen mit $0 \leq a < A \vee; a \in N_0$ abgebildet werden. In einer Matrixdarstellung werden hierfür abhängig von der Anzahl der militärischen Gegner und UAVs alle möglichen Aktionen angeordnet. Die Anzahl der Spalten entspricht der Anzahl der militärischen Gegner plus der Aktionsspalte für die Umplanung der Route, also $N_E + 1$. Die Indizes der Zeilen repräsentieren eine Aktion a . Die Aktion für "Nichts tun" steht dabei an erster Stelle und die Aktion "Route umplanen" bildet den letzten Eintrag in der Matrix. Beispiele von Matrizen für unterschiedliche Anzahl an militärischen Gegnern sind in den Tabelle 4-3 angegeben.

a	E_0	RP
0	0	0
1	1	0
2	0	1

$n_{ene} = 1$

a	E_0	E_1	RP
0	0	0	0
1	1	0	0
2	0	1	0
2	1	1	0
4	0	0	1

$n_{ene} = 2$

a	E_0	E_1	E_2	RP
0	0	0	0	0
1	1	0	0	0
2	0	1	0	0
3	0	0	1	0
4	1	1	0	0
5	1	0	1	0
5	0	1	1	0
6	1	1	1	0
7	0	0	0	1

$n_{ene} = 3$

Tabelle 4-3: Übersicht über verschiedene Aktionsräume. E_i steht für den i -ten militärischen Gegner i und RP steht für die Aktion Routen umplanen

4.3.8 Mensch-Maschine Dialogs- und Interventionssteuerung

Mitteilungen, die das System an den Piloten sendet, finden über Textdialoge statt. Der Inhalt der Dialoge wird von TacARA festgelegt und über ein entsprechendes Nachrichtenobjekt an die Anzeigen im Cockpit gesendet. Dort werden die Informationen in einen Dialog aufbereitet und dem Air Mission Commander auf dem Display präsentiert. Die Steuerung dieser Dialoge hängt dabei maßgeblich davon ab, ob eine Assistenzsituation eingetreten ist oder ob der Pilot im Cockpit eine manuelle Anfrage an das Agentensystem sendet. Basis für die automatisierte Unterstützung bilden die implementierten Assistenzsituationen. Sobald eine Assistenzsituation eintritt, wird ein Textdialog erzeugt, der dem Piloten eine Beschreibung des Problems, sowie den Lösungsvorschlag für die entsprechende Kritikalitätsstufe aufzeigt. Der Modus des Agenten wechselt dann von dem passiven Beobachtungsmodus in den aktiven

Unterstützungsmodus und verbleibt in diesem Modus bis die Situation seitens des Piloten gelöst wird oder die Situation in der aktuellen Kritikalitätsstufe nicht weiterbesteht.

4.3.9 Grafische Benutzeroberfläche

Zum Zwecke der Visualisierung, Überwachung und Einstellungsmöglichkeiten des Agenten wurde eine grafische Benutzeroberfläche angelegt, über die u.a. taktische Elemente der gegenwärtigen Situation und die IMs grafisch als hexagonales Zellgitter dargestellt werden. Die Werte der IMs werden dabei mit unterschiedlichen Farben visualisiert (siehe Abbildung 4-9). Die Benutzeroberfläche ist nicht für den Benutzer im Cockpit des Hubschraubers gedacht, sondern dient als Anzeige zu Test- und Überwachungszwecken der Simulationsumgebung.



Abbildung 4-9: Grafische Benutzeroberfläche von TacARA

In Abbildung 4-9 sind zwei IMs zu sehen, die Bedrohungs-IM und darüber in einer weiteren Ebene die IM zur Repräsentation von Bergen. Die Bedrohungswerte werden über einen Farbverlauf von grün (niedrige Werte) bis rot (hohe Werte) dargestellt. Zellen, in denen eine Bergregion lokalisiert ist, sind schwarz eingefärbt. Diese IM wird standardmäßig als übergeordneter Layer angezeigt, um die Orientierung der geografischen Lage zu erleichtern. Zusätzlich sind taktische Elemente, wie die Hubschrauber- und UAV-Positionen mit entsprechenden Symbolen markiert. Auch alliierte, befreundete, neutrale oder unbekannt gesinnte Einheiten werden als farbige Rechtecke dargestellt.

4.4 Integration im Hubschraubersimulator

Das Agentensystem wurde in dem Forschungssimulator für Transporthubschraubermissionen des IFS integriert. Die Interaktion zwischen Mensch und Maschine findet über die taktische Kontrollschnittstelle statt, die sich innerhalb des Cockpits befinden. Es handelt sich um ein Multifunktionsdisplay (MFD), welches über ein Touch-sensitives Display verfügt. Über diese Displays können die Nutzer mit dem System interagieren. Die Schnittstelle bietet mehrere durchschaltbare Oberflächen mit unterschiedlichen Aufgabenbereichen. Diese umfassen neben systembezogenen Einstellungen, wie Funkfrequenzen oder das Setzen von Systemzuständen (z.B. Landefahrwerk aus-/eingefahren), die taktische Karte, auf der das aktuelle Missionsgeschehen, einschließlich Lage- und Statusinformationen aller bekannter Einheiten abgebildet wird (siehe Abbildung 4-10).

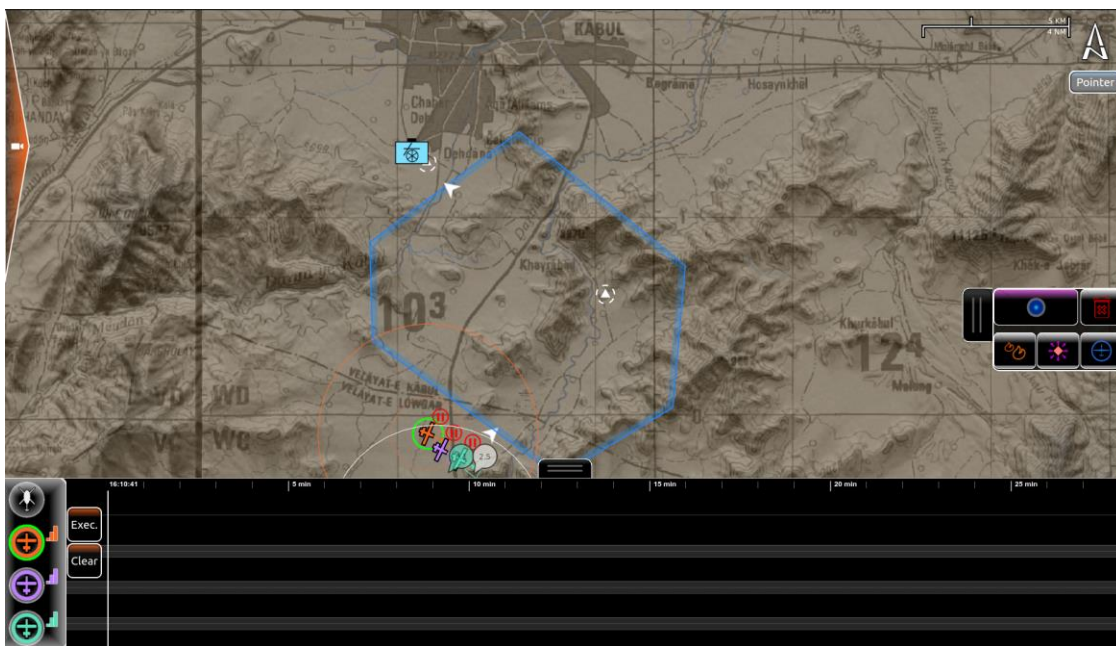


Abbildung 4-10: Taktische Kontrollschnittstelle im Hubschraubersimulatorcockpit

Es werden u.a. topografische Informationen, Flugstrecken, Luftraumstrukturen und militärische Elemente dargestellt. Militärische Einheiten werden entsprechend der NATO Joint Military Symbology (MIL-STD-2525D)²² angezeigt. Auf dieser taktischen Karte ist der Nutzer in der Lage die Flugroute des Helikopters festzulegen und Befehle an die UAVs zu senden. Die Kommunikation mit dem Agentensystem findet ausschließlich über die taktische Kartenansicht des MFDs statt. Der Pilot kann hier Eingaben tätigen, um manuelle Anfragen an das Agentensystem zu stellen und empfängt gleichermaßen Nachrichten und automatisierte Unterstützungsleistung vom Agentensystem. Der Informationsaustausch seitens des Agentensystems vollzieht sich über Textdialoge mit Schaltflächen, die dem Nutzer entsprechende Antwortmöglichkeiten bieten. Abbildung 4-10 zeigt das MFD mit der taktische Kartenansicht und Kontrollelement in dem Bedienfeld am rechten Rand der Abbildung, die dem Piloten als Anfragemöglichkeiten an TacARA zur Verfügung stehen.

4.4.1 Manuelle Anfragemöglichkeiten

Das Bedienfeld mit den manuellen Anfragemöglichkeiten, die der Nutzer an das Agentensystem stellen kann, kann zu jederzeit ein- und ausgeklappt werden. Die Schaltflächen sind in Abbildung 4-11 gesondert dargestellt und werden im Folgenden erläutert.

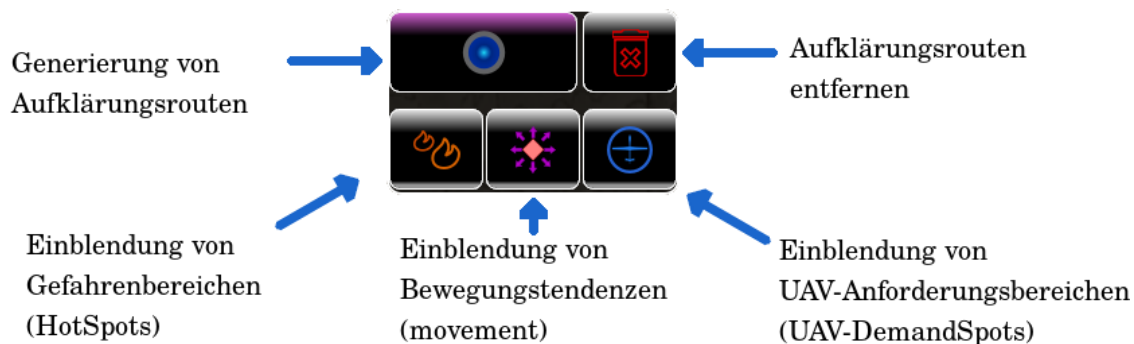
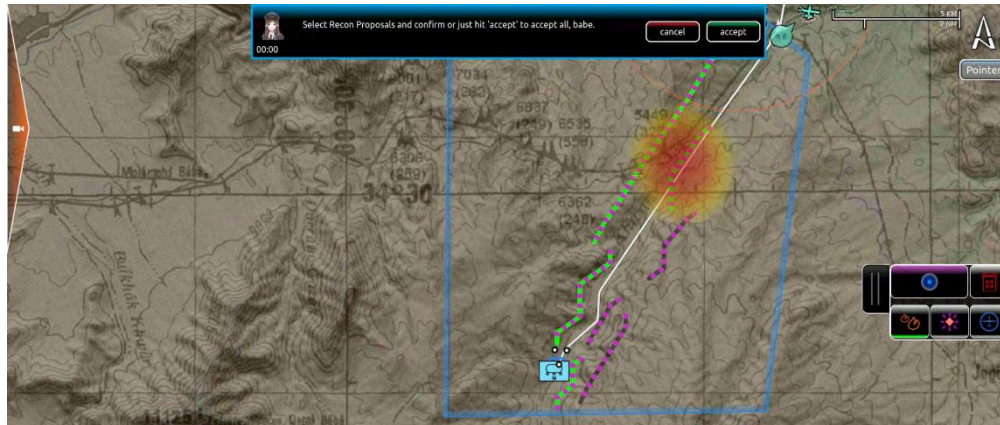


Abbildung 4-11: Schaltflächen für Anfragen an TacARA

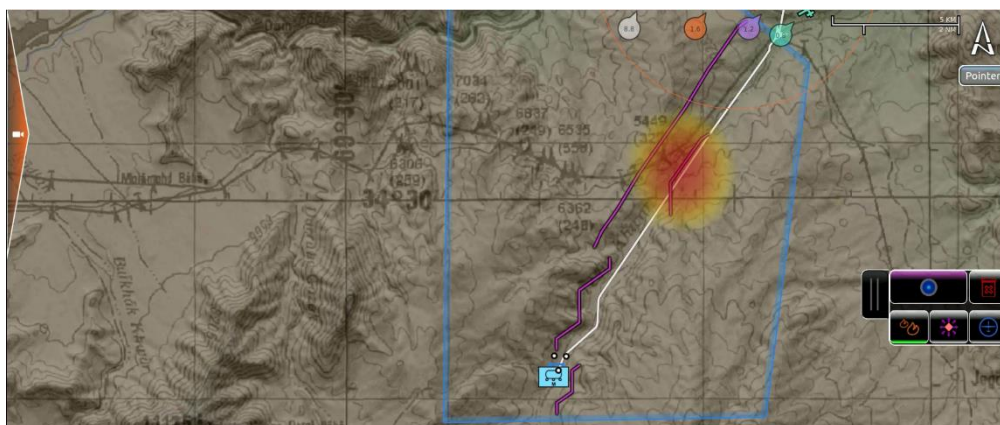
Insgesamt wurden fünf Anfragemöglichkeiten implementiert, die dem Nutzer zur Verfügung gestellt werden. Die längliche Schaltfläche mit dem blauen Augensymbol in der Mitte (siehe Abbildung 4-11 links oben) stellt eine Anfrage für die Generierung möglicher Aufklärungsrouten entlang der aktuellen Flugroute dar. Hierdurch kann der Nutzer sich zu jederzeit Vorschläge von Aufklärungsrouten vom Agentensystem generieren lassen. Ein Beispiel für eine solche Anfrage ist in Abbildung 4-12 zu sehen. Die

²² siehe https://web.archive.org/web/20170107004403/http://dtic.mil/doctrine/doctrine/other/ms_2525d.pdf

Schaltfläche mit dem Mülleimersymbol rechts oben in Abbildung 4-11 entfernt alle vom Agentensystem eingezeichneten Aufklärungsrouten von der Karte. Diese Funktion wurde eingeführt, damit der Nutzer die Möglichkeit hat alte Aufklärungsrouten zu löschen, um die Übersicht der Karte sicherzustellen.



(a)

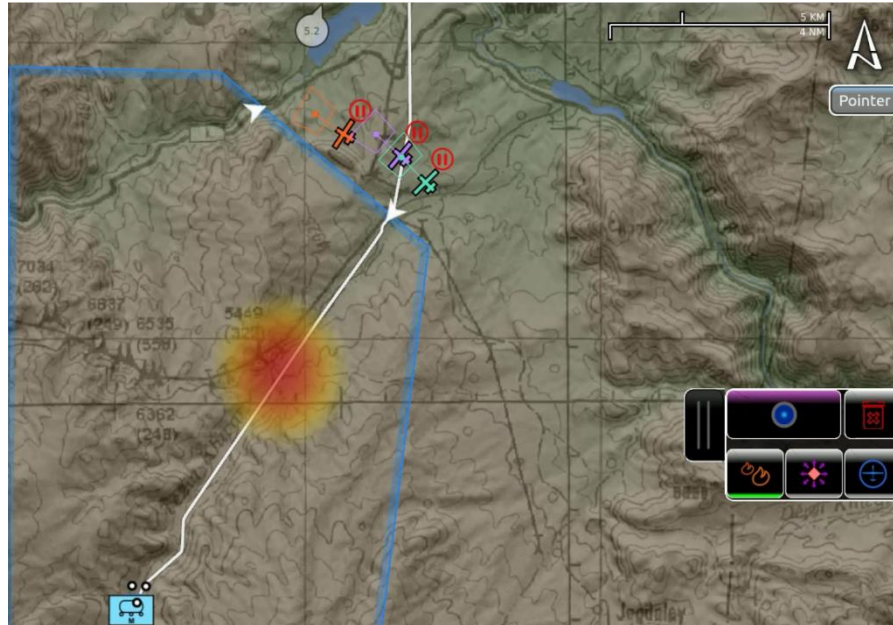


(b)

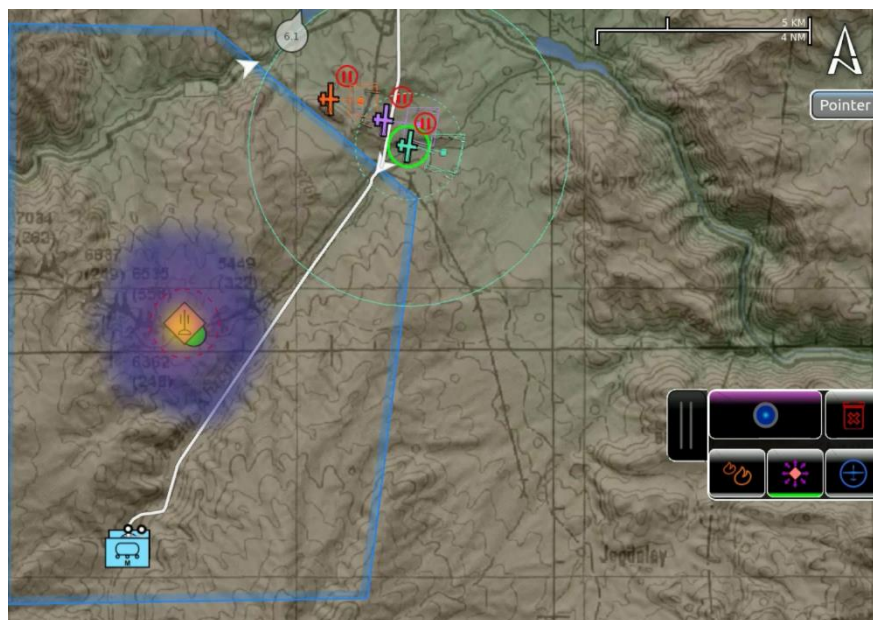
Abbildung 4-12: Manuelle Anfrage an Aufklärungsroutenvorschlägen mit bereits selektierten Routenvorschlägen in grün (a) und den eingezeichneten Routenvorschlägen in der Karte, nachdem der Nutzer 'Accept' gedrückt hat (b)

Die drei unteren Schaltflächen in Abbildung 4-11 bieten Einblendemöglichkeiten von taktischen Informationen, die auch in den Assistenzsituationen verwendet werden. Von links nach rechts sind dies die Einblendung von Gefahrenbereichen (HotSpots), Bewegungstendenzen feindlicher Einheiten und den UAV-Anforderungsbereichen. Es kann jeweils nur eine Informationsebene eingeblendet werden. Die aktuell aktive Ebene ist mit einem grünen Balken gekennzeichnet, der an der unteren Kante der entsprechenden

Schaltfläche dargestellt wird. In Abbildung 4-13 sind Beispiele für die jeweiligen Informationsebenen zu sehen. Um die visuelle Unterscheidung zu erleichtern, wurde für jede Informationsebene eine andere Farbgestaltung gewählt.



(a)



(b)



(c)

Abbildung 4-13: Darstellung der einblendbaren Informationsebenen; (a) Gefahrenbereiche (Hot-Spots), (b) Bewegungstendenzen von militärischen Gegnern (Movement), (c) UAV-Anforderungsbereiche (UAV-Demand)

Eine manuelle Anfrage wird auf der MFD-Seite in ein Nachrichtenobjekt konvertiert und über das Netzwerk innerhalb des Simulators versendet. Das Tactical Control Interface nimmt diese Nachrichtenobjekte entgegen und verarbeitet diese entsprechend der enthaltenen Anfrage. Alle Anfragen werden über den Tactical Controller an den Assistance Controller weitergereicht. Ein Beispiel des Kommunikationswegs einer Anfrage für die Aufklärungsroutenvorschlagsgenerierung wird im Sequenzdiagramm in Abbildung 4-14 aufgezeigt.

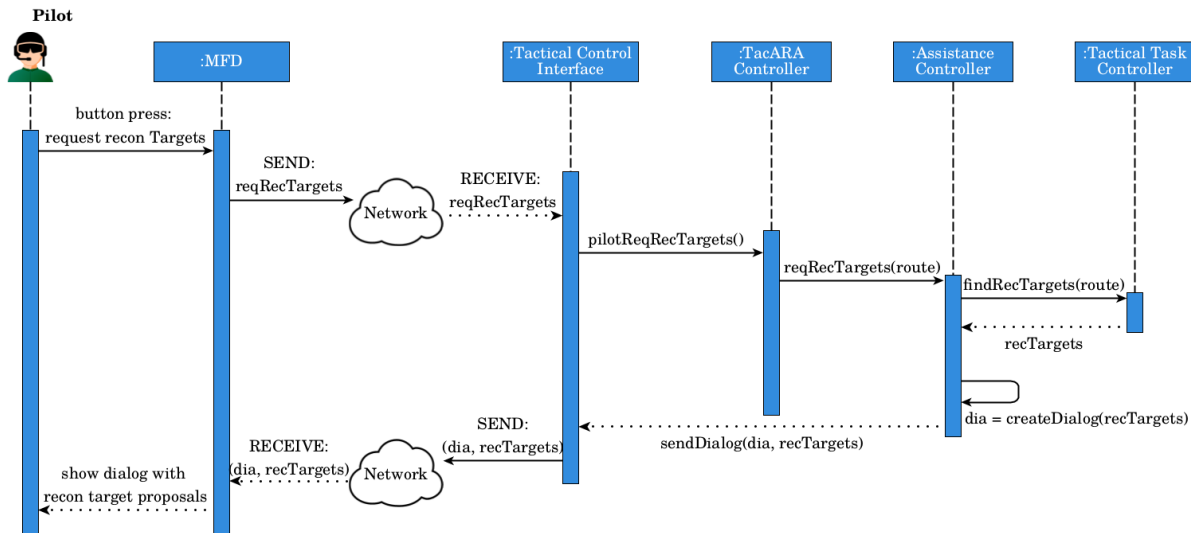


Abbildung 4-14: Sequenzdiagramm für die Verdeutlichung des Kommunikationswegs der manuellen Anfrage der Aufklärungsroutenvorschlagsgenerierung

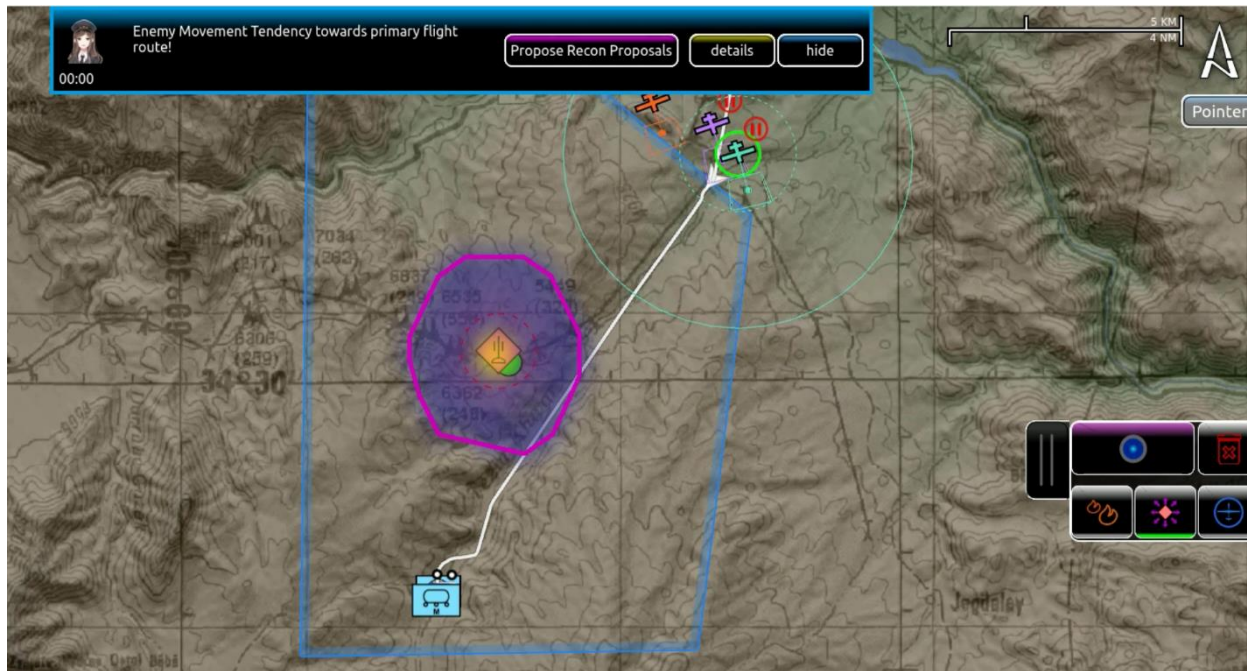
Um die Informationsebenen vom Agentensystem an das MFD zu übertragen werden die entsprechenden Zellgitter in Form von 2-dimensionalen Arrays als Nachrichtenobjekt an das Cockpit geschickt. Dort werden die diskreten Zahlenwerte für jede Zelle in Farbwerte konvertiert und um den Zentrumspunkt jeder Zelle ein in der entsprechenden Farbe gefüllter Kreis gezeichnet. Das zugrundeliegende Farbintervall wird durch den Typ der Informationsebene (HotSpot, Movement, UAV-Demand) bestimmt.

Die Informationsebenen werden nur innerhalb eines definierten Zoombereichs angezeigt. Ab einer bestimmten unteren bzw. oberen Zoomstufe werden die Informationsebene automatisch ausgeblendet. Der Grund dafür ist, dass ab einer sehr niedrigen bzw. hohen Zoomstufe angenommen wird, dass die eingeblendeten Informationen eher hinderlich sind, anstatt einen Nutzen zu bringen und deswegen automatisch ausgeblendet werden.

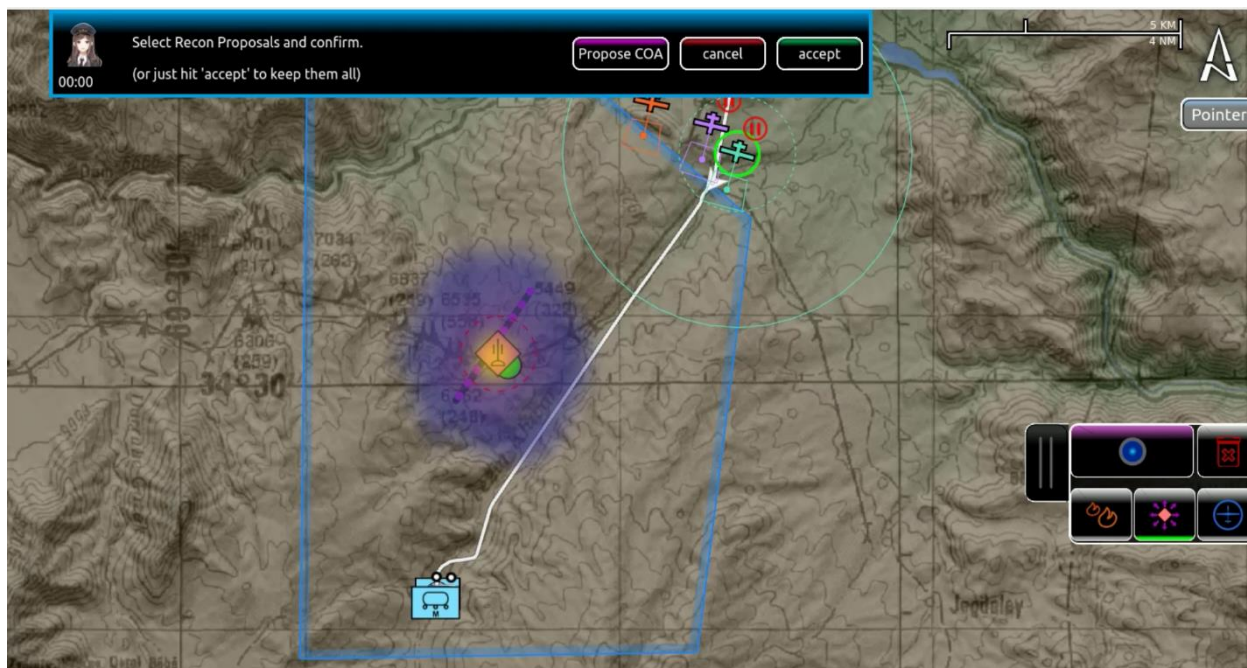
4.4.2 Automatisierte Unterstützungsleistung

Die automatisierte Unterstützungsleistung bezieht sich jeweils auf eine aufgetretene Assistenzsituation. Für die Implementierung wurden entsprechende Textbausteine für jede Kritikalitätsstufe der jeweiligen Assistenzsituationen in Konfigurationsdateien vordefiniert. Diese werden bei Auftritt einer Assistenzsituation mit Variablenwerten befüllt und dem Piloten auf der taktischen Kontrollschnittstelle angezeigt. Sofern der Agent in der Lage ist für eine aufgetretene Assistenzsituation eine Lösung anzubieten,

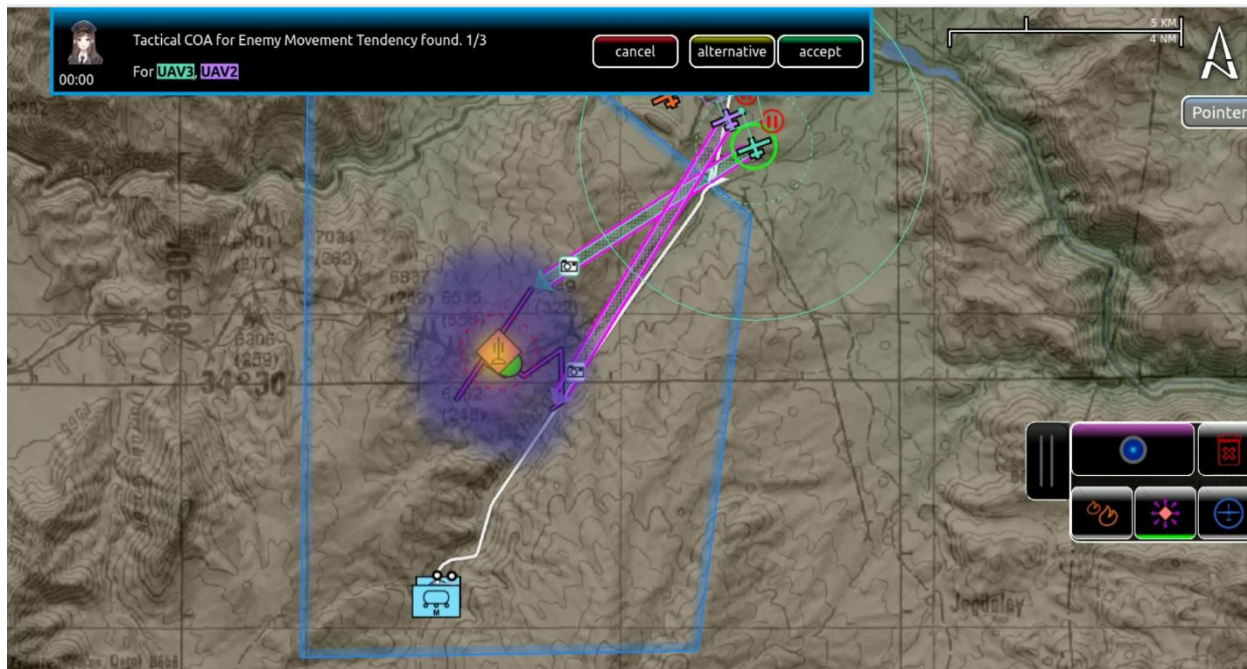
wird dem Piloten bei Eintritt der Unterstützungsstufe 1 der Aufmerksamkeitslenkung die Möglichkeit gegeben manuell eine höhere Automationsstufe zu aktivieren, um mehr Unterstützung zu erhalten. Abbildung 4-15 zeigt für die Assistenzsituation der Bewegung einer feindlichen Einheit zu der Helikopterroute hin Beispieldialoge.



(a)



(b)



(c)

Abbildung 4-15: Vom Agenten automatisch an den Nutzer herangetragene Interaktionsdialoge; (a) Aufmerksamkeitslenkung auf eine gegnerische Bewegungstendenz zur Flugroute (Unterstützungsstufe 1), (b) Aufklärungsvorschläge zur Abdeckung der Bewegungstendenz (Unterstützungsstufe 2), (c) UAV-Auftragsvergabe-vorschläge (Unterstützungsstufe 3)

Bei der Unterstützungsstufe, in der der Agent UAV-Aufgabenvergaben vorschlägt, kann über eine “Alternative”-Schaltfläche durch alternative Aufklärungspläne durchgeschaltet werden. Zusätzlich hat der Pilot die Möglichkeit auf die einzelnen Auftragspfeile der UAVs zu klicken und diese entweder zu akzeptieren oder abzulehnen. Damit kann ein gegebener Vorschlag modifiziert werden. Betätigt er die “Accept”-Schaltfläche, werden alle aktuell angezeigten Vorschläge übernommen und in Aufträge an die UAVs vergeben. Bei der ersten Unterstützungsstufe können zudem bei Bedarf detaillierte Informationen eingeblendet werden, die der Pilot in einem Unterdiallog ausklappen kann (siehe Abbildung 4-16).

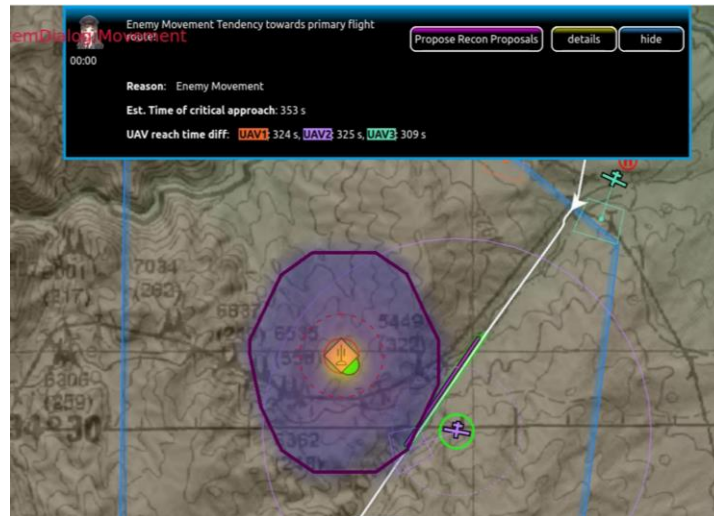


Abbildung 4-16: Detailinformationen zu einem Hinweisdialog

Bei dem Detaildialog werden drei Informationen dargestellt, der Grund für den Hinweis (Reason), die geschätzte Ankunftszeit des Helikopters (Est. Time of critical approach), d.h. die Zeit, bis er an den Rand des zu der Assistenzsituation gehörenden Bereich erreicht, sowie die Aktionszeiten der UAVs (UAV reach time diff). Die Aktionszeiten geben für jedes UAV die Zeitdifferenz zwischen der Ankunftszeit des Helikopters und die des jeweiligen UAVs.

Der Grund für den Hinweis wird entsprechend aus dem IM-Tree herausgefiltert. Dabei wird ausgehend von der jeweiligen IM im IM-Tree eine Rückwärtssuche durchgeführt und die Beträge, die bei dem verwendeten Kombinationsalgorithmus einen relevanten Einfluss haben, bestimmt.

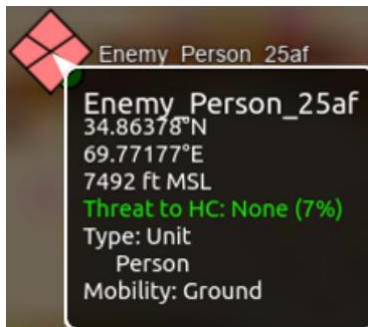
4.4.3 Darstellung der Bedrohungsbewertung

Der durch das Agentensystem ermittelte Bedrohungsgrad einer feindlichen Einheit wird dem Piloten an zwei Stellen vermittelt. Zum einen wird er in einer einblendbaren Informationsbox angezeigt, wenn der Pilot auf das gegnerische Symbol drückt und er sich die Informationsbox zu der gegnerischen Einheit anzeigen lässt. Um ein intuitives Verständnis des Bedrohungsgrads zu gewährleisten, wird der Grad der Bedrohung in die Klassen *None*, *Low*, *Medium*, *High* und *Very High* eingeteilt. Die zugehörige Bedrohungsstufe und der ermittelte Grad werden in der Informationsbox als zusätzliche Information in Klammern dahinter angegeben. Die Grenzwerte zur Bestimmung der jeweiligen Klasse ist in Tabelle 4-4 aufgelistet. Zusätzlich wird die Schriftfarbe entsprechend des Bedrohungsgrads von grün (bei niedrigem Bedrohungsgrad) nach rot (bei hohem Bedrohungsgrad) gesetzt.

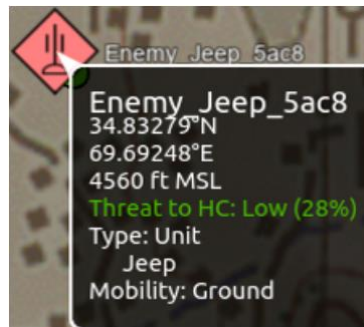
Grenze	None	Low	Medium	High	Very High
untere Grenze a [%]	0	10	30	60	80
obere Grenze b [%]	10	30	60	80	100

Tabelle 4-4: Grenzen der Klassifizierung des Bedrohungsgrads ($a \leq threat \leq b$)

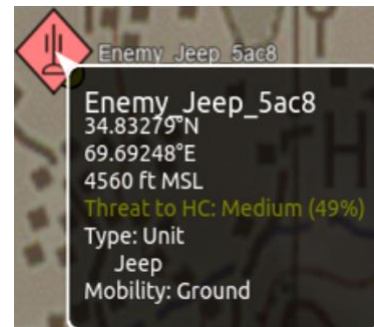
Neben der Möglichkeit sich den ermittelten Wert des Bedrohungsgrads über die Informationsbox anzeigen zu lassen, wird dieser direkt an dem taktischen Symbol einer feindlichen Einheit mit einem Bedrohungsindikator farblich gekennzeichnet. Bei dem Indikator handelt es sich um einen Halbkreis, welcher rechts unten an dem taktischen Symbol angeheftet wird. Ein Beispiel ist in Abbildung 4-17 (f) zu sehen. Der zusätzliche Nutzen des Bedrohungsindikators neben der Angabe des Bedrohungsgrade und -grads in der Informationsbox besteht darin, dass die Piloten ohne irgendwelche Menüs öffnen zu müssen den ungefähren Bedrohungsgrad durch die farbliche Darstellung sofort wahrnehmen können.



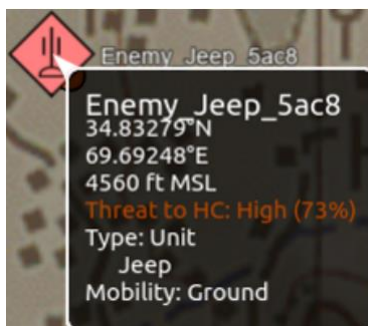
(a)



(b)



(c)



(d)



(e)



(f)

Abbildung 4-17: Beispieldialoge des Bedrohungsgrads für die Kategorie (a) None, (b) Low, (c) Medium, (d) High, (e) Very High; (f) Für die Kategorie Very High ist der Bedrohungsindikator als dargestellt

5 | EXPERIMENTELLE EVALUIERUNG

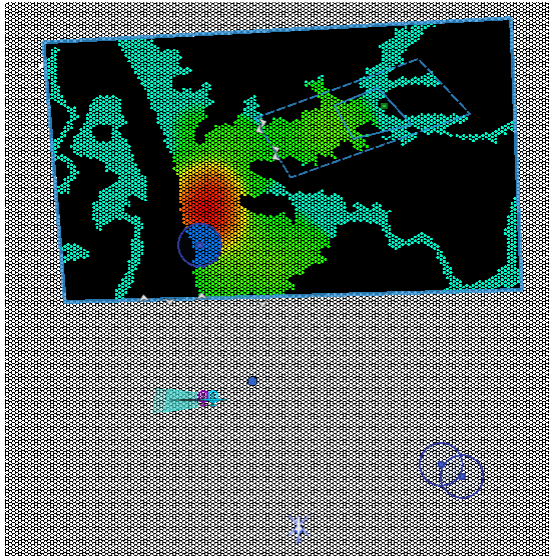
Die Evaluierung des implementierten Agentensystems fand in drei Auswertungen statt. Zunächst wurde eine *technische Auswertung* (Kap. 5.1) vorgenommen, um die Fähigkeiten und Parametereinstellungen des Agenten zu untersuchen. Diese Vorabuntersuchung diente als Vorbereitungsmaßnahme für die im Anschluss durchgeführten experimentellen Evaluierungen, in denen die *Kollaborationsanalyse zwischen Piloten und Assistenzsystem* (Kap. 5.2), sowie die *Bedrohungs- und UAV-Feindbeobachtungsanalyse von Assistenzsystem und Pilot* (Kap. 5.3) mit Probanden untersucht wurde. Die einzelnen Untersuchungsrichtungen werden im Einzelnen näher vorgestellt.

5.1 Technische Auswertung

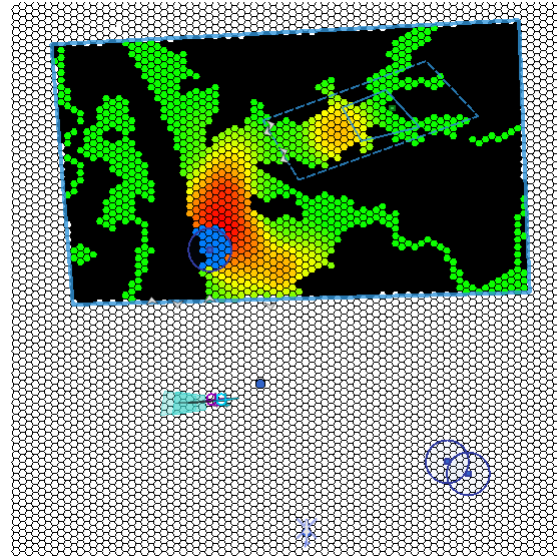
Im Zuge von Vorbereitungsmaßnahmen für die experimentellen Untersuchungen mit menschlichen Operateuren wurde der Agent mit verschiedenen Parametereinstellungen untersucht. Aufgrund des verwendeten IM-Trees und den Berechnungsmodellen gibt es eine Vielzahl an möglichen Parameterwerten, die sich setzen lassen und die Resultate beeinflussen. Beispielsweise ist es möglich für jeden einzelnen Kombinerungsalgorithmus innerhalb des IM-Trees verschiedene Parameterwerte zu setzen. Dabei ist das Setzen von bestimmten Werten bei einigen Kombinationsalgorithmen sinniger als bei anderen. Bei der technischen Auswertung wurde der Fokus deswegen auf bestimmte Aspekte gelegt, die einen großen Einfluss auf die Situationsrepräsentation und taktische Bewertung des Agenten haben. Von zentraler Bedeutung ist hierbei zunächst die *Zellauflösung*, da über diese festgelegt wird, wie groß das resultierende Zellgitter für die Diskretisierung eines Missionsgebiet sein wird. Zudem hat die Größe des Zellgitters einen nicht zu unterschätzenden Einfluss auf die Berechnungsdauer, was Auswirkungen auf die Antwortzeiten des Agenten hat.

5.1.1 Zellauflösung

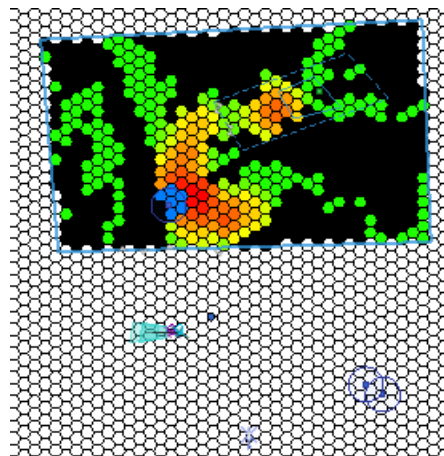
Über die Zellgröße lässt sich der Detailgrad der Diskretisierung festlegen. Je kleiner die Größe einer Zelle ist, desto genauer ist die Repräsentation der Missionsumgebung durch das entsprechende Zellgitter, was insbesondere bei Karten mit schmalen Tälern von Vorteil ist (siehe Abbildung 5-1).



(a) Außenzellradius 100m



(b) Außenzellradius 200m



(c) Außenzellradius 400m

Abbildung 5-1: Zellgitter mit unterschiedlichen Auflösungen für ein Missionsgebiet. Der Detaillierungsgrad ist insbesondere an den Tälern zu erkennen

Allerdings geht ein höherer Detailgrad auf Kosten der Rechenleistung. Um die Auswirkung der Zellgröße auf die Berechnungsdauer zu verdeutlichen wurde über ein Missionsgebiet ein Zellgitter gelegt und die Dauer der Berechnungszyklen aufgezeichnet. Dabei wurden zwei Situationen unterschieden, eine Situation ohne geplante Primär-/Alternativrouten, d.h. der Agent hat in diesem Fall lediglich eingehende Daten entgegengenommen und aufbereitet, sowie den IM-Tree erstellt. In der zweiten Situation wurde eine Primär-/Alternativrouten hinzugefügt, so dass der Agent zum einen weitere IMs generiert hat und Berechnungen hinsichtlich der Generierung von Aufklärungsschwerpunkten vorgenommen hat. Für die

Ermittlung der Berechnungsdauer pro Iteration wurden jeweils 200 Durchläufe für jede Situation aufgezeichnet und die Zeiten gemittelt. Das Missionsgebiet, über das für diese Untersuchung ein Zellgitter gespannt wurde, beträgt eine ungefähre Größe von $25747.38m \times 31383.65m = 808046.762337km^2$. Die Ergebnisse sind in Abbildung 5-2 zu sehen.

Berechnungsdauer für unterschiedliche Zellgrößen

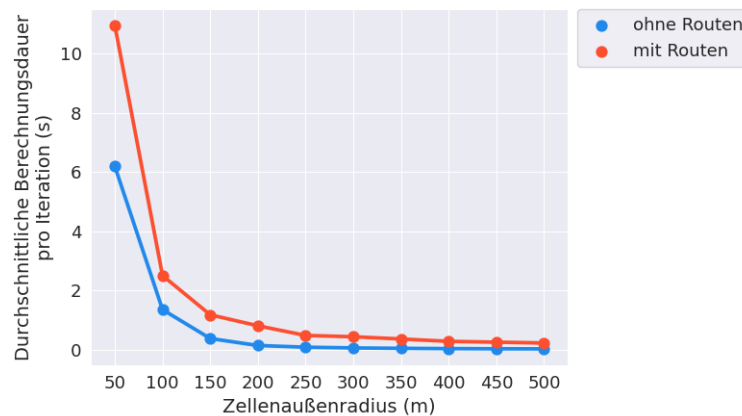


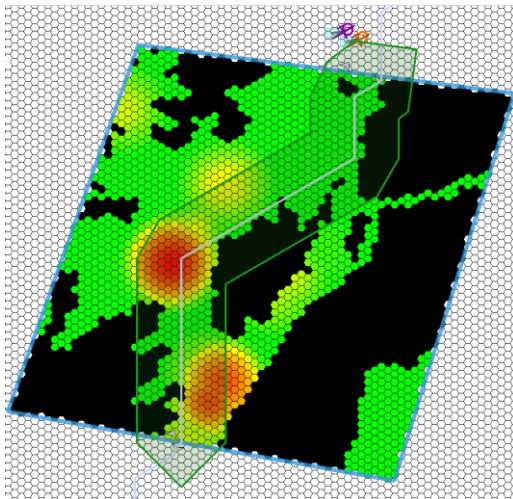
Abbildung 5-2: Durchschnittliche Berechnungsdauer pro Iteration bei unterschiedlichen Zellgrößen

Wie man sieht, steigt die Berechnungsdauer mit zunehmenden Detaillierungsgrad (d.h. kleine Zellgrößen) exponentiell an. Es ist daher wichtig je nach Anwendungsfall und gewünschten Detailgrad, sowie in Abhängigkeit der Kartengröße die richtige Zellgröße zu wählen, so dass die Berechnungsdauer akzeptabel ist in Hinblick auf die Antwortzeiten des Agenten. Für die Experimente wurde eine Zellgröße mit einem Außenradius von 200m gewählt, da diese Größe einen guten Kompromiss zwischen Berechnungsdauer einer Iteration und Detaillierungsgrad darstellt. Die Missionsszenarien, die für die Experimente erstellt wurden, hatte alle eine ähnliche Größe, wie das in diesem Unterkapitel untersuchte Missionsgebiet, um für jede Mission ähnliche Voraussetzungen bzgl. der Iterationsdauer zu schaffen.

5.1.2 Parametrisierung der Aufklärungsziele

Für die Kalkulation der Aufklärungswerte können den einzelnen Aufklärungszieltypen unterschiedliche Gewichte zugewiesen werden. Auf diese Weise ist es möglich Aufklärungsschwerpunkte entsprechend der Zieltypen zu priorisieren. Die Aufklärungswerte stellen die Grundlage für die Bestimmung von Aufklärungszielen dar und haben deswegen einen entscheidenden Einfluss auf die taktische Vorgehensweise des Agenten. Neben den Gewichten der Aufklärungszieltypen ist es darüber hinaus möglich den Schwellwert τ_{rec} festzulegen. Dieser Faktor repräsentiert die Risikobereitschaft Regionen, denen bei Aufklärung ein bestimmter Bedrohungswert zugeordnet ist, zu ignorieren, wenn der Wert unterhalb des Schwellwerts liegt. Darüber hinaus ist es außerdem möglich die maximale Pfadlänge der

Aufklärungsziele festzulegen. Es ergeben sich dadurch eine große Bandbreite an möglichen Konfigurationen für die Parameterwerte. Abbildung 5-3 zeigt die diskretisierte Beispielumgebung für die in den folgenden Abschnitten untersuchten Parameterauswirkungen. Visualisiert ist die Flugroute in weiß und der dazugehörige Puffer in grün. Bei der Evaluation wurde der Radius zur Bestimmung des Puffers um die Flugroute r_p auf 2000 Meter gesetzt.



(a) Darstellung der Bedrohungs-IM



(b) gefilterte Aufklärungswerte, die innerhalb des Puffers liegen

Abbildung 5-3: Visualisierung des Puffers (grünes Polygon) um eine geplante primäre Flugroute (durchgezogene Linie) mit $r_p = 2000[m]$

Im Folgenden werden zunächst die **Aufklärungszielgewichtungen** evaluiert und deren Einfluss verdeutlicht. Anschließend wird die Auswirkung des **Aufklärungsschwellwerts** τ_{rec} und der **Aufklärungsroutenlänge** beschrieben.

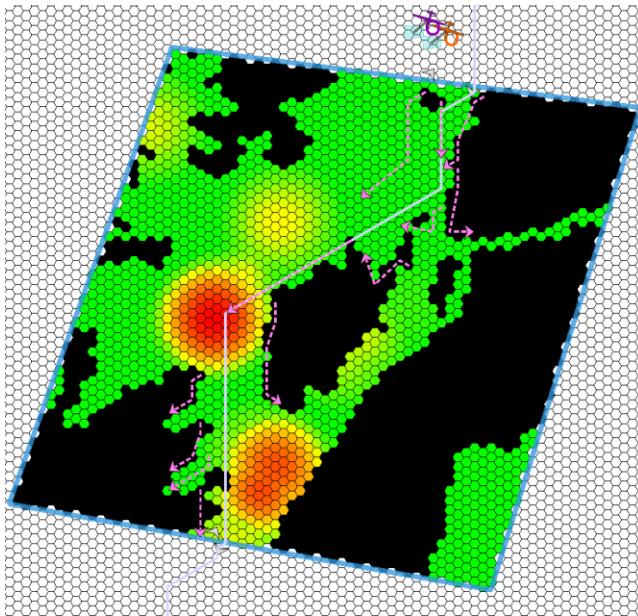
5.1.2.1 Aufklärungszielgewichtung

Ziel der Auswertung ist es den Einfluss der Gewichtungsfaktoren bei gleichem Aufklärungsschwellwert ($\tau_{rec} = 0.040$) aufzuzeigen. Dafür wurden drei Konfigurationen gewählt (siehe Tabelle 5-1). Für die Veranschaulichung wurden sechs der 10 Parameterwerte genutzt, die restlichen vier Gewichtungsfaktoren wurden auf 0 gesetzt.

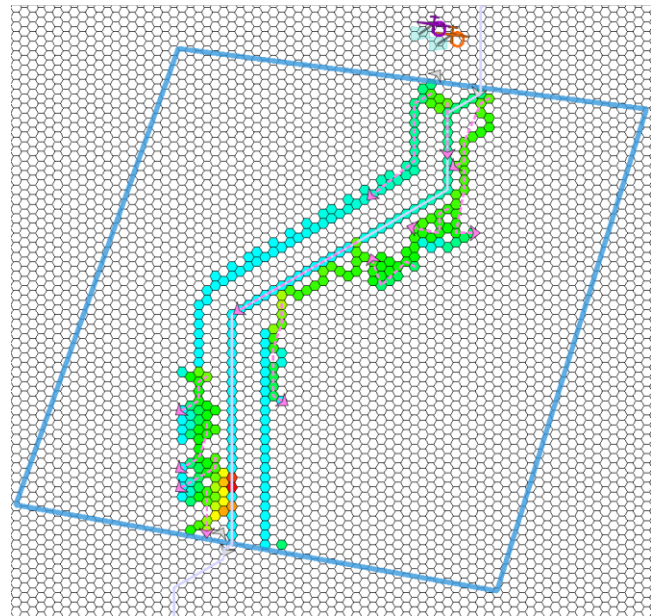
Konfigurationen	$W_{primaryRoute}$	$W_{leftFlank}$	$W_{rightFlank}$	$W_{mountainside}$	$W_{chokePoint}$
Konfiguration 1	1.0	1.0	1.0	5.0	3.5
Konfiguration 2	50.0	1.0	1.0	1.0	3.5
Konfiguration 3	1.0	1.0	50.0	0.0	0.5

Tabelle 5-1: Verwendete Konfigurationen für die Bestimmung von Aufklärungszielen

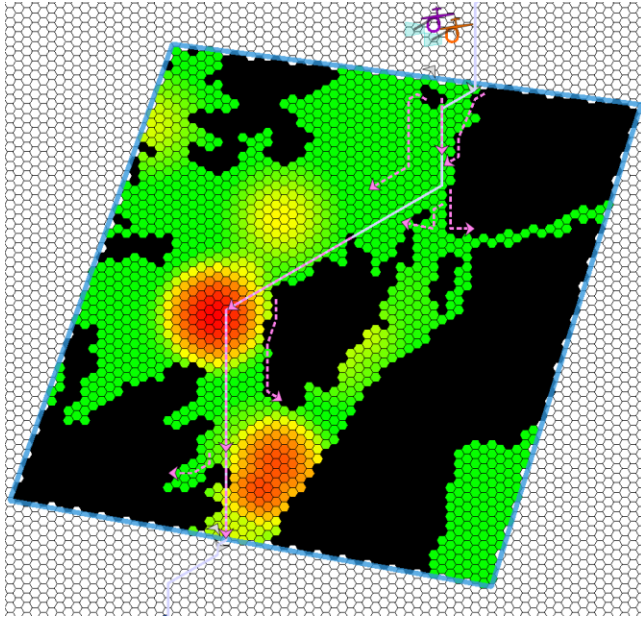
Die Bestimmung der Aufklärungsziele ist in den Beispielen in Abbildung 5-4 dargestellt. Die Abbildungen zeigen, wie die Konfigurationen die resultierenden Aufklärungsschwerpunkte beeinflussen. Konfiguration 1 wurde so gewählt, dass die Schwerpunkte auf Berghänge und Täler gelegt werden (Abbildung 5-4 (a), (b)), Konfiguration 2 zeigt eine allgemeine Streuung mit einem Fokus auf die Hubschrauberoute (Abbildung 5-4 (c), (d)) und Konfiguration 3 legt die Schwerpunkte auf die rechte Flanke (aus Sicht der Flugroute von Norden kommend) der primären Flugroute (Abbildung 5-4 (e), (f)).



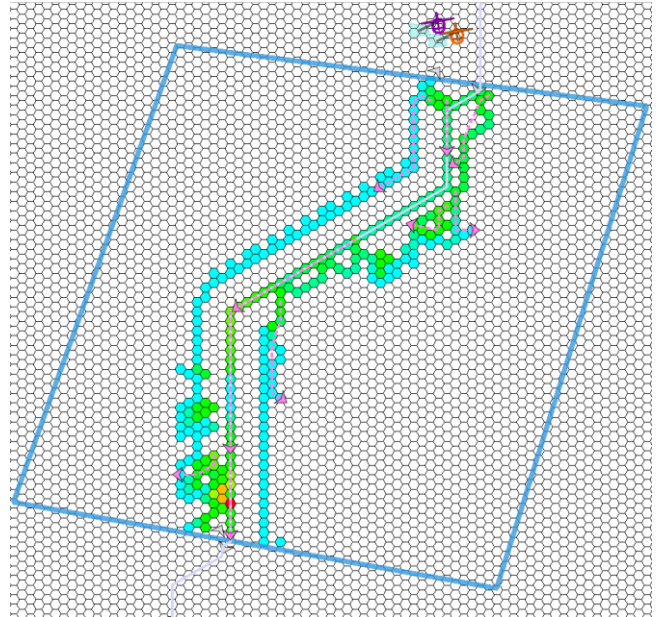
(a) Konfiguration 1, Bedrohungs-IM



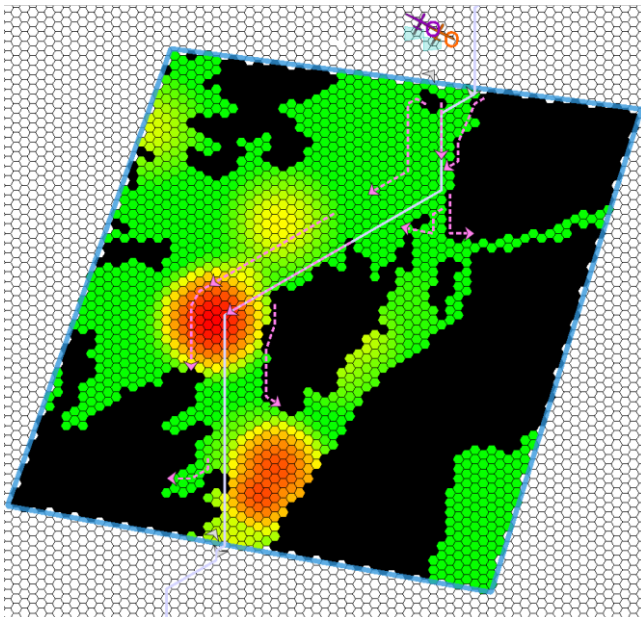
(b) Konfiguration 1, gefilterte Aufklärungswerte



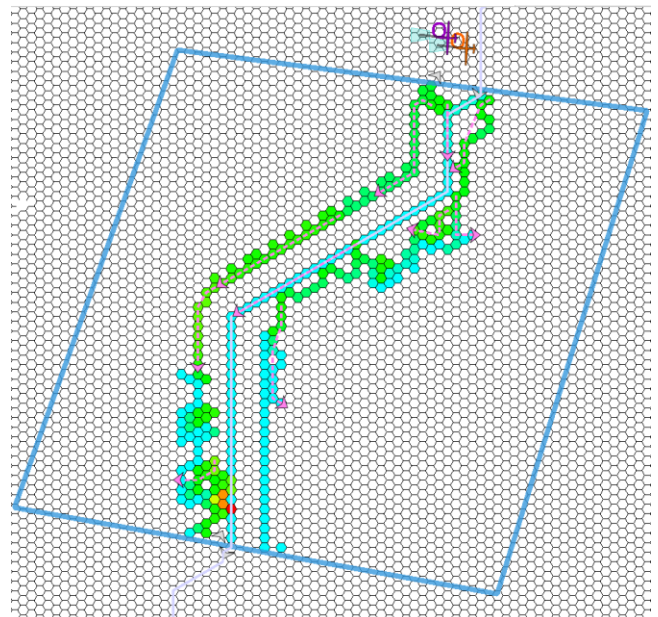
(c) Konfiguration 2, Bedrohungs-IM



(d) Konfiguration 2, gefilterte Aufklärungswerte



(e) Konfiguration 3, Bedrohungs-IM



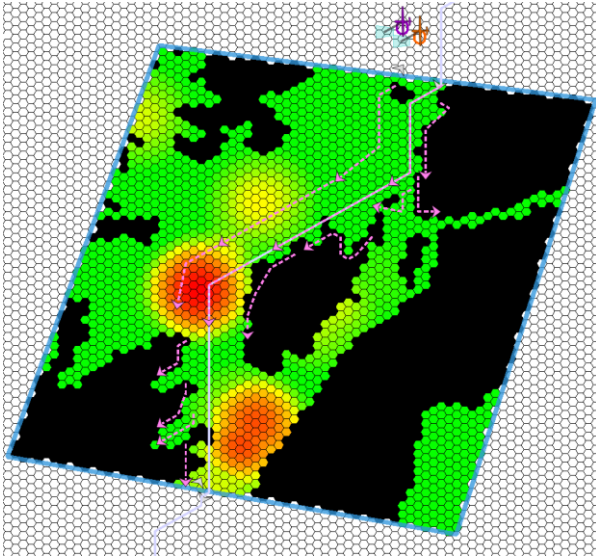
(f) Konfiguration 3, gefilterte Aufklärungswerte

Abbildung 5-4: Aufklärungsziele mit unterschiedlichen Parameterkonfigurationen bei jeweils gleichem Schwellwert $\tau_{rec} = 0.040$

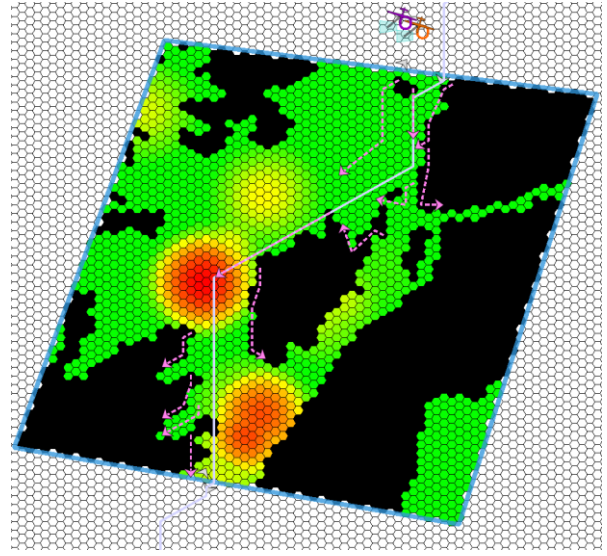
Für die Experimente wurde jedoch auf die berechneten Parameterwerte verzichtet und stattdessen manuelle Werte für die jeweiligen Missionen gesetzt, da man darüber mehr Kontrolle über das gewünschte taktische Verhalten hat.

5.1.2.2 Aufklärungsschwellwert

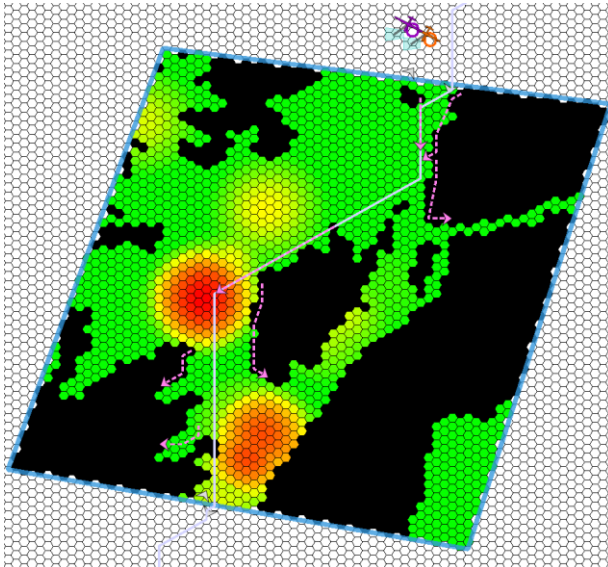
Der Aufklärungsschwellwert beeinflusst im Wesentlichen die Regionen, in denen die Suche nach Aufklärungszielen stattfinden soll. Der Wert des Schwellwerts τ_{rec} hat einen Einfluss auf die Form und Anzahl an Aufklärungszielen. Für die Veranschaulichung wurde der Schwellwert bei gleicher Konfiguration verändert. Verwendet wurde dabei die Konfiguration 1 aus Tabelle 5-1. Die Resultate bei variierendem Schwellwert τ_{rec} sind in Abbildung 5-5 dargestellt.



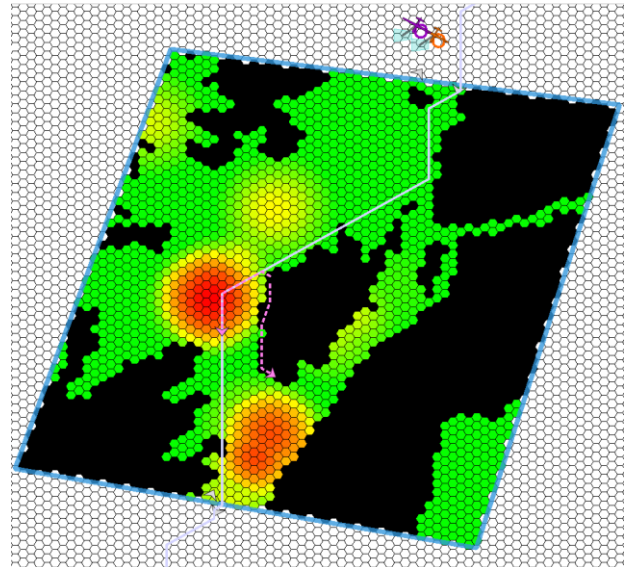
(a) $\tau_{rec} = 0.010$



(b) $\tau_{rec} = 0.40$



(c) $\tau_{rec} = 0.070$



(d) $\tau_{rec} = 0.100$

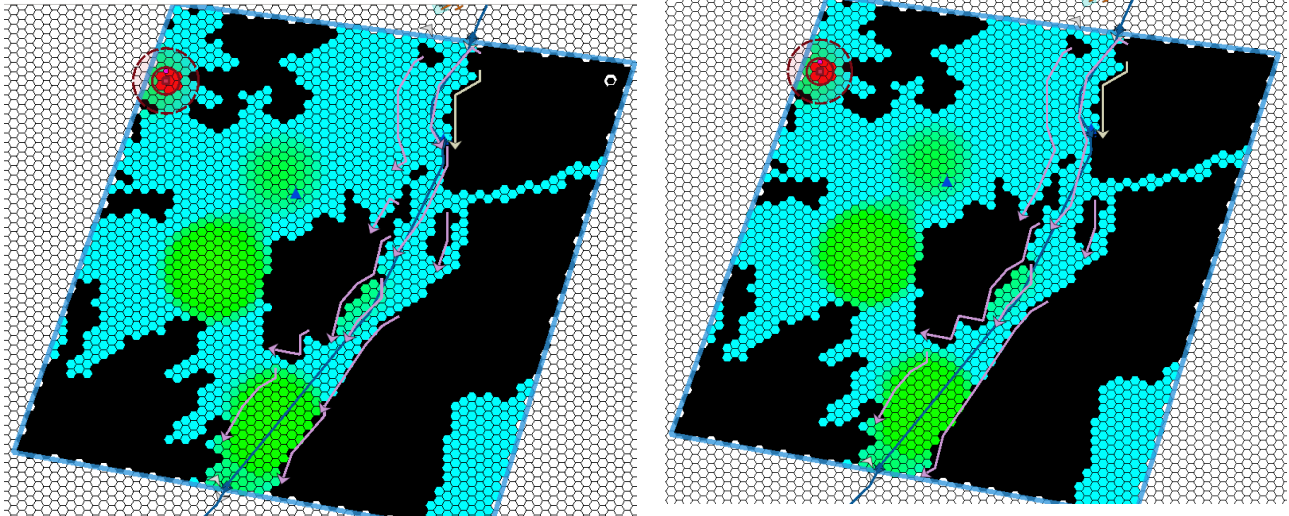
Abbildung 5-5: Aufklärungsziele (gestrichelte, lilafarbene Pfeile) mit unterschiedlichen Aufklärungsschwellwerten bei gleicher Gewichtsconfiguration (Konfiguration 1 aus Tab. 5.1)

Für die Experimente wurde bei allen Missionen ein Schwellwert von 0.040 gewählt, da dieser eher vorsichtigeres taktisches Vorgehen widerspiegelt und die Anzahl der Aufklärungsziele nicht zu groß werden lässt.

5.1.2.3 Aufklärungsroutenlänge

Zur Bestimmung der Aufklärungsrouten existieren zwei Schwellwerte, ein minimaler Pfadlängenwert und ein maximaler Pfadlängenwert. Der minimale Pfadlängenwert gibt die Mindestlänge eines Aufklärungsziels an. Die Annahme dahinter ist, dass zu kurze Aufklärungsrouten einen sehr geringen Nutzen bringen und zu Unübersichtlichkeit führen können, da möglicherweise sehr viele kurze Aufklärungsrouten vom Agenten bestimmt werden könnten. Daher wurde die Mindestlänge des Pfades eines Aufklärungsziels auf vier Zellen gesetzt.

Interessanter verhält es sich mit dem Schwellwert für die maximale Pfadlänge eines Aufklärungspfades. Dieser Wert gibt die maximale Anzahl an Zellen an, die in einem Pfad enthalten sein dürfen. Mit diesem Feld kann also die maximal erlaubte Länge eines Aufklärungspfades festgelegt werden. Die Länge eines Aufklärungsziels stellt ein wichtiges Kriterium für taktische Überlegungen dar. Je länger ein Aufklärungspfad ist, desto mehr Fläche lässt sich damit zwar aufklären, doch ist ein UAV auch umso länger an diesen gebunden, um den Auftrag der Aufklärung abzuschließen. Ein niedriger Wert dagegen führt zu kürzeren Aufklärungszeiten, allerdings reduziert sich dabei auch die aufgeklärte Fläche um das Ziel. Kürzere Aufklärungsrouten erhöhen die taktische Flexibilität der UAV-Nutzung, jedoch erhöht dies auch die Anzahl der Aufklärungsziele, wenn man ungefähr die gleiche Fläche aufklären möchte. Abbildung 5-6 verdeutlicht diesen Sachverhalt. Es wurden für ein Missionsgebiet und einer vordefinierten Route die Aufklärungsziele unter gleichen Bedingungen bestimmt, jedoch jeweils mit unterschiedlichen maximaler Pfadlänge.



(a) maximaler Schwellwert gesetzt auf 15 Zellen mit 12 Aufklärungspfaden

(b) maximaler Schwellwert gesetzt auf 30 Zellen mit 8 Aufklärungspfaden

Abbildung 5-6: Ermittelte Aufklärungspfade (lilafarbene Pfeile) bei unterschiedlichen maximalen Pfadlängen

Wie man sieht, reduziert sich die Gesamtzahl an Aufklärungsrouten bei erhöhten maximalen Pfadlängenwert. Die Länge eines Aufklärungspfades ist für taktische Überlegungen ein wichtiger Faktor, da darüber die Dauer der Bindung eines UAVs an einen Aufklärungsauftrag gekoppelt ist. Je länger eine Route, desto länger ist ein UAV mit dessen Aufklärung beschäftigt. Andererseits erreicht man über wenige Aufklärungsrouten eine höhere Abdeckung und reduziert zugleich die Anzahl an notwendigen Aufklärungsaufgaben. Für die Experimente wurde eine maximale Pfadlänge auf 15 Zellen gesetzt, was zwar eher zu mehr Aufklärungszielen führt, dafür allerdings mehr Flexibilität ermöglicht und Nutzer eine feinere Entscheidung darüber treffen können, welche Regionen aufgeklärt werden sollen.

5.1.3 Evaluierung der Bedrohungsbewertung durch das DBN

Für das für die Bedrohungsbewertung verwendete DBN wurden zwei Aspekte ausführlich untersucht:

- Bedrohungsverlauf bei unterschiedlichen CPTs innerhalb eines Zeitschritts
- Einfluss der gespeicherten Zeitschritte auf den resultierenden Bedrohungswert

5.1.3.1 Bedrohungsverlauf bei unterschiedlichen CPTs

Zur Untersuchung des Bedrohungsverlaufs bei unterschiedlichen bedingten Wahrscheinlichkeitstabellen (engl.: conditional probability tables; CPTs) wurden verschiedene CPTs

erstellt und deren Resultate miteinander verglichen, um den Einfluss auf die generelle Bedrohungsbewertung zu verdeutlichen. Insgesamt wurden sechs CPTs erstellt:

- *Default static*: CPT, die standardmäßig zur Berechnung verwendet wird
- *Landing Zone*: CPT, die insbesondere eingesetzt wird, wenn man sich in der Nähe einer Landezone befindet
- *Threat +*: CPT, die eine höhere Bedrohung annimmt (pessimistische Schätzung)
- *Threat -*: CPT, die eine niedrigere Bedrohung annimmt (optimistische Schätzung)
- *Movement +*: CPT, die eine stärkere Gewichtung der Bewegung setzt
- *Ignore Movement*: CPT, die den Einfluss der Bewegung ignoriert

Alle CPTs verwenden jeweils unterschiedliche Bewertungen für die Bedrohungslage. Die CPT *Landing Zone* stellt dabei eine Besonderheit dar. Sie wurde speziell für die Flugphase beim Anflug einer Landezone innerhalb des Einsatzgebiets entwickelt. Sobald sich der Helikopter in der Nähe einer Landezone innerhalb des Einsatzgebiets befindet wird diese CPT verwendet. Als Ausgangstabelle für den generellen Verlauf einer Mission wird eine der übrigen CPTs gesetzt und kann beim Start der Simulation spezifiziert werden.

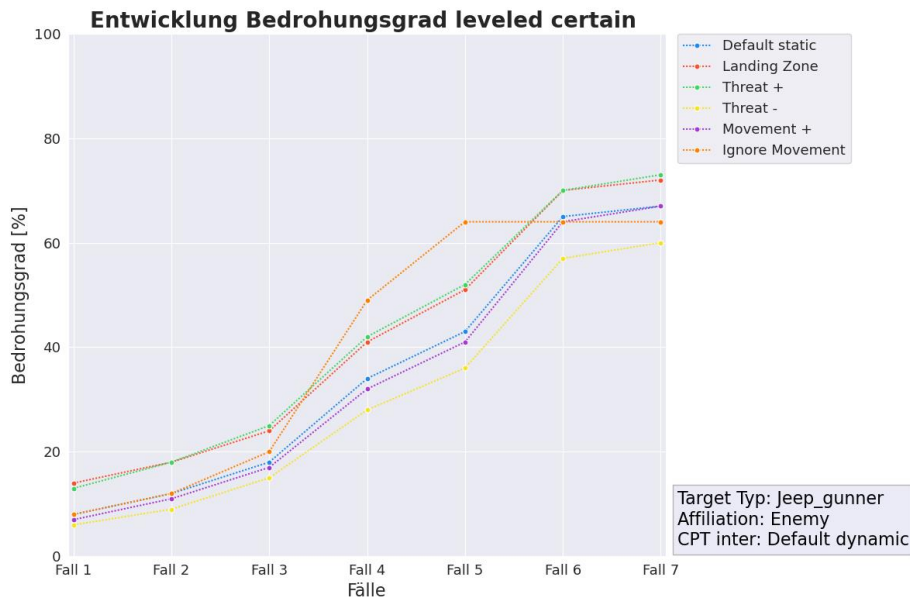
Für die Bedrohungsauswertung unter Verwendung der unterschiedlichen CPTs wurden sieben verschiedene Fälle erstellt. Die Fälle beschreiben unterschiedliche Feindlagen, was bedeutet, dass unterschiedliche Kombinationen von diskreten Werten der Informationsvariablen zusammengestellt wurden (siehe Tabelle 5-2). Für diese Fälle wurde das Verhalten der Bedrohungsauswertung untersucht.

Fälle	speed	direction	terrain	within weapon radius	within detection radius
Fall 1	low	away	hindering	far	far
Fall 2	low	away	hindering	far	within
Fall 3	low	away	hindering	surrounding	within
Fall 4	low	away	hindering	close	within
Fall 5	low	away	hindering	within	within
Fall 6	low	along	flat	within	within
Fall 7	high	towards	flat	within	within

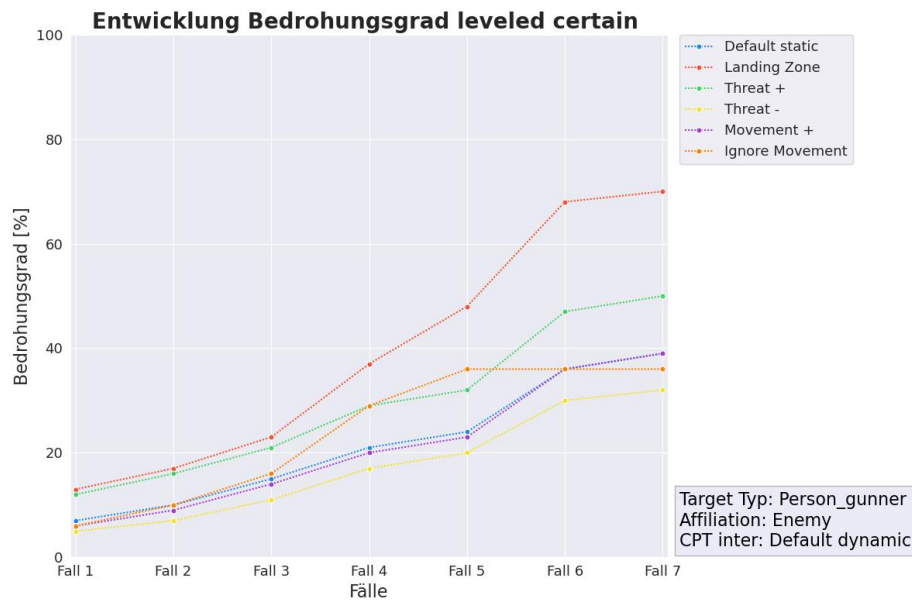
Tabelle 5-2: Beschreibung der diskreten Wertekombinationen für die generierten Fälle

Die Fälle wurden dabei so gewählt, dass Fall 1 und Fall 7 Situationen mit niedrigstem bzw. höchstem Bedrohungswert für den gleichen Waffentyp (target type) und Gesinnung (affiliation) abbilden. In den Fällen 2 bis 5 wird der Wert der Variable *within weapon radius* Schritt für Schritt von dem diskreten Wert *far* auf *within* erhöht. Damit wird der Einfluss dieses Werts auf den Bedrohungswert abgebildet. Da diese Variable mitunter den größten Einfluss auf den Bedrohungsgrad einer Einheit während einer Mission hat, entspricht der Verlauf dieser Fälle auch dem Verlauf des Bedrohungsgrads bei einer Bewegung des Helikopters in Richtung einer gegnerischen Einheit.

Die Bedrohungswerte wurden sowohl für einen Zeitschritt (static) als auch für mehrere Zeitschritte (leveled) berechnet. In Abbildung 5-7 sind für die sechs CPTs die Bedrohungswerte innerhalb eines Zeitschritts dargestellt.



(a) Bedrohungsverlauf für target type Jeep_gunner



(b) Bedrohungsverlauf für den target type Person_gunner

Abbildung 5-7: Entwicklung der Bedrohungsverläufe für unterschiedliche CPTs

Es werden die Bedrohungswerte für den Einheitentyp “Jeep_gunner” (siehe Abbildung 5-7 (a)) und “Person_gunner” (siehe Abbildung 5-7 (b)) gegenübergestellt. Die Gegenüberstellung verdeutlicht u.a. den Unterschied zwischen den CPTs “Landing Zone” und “Threat +”. Die CPT “Threat +” erhöht den Bedrohungsgrad bei beiden Waffentypen gleichermaßen. Damit wird eine grundlegend höhere Bedrohungslage abgebildet. Für den Einheitentyp “Jeep_gunner” erhöhen sich bei der CPT “Landing Zone” die Bedrohungswerte genauso wie bei der CPT “Threat +”, jedoch erhöht sich der Bedrohungswert für “Person_gunner” bei der CPT “Landing Zone” wesentlich stärker als bei “Threat +”. Darin spiegelt sich die Annahme wider, dass im Bereich der Landezone die unterschiedliche Beweglichkeit der Einheitentypen kaum noch einen Unterschied auf den Bedrohungsgrad ausmachen. Während des Transitflugs besitzt der Helikopter eine hohe Geschwindigkeit und Beweglichkeit und ist daher schwieriger zu treffen, da er seinen Flugplan lagebedingt anpassen kann. In diesem Fall hat die Beweglichkeit der verschiedenen feindlichen Einheitentypen einen größeren Einfluss auf den Bedrohungsgrad. Im Bereich der Landezone hingegen verliert der Helikopter diese Vorteile und ist aufgrund des Landevorgangs anfälliger für potentielle Angriffe durch feindliche Einheiten.

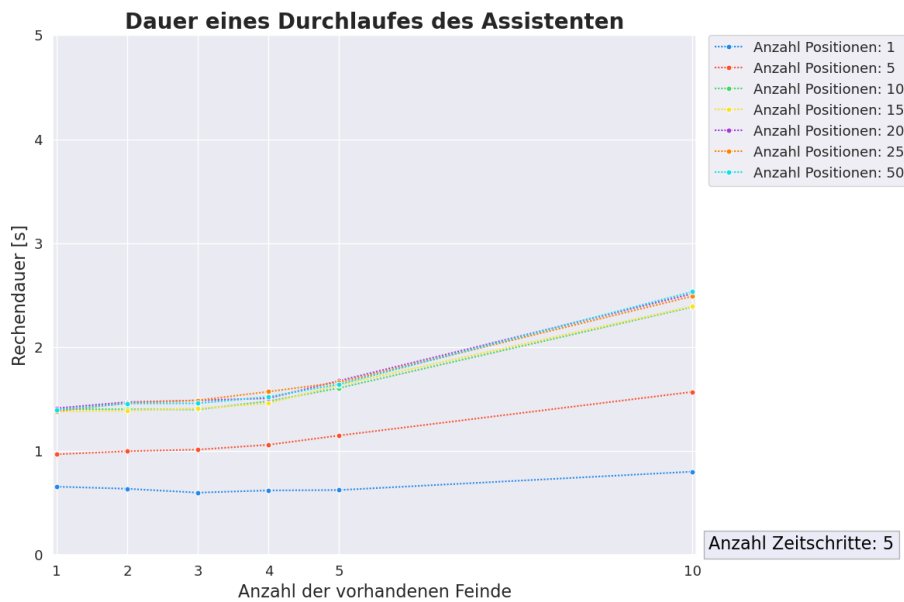
Auch die Eigenschaft, die durch die Tabelle “Ignore Movement” abgebildet wird, wird bei den gegenübergestellten Einheitentypen deutlich. Für die Fälle Fünf bis Sieben ändern sich lediglich jene Daten, die die Bewegung eines militärischen Gegners betreffen. Daher hat bei “Ignore Movement” dies zur Folge, dass die Bedrohungswerte konstant bleiben.

Für die Experimente wurde die *Default static* CPT als Standard festgelegt und ein Mechanismus eingebaut, welcher die CPT durch die *Landing Zone* CPT austauscht, wenn sich der Hubschrauber in einer Entfernung von weniger als 1000m von einer Landezone befindet und sich auf diese zubewegt.

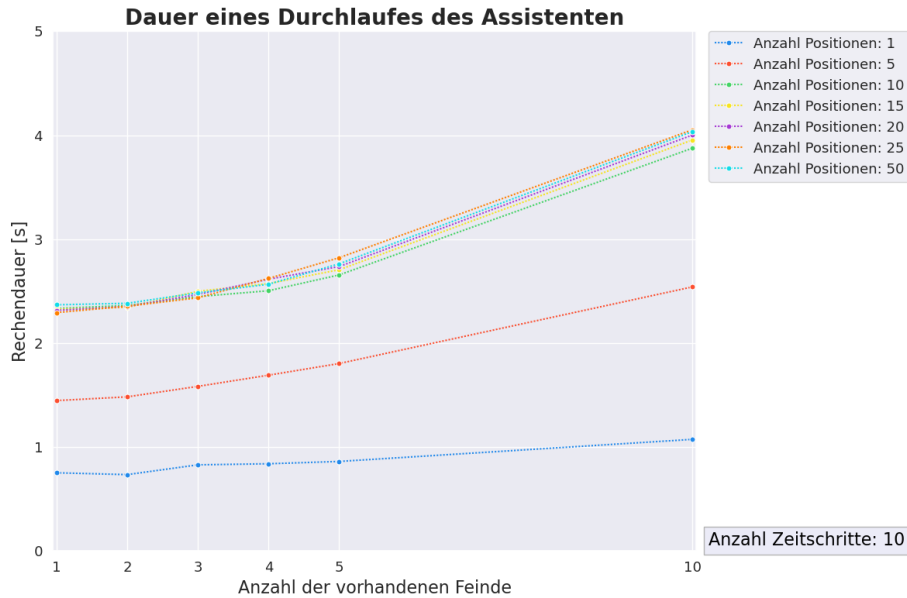
5.1.3.2 Einfluss der Zeitschritte

Um ein Urteil darüber zu fällen, wie viele Zeitschritte der Agent für die Bedrohungsbewertung berücksichtigen soll, müssen zwei Dinge betrachtet werden. Zum einen die resultierende Laufzeit, die sich durch die Verwendung von mehreren Zeitschritten ergibt und zum anderen die sich ergebenden Änderungen im berechneten Bedrohungsgrad. Die Laufzeit für den Durchlauf einer Berechnung muss klein genug sein, um während einer Missionsausführung durchgehend Informationen auswerten und darstellen zu können. Dabei ist die Dauer ausschlaggebend, die das DBN benötigt, um Schlussfolgerungen ziehen zu können, d.h. den Bedrohungsgrad für eine gegebene Einheit bestimmen zu können.

In Abbildung 5-8 ist die Dauer eines Durchlaufs für die Bestimmung der Bedrohungsgrade für alle gegnerischen Einheiten dargestellt. Beeinflusst wird dies durch die Anzahl vorhandener militärischer Gegner, berücksichtigter Referenzpunkte, sowie die gespeicherten Zeitschritte.



(a) Fünf gespeicherte zeitschritte



(b) Zehn gespeicherte Zeitschritte

Abbildung 5-8: Auswertung der Dauer in Sekunden eines Durchlaufs für die Bestimmung der Bedrohungsgrade entsprechend der berücksichtigten Zeitschritte und der Anzahl der militärischen Gegner. Dabei wurde ebenfalls eine unterschiedliche Anzahl an zu berücksichtigten Referenzpunkten betrachtet. Jeder Funktionsverlauf steht repräsentativ für eine andere Anzahl an Referenzpunkten.

Der Vergleich zwischen fünf und zehn gespeicherten Zeitschritten zeigt einen deutlichen Anstieg der Dauer eines kompletten Durchlaufs. Daher sollten nicht unnötig viele Zeitschritte gespeichert werden, sondern nur so viele, bis bei Berücksichtigung von noch weiteren Zeitschritten keine bedeutenden Änderungen mehr hervorgerufen werden. Um diese Anzahl bestimmen zu können, wurde die zeitliche Entwicklung der Bedrohungsgrade für unterschiedliche Anzahlen an Zeitschritten verglichen. Für einen Beispielfall ist dies in Abbildung 5-9 dargestellt.

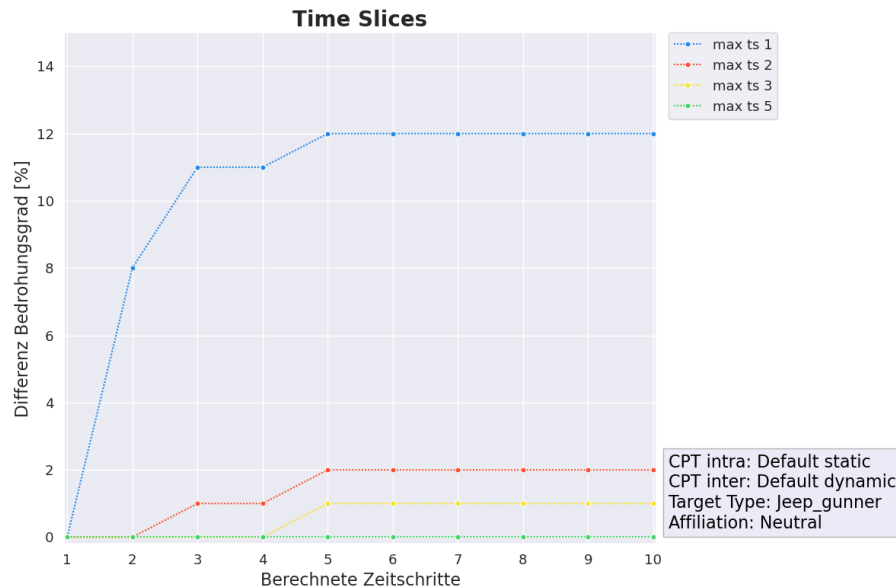


Abbildung 5-9: Differenz des Bedrohungsgrads in Prozent bei unterschiedlicher Anzahl an gespeicherten Zeitschritten für den Einheitentyp “Jeep_Gunner” und der Gesinnung “Neutral”. Die einzelnen Funktionsverläufe geben an, wie viele Zeitschritte gespeichert wurden. Die hier eingezeichneten gestrichelten Linien sollen dabei nur die Entwicklung verdeutlichen. Sie treffen keine Aussage über die Bereiche zwischen den Punkten.

Es ist deutlich zu erkennen, dass es einen großen Unterschied im Bedrohungsgrad zwischen einem (was einem statischen BN entspricht) und mindestens zwei gespeicherten Zeitschritten gibt. Weiterhin ist zu sehen, dass sich bereits bei fünf gespeicherten Zeitschritten keine weitere Veränderung im Bedrohungsgrad bei noch weiteren Zeitschritten ergibt. Dieses Verhalten trifft nicht nur in dem hier gezeigten Beispiel zu, sondern auch auf alle anderen Feindtypen, die das DBN betrachtet. Aus diesem Grund werden nicht mehr als fünf Zeitschritte gespeichert.

5.1.4 Parametrisierung des MDPs zur Bestimmung des taktischen Vorgehens

Das vorgestellte MDP wurde mit unterschiedlichen Parameterwerten und Testfällen technisch ausgewertet und die Resultate miteinander verglichen, um den Einfluss der Werte auf das Verhalten des Agentensystems unter Verwendung des MDPs zu verdeutlichen. Bei einem MDP ist die Wahl der Belohnungswerte ein entscheidender Einflussgeber für die Wahl der Handlungsalternativen. Deswegen wurde der Einfluss unterschiedlicher Belohnungskonfigurationen auf die Strategie des MDPs untersucht. Hierbei wurde der Fokus insbesondere auf die Kosten des Aussendens eines UAVs und die Belohnung für die Reduzierung des Bedrohungsgrades auf der Flugroute gelegt. Diese Variablen wurden deswegen

ausgewählt, weil durch die Kosten für das Aussenden der UAVs unterschiedliche Schätzungen über den Wert der UAVs für die Nutzer abgebildet werden können. Das ermöglicht die Abbildung der Risikobereitschaft, die ein Nutzer bereit ist einzugehen, UAVs (temporär) nicht einsatzfähig zu haben (z.B. durch Bindung an einen Auftrag oder Funk- bzw. Totalverlust aufgrund von Beschuss gegnerischer Einheiten). Über die Belohnung für die Reduzierung des Bedrohungsgrades auf der Flugroute kann wiederum abgebildet werden, wie wichtig es einem Nutzer ist, an einem bestehenden Flugplan festzuhalten.

Die für die Untersuchung gewählten Belohnungskonfigurationen sind in Tabelle 5-3 aufgeführt und deren Einflüsse auf die Strategie in dem visualisierten Graph in Abbildung 5-10 dargestellt. Der Graph zeigt an, in wie vielen möglichen Zuständen die entsprechende Aktion ausgeführt werden sollte. Dabei wurden drei militärische Gegner berücksichtigt, die alle den gleichen Abstand zu dem UAV haben, und der ersten Stufe der gewählten Diskretisierung für die Variable *distance* entspricht (vgl. Kap. 3.4.1.4).

Belohnungskonfiguration	r_{uav}	r_{new}	r_{rec}	r_{thr}
1	-1.0	-6	3	15
2	-0.5	-6	3	15
3	-0.5	-6	3	12
4	-0.5	-6	3	9

Tabelle 5-3: Belohnungskonfigurationen

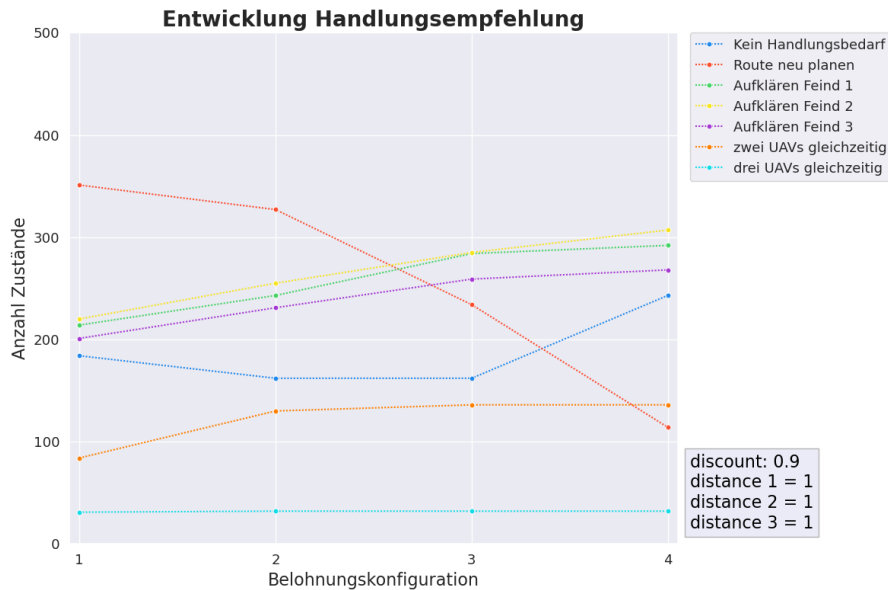


Abbildung 5-10: Entwicklung der Handlungsempfehlungen für unterschiedliche Belohnungskonfigurationen bei einem Diskontierungsfaktor $\gamma = 0.9$. Die Werte distance 1, distance 2, distance 3 geben die Entfernung für den militärischen Gegner 1, 2 bzw. 3 an. Die gestrichelten Verbindungslinien zwischen den Punkten verdeutlichen nur die Entwicklung. Sie treffen keine Aussage über die Bereiche zwischen den berechneten Punkten.

In Abbildung 5-10 ist zu erkennen, dass die Anzahl der Zustände, bei denen militärische Gegner aufgeklärt werden, zunimmt, während die Anzahl der Zustände bei den Aktionen, in denen eine neue Route geplant werden soll, abnimmt. Hier spiegelt sich das Verhalten wider, das mit den geänderten Belohnungswerten in den jeweiligen Konfigurationen abgebildet werden soll.

Neben der Belohnungskonfiguration kann über den Diskontierungsfaktor γ ebenfalls Einfluss auf die Strategie ausgeübt werden. Wie in Kap. 3.6.5 beschrieben, gibt dieser ein Maß dafür an, wie sehr zukünftige Belohnungswerte bei der Entscheidungsfindung berücksichtigt werden sollen. Je kleiner der Diskontierungsfaktor ist, desto unbedeutender werden zukünftige Belohnungswerte und desto genauer entspricht die Strategie in einem Zustand jene Aktion zu wählen, die in der zugehörigen Belohnungsmatrix den höchsten Wert erzielt. Um die Auswirkung des Diskontierungsfaktors zu verdeutlichen wurde die Entwicklung der Handlungsempfehlung für unterschiedliche Diskontierungsfaktoren aufgezeichnet (siehe Abbildung 5-11). Für diesen Vergleich wurde Belohnungskonfiguration 1 herangezogen.

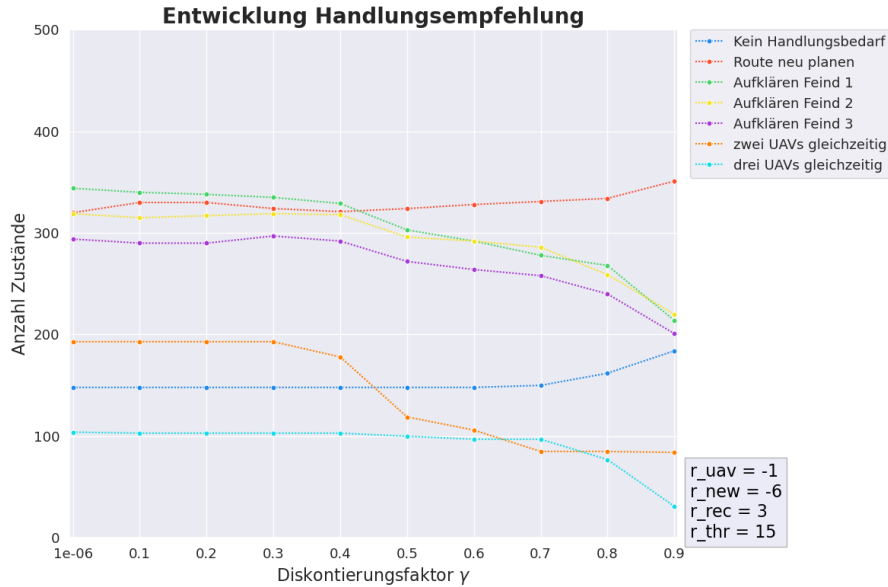


Abbildung 5-11: Entwicklung der Handlungsempfehlung für unterschiedliche Diskontierungsfaktoren γ und der Belohnungskonfiguration 1. Die gestrichelten Verbindungslinien verdeutlichen nur die Entwicklung. Sie treffen keine Aussage über die Bereiche zwischen den markierten Punkten.

Es ist deutlich zu sehen, dass mit steigendem γ die Anzahl der Zustände, bei denen militärische Gegner aufgeklärt werden sollen, abnehmen. Zukünftige Belohnungswerte werden mit zunehmenden γ stärker berücksichtigt. Da sich der Aufklärungswert eines militärischen Gegners über die Zeit aufgrund einer steigenden Unsicherheit und Alter der Aufklärungsdaten erhöht, wenn er nicht aufgeklärt wird. Damit steigt auch die Belohnung für die Reduzierung des Aufklärungswerts, während die Kosten für das Aussenden eines UAVs unverändert bleiben. Das hat zur Folge, dass die Aktion militärische Gegner aufzuklären weniger häufig ausgeführt wird. Dadurch wird verhindert, dass Objekte in kurzen Zeitspannen zu häufig aufgeklärt werden.

Für die Durchführung der Experimente wurde die Belohnungskonfiguration 1 mit einem Diskontierungsfaktor $\gamma = 0.9$ gewählt. Der Grund für diese Entscheidung liegt in der Annahme, dass UAVs als wertvolle Ressource angesehen werden, die zu Aufklärungszwecken genutzt werden sollten, wenn die resultierenden Aufklärungsdaten einen großen Mehrwert bieten. Das wird über einen hohen Diskontierungsfaktor erreicht. Weiterhin wurde angenommen, dass bei einem erhöhten Gefahrenpotential eher die Tendenz zu einer erneuten Routenplanung vorgenommen werden soll, da sowohl der Hubschrauber als auch die UAVs unbewaffnet sind. Deswegen wurde die Belohnungskonfiguration 1 gewählt.

5.2 Kollaborationsanalyse zwischen Piloten und Assistenzsystem

Das in dem Transporthubschraubersimulator des IFS integrierte Agentensystem wurde in einem explorativen Experiment untersucht. Der Untersuchungsgegenstand lag v.a. auf die Nützlichkeit und die generelle Akzeptanz des Agentensystems bei der situativen Einschätzung der Lage und der taktischen Entscheidungsfindung. Ergebnisse davon wurden in [133] veröffentlicht.

5.2.1 Versuchspersonen

An der Experimentalkampagne nahmen zehn Domänenexperten teil. Alle zehn Personen sind männliche (nicht durch absichtlichen Ausschluss, sondern aufgrund der personellen Verfügbarkeit) Helikopterbesatzungen der Bundeswehr. Sie setzten sich zusammen aus einem Marineflieger, einem Flugtestingenieur, zwei Testpiloten, zwei Kampfhubschrauberpiloten und vier Transporthubschrauberpiloten. Die durchschnittliche Flugerfahrung der Probanden beträgt 2485h mit einer Standardabweichung von 1058h.

5.2.2 Versuchsaufbau und Durchführung

Die Simulatorinfrastruktur bietet die Möglichkeit die als Benutzerschnittstelle bedienbaren Bildschirme mitsamt aller Interaktionen als Video aufzuzeichnen. Zusätzlich stehen drei Kameras mit Blick über die Schulter ins Cockpit zur Aufzeichnung zur Verfügung. Darüber hinaus erfolgt auch eine Audioaufzeichnung der Gespräche der Crew (ähnlich eines Cockpit Voice Recorders). Zudem können alle Datenströme im Simulator aufgezeichnet werden, inklusive der Interaktionen der Probanden mit den Benutzerschnittstellen und Systemsteuerelementen, sowie die Bewertungsergebnisse und Entscheidungsfindungen des Agentensystems.

Um den Nutzen des Agentensystems besser bewerten zu können, wurden für das Experiment zwei Konfigurationen gewählt. In der ersten Konfiguration mit der Bezeichnung **ohne TacARA** wurde die komplette Unterstützungsleistung des Agenten ausgeschaltet, d.h. der Proband hatte weder die Möglichkeit manuelle Anfragen an diesen zu stellen, noch wurde er automatisiert unterstützt. In der zweiten Konfiguration mit der Bezeichnung **mit TacARA** wurde die Unterstützungsleistung des Agenten aktiviert. In dieser Konfiguration wurde der Proband durch die automatisierte Assistenz unterstützt und er hatte über zusätzliche Schaltflächen die Möglichkeit Anfragen an den Agenten zu stellen.

5.2.2.1 Missionen

Jeder Proband durchlief mindestens sechs Missionen mit einer jeweiligen Dauer von ca. 8-10 Minuten. Die Missionen bildeten paarweise drei Situationen ab, wobei jedes Paar in den zwei erwähnten

Konfigurationen geflogen wurde. In der ersten Situation war eine Flugroute vorgegeben, in dessen Nähe sich feindliche Aktivitäten während der Missionsausführung ergaben (Missionsbezeichnung *Mission-1-1* bzw. *Mission-1-2*). Diese stellten keine direkte Bedrohung für die Flugroute selbst dar. Die zweite Situation bildet eine Situation ab, in der zu Beginn eine feindliche Einheit mit Bewegungsrichtung bekannt war (Missionsbezeichnung *Mission-2-1* bzw. *Mission-2-2*). Während der Durchführung dieser Missionen wurde dafür gesorgt, dass die gegenwärtige Flugroute von einer gegnerischen Einheit bedroht wird, die entweder durch den Einsatz der UAVs aufgedeckt wurde oder durch einen Intelligence Report bekannt gemacht wurde. In dieser Situation waren die Piloten gezwungen die in dem Briefing kommunizierte Alternativroute zu planen. Diese neue Flugroute musste dann so gelegt werden, dass die zu Beginn bekannte gegnerische Einheit mehr Relevanz erhielt. Die dritte Situation schließlich bildete einen Anflug zu einer Landezone innerhalb eines gefährdeten Gebiets ab (Missionsbezeichnung *Mission-3-1* bzw. *Mission-3-2*). Die Landezone wurde dabei von einer eigenen befreundeten Einheit bewacht, welche sich in einem Gefecht mit drei feindlichen Einheiten befand, die in etwas Entfernung um diese Wacheinheit positioniert waren. Tabelle 5-4 fasst die verwendeten Missionspaare anschaulich zusammen.

Missionspaare	Abgebildete Situation
M-1-1, M-1-2	Aufkommende Feindaktivität ohne direkte Bedrohung der Flugroute
M-2-1, M-2-2	Aufkommende Feindaktivität mit direkter Bedrohung der Flugroute und bekannter feindlicher Bewegung
M-3-1, M-3-2	Annäherung an Landezone in Gefechtssituation

Tabelle 5-4: Abgebildete Situationen in Missionspaare

Die Reihenfolge, in der die sechs Missionen von den Teilnehmern geflogen wurden, war zufällig und variierte von Teilnehmer zu Teilnehmer. Dabei wurde darauf geachtet, dass jede Mission eines Missionspaars gleich oft mit einer entsprechenden Konfiguration geflogen wurde. Bei der Erstellung eines jeden Missionspaars achtete man auf einer ähnlichen topographischen Umgebung, einer ähnlichen Verteilung von historischen Konflikten, sowie einer ähnlichen Länge der Flugrouten und Konstellation der Positionierungen der Einheiten. Alle Missionen hatten gemein, dass ein Flug von einem Start- zu einem Zielort erforderlich war, der durch feindliches Gebiet ging.

Abbildung 5-12 zeigt ein Beispielmissionspaar für *Mission-1-1* und *Mission-1-2*. In ca. 2500 Meter vor dem jeweiligen Dreiecksmarkierungen (CROSS bzw. HAWKE) wurde eine Nachricht bzw. Intelligence Report an das Cockpit gesendet und eine gegnerische Einheit an den roten Markierungen gesetzt, die sich auf einer Straße befanden, welche die Flugroute schneidet. Diese gegnerischen Einheiten werden nach Aufkommen des Intelligence Reports so auf der taktischen Karte platziert, dass der effektive Bedrohungsradius die Route nicht schneidet und diese nicht unmittelbar bedroht wird.

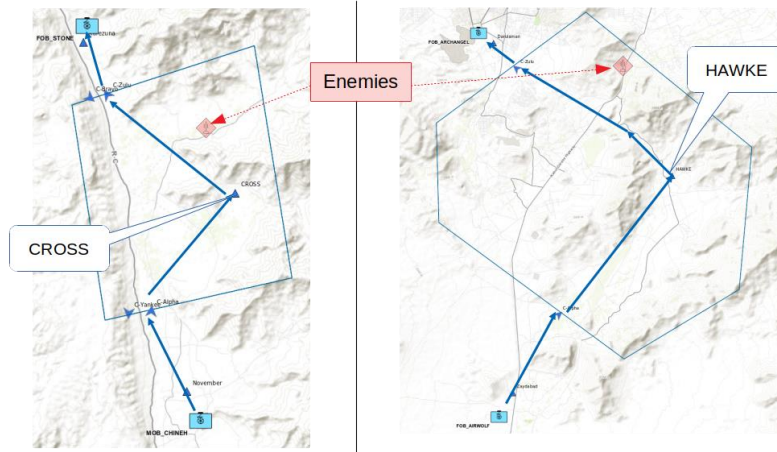


Abbildung 5-12: Beispiel eines Missionspaars. Transparente Feindpositionen zeigen Markierungen an, an denen der Feind erscheint, sobald der Helikopter in ca. 2500 Meter Entfernung zu den jeweiligen Dreiecksmarkierungen (CROSS bzw. HAWKE) ist

In dem Missionspaar zu der Situation, in der der Hubschrauber sich einer Landezone mit Gefecht annähern sollte, wurde die Anzahl der zur Verfügung stehenden UAVs zwischen den Probanden zusätzlich variiert, um die Auswirkungen der Anzahl der UAVs zu untersuchen. Die Anzahl variierte dabei zwischen ein und drei UAVs. Zwei Probanden flogen dabei die Missionen mit einem UAV, vier Probanden standen zwei UAVs zur Verfügung und weitere vier Probanden konnten alle drei UAVs befehlen.

5.2.2.2 Durchführung

Am Tag der Ankunft im Simulator wurden die Probanden in einer kurzen Präsentation von ca. 15min in den Themenkontext MUM-T eingeführt. Außerdem wurden die optischen Messsysteme für die Blickerkennung auf die jeweiligen Probanden kalibriert. Diese Kalibrierung wurde für den Rest der Woche verwendet.

Anschließend fand ein stark auf Eigeninitiative und Spieltrieb der Probanden basierendes, angeleitetes Training im Simulator statt. Fokus des Trainings war zunächst die generelle Systembedienung ausgehend vom händischen Fliegen mit dem Verständnis der Fluginstrumente und Anzeigen über Helikoptermissionsplanung, sowie der Kommandierung der UAVs bis hin zur Interaktion mit dem adaptiven Assistenzsystem mittels Hinweisdialoge. Alle Trainingselemente bestanden aus einem erklärenden Teil, in dem die entsprechenden Aspekte angesprochen wurden, dicht gefolgt von einer geführten Bedienung durch den eigentlichen Probanden selbst. Die Probanden waren angehalten direkt Rückfragen zu stellen und nach eigenem Willen die Systeme zu bedienen, um mit der Funktionsweise besser vertraut werden zu können. Während des Trainings wurden regelmäßige Lernkontrollen mit

Nachbesserungen durchgeführt. Zum Abschluss des Trainingstages waren die Probanden in der Lage eine kurze Übungsmission zunächst mit Unterstützung, dann aber auch vollständig alleine und erfolgreich zu fliegen.

Ergänzend zu dem allgemeinen Training über die Bedienung des Simulators wurde jeder Versuchsteilnehmer weitere *60min* am ersten Tag des Tutoriums, sowie *30min* vor dem Einzelexperimentbeginn in den Folgetagen in die spezielle, zu untersuchende Thematik eingewiesen. Die Einweisung kurz vor dem Einzelexperiment diente dabei als Wiederholung und Festigung der Kenntnisse. Die Probanden konnten hier zu jeder Zeit Fragen stellen, um Unklarheiten zu beseitigen. Auch hier erfolgte das Training interaktiv direkt im Simulator. In dem Training wurden zunächst die manuellen Schaltflächen einzeln erläutert und deren Funktionsweise anhand von Beispielsituation verdeutlicht. Zudem wurde ein kurzer Umriss über die mentalen Fähigkeiten des Agentensystems gegeben, damit die Piloten ein Bild von dessen Arbeitsweise vor Augen hatten. Anschließend wurde die automatisierte Unterstützungsleistung mit den unterschiedlichen Automatisierungsstufen für entsprechende Kritikalitätsstufen anhand von Beispielszenarien vorgestellt und trainiert. Die Probanden konnten dabei in einem Art Sandkastenprinzip die Funktionalitäten ausprobieren und die Effekte der einzelnen Funktionen beobachten und erlernen. Das interaktive Training wurde dabei angeleitet, um sicherzustellen, dass die Funktionen und resultierende Effekte verstanden wurden. Zusätzlich wurde den Teilnehmern anhand eines eingeblendeten PDFs, ebenfalls unter Anleitung, allgemeine Informationen über die eigene Lage und Rolle erläutert, die über alle Missionen hinweg identisch waren. Diese Informationen umfassten zum einen die Hintergrundgeschichte, in dem beschrieben wurde, dass sie Kommandant eines unbewaffneten Transporthubschraubers sind und Missionen im Einsatzgebiet Afghanistan fliegen müssen, wobei ihnen eine bestimmte Anzahl an UAVs zu Aufklärungszwecken zur Verfügung gestellt wird. Zum anderen wurde die generelle Feindlage beschrieben. Zudem wurde die Primäraufgabe zur Absicherung der Flugroute zu dem jeweiligen Missionsziel unter Einsatz der UAVs erläutert, sowie die Forderung möglichst entlang einer geplanten Flugroute zu fliegen, damit das Agentensystem auch einsatzfähig war. Weiterhin wurden die Piloten darauf hingewiesen, dass sie sowohl Missionen mit Agentensystem als auch ohne fliegen werden. Die Probanden wussten zu Beginn jeder Mission in welcher Konfiguration sie diese fliegen mussten.

Die Durchführung eines Einzelexperiments kann in drei Bestandteile gegliedert werden, einer Wiederholung der bereits am Einführungstag vorgestellten und antrainierten Spezialfunktionen, die für die Interaktion mit dem Agenten notwendig waren, der Durchführung des Experiments und einem anschließenden Debriefing, in dem abschließende Fragebögen, sowie die einzelnen Missionsszenarien diskutiert wurden. Eine schematische Darstellung des Ablaufs ist in Abbildung 5-13 visualisiert.

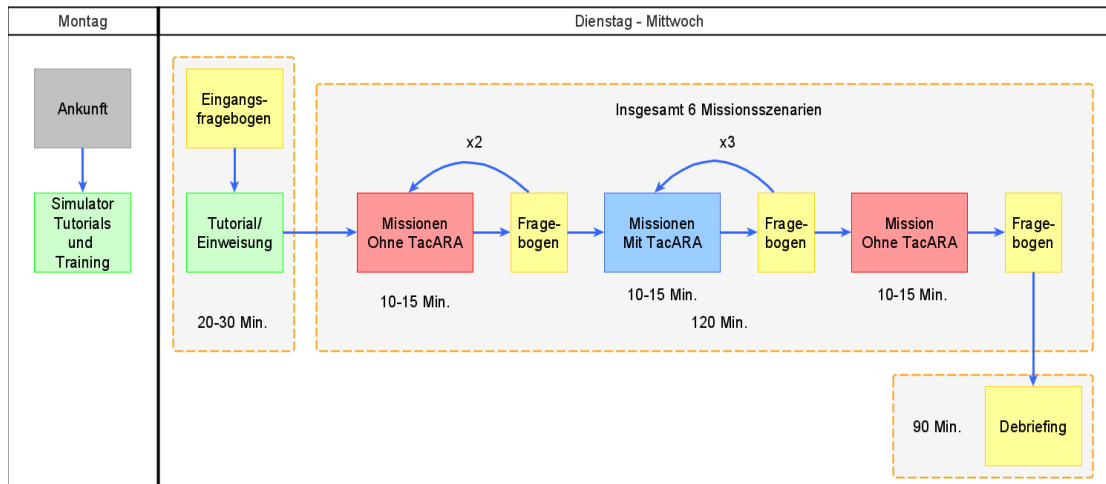


Abbildung 5-13: Schematische Darstellung des Experimentablaufs

Der Experimentblock bestand aus sechs Missionsszenarien, wobei jedes Missionsszenario in drei Phasen unterteilt war. In der ersten Phase wurde dem Probanden im Cockpit ein Briefing zu der aktuellen Mission im PDF-Format eingeblendet. Dieses Briefing enthielt eine Darstellung der taktischen Lage, dem Auftrag, vorgegebene Primär- und mögliche Alternativrouten, sowie die aktuelle Feindlage und historische Konfliktereignisse in Form von gegebenen Datenpunkten. Anschließend wurde die Mission gestartet. Das Briefing konnte sich der Proband dabei jederzeit wieder einblenden lassen, etwa zur Planung potentieller Aufklärungsschwerpunkte. Nach Abschluss eines Missionsszenarios wurde ein Zwischenfragebogen im Cockpit eingeblendet, in dem der Proband über seine Einschätzung und Erfahrung bezogen auf die Missionsdurchführung befragt wurde. Die ersten beiden Missionen und die letzte Mission wurden dabei ohne Agentenunterstützung geflogen, d.h. in der Konfiguration “ohne TacARA”. Die drei Missionen dazwischen wurden mit aktiver Agentenunterstützung geflogen, d.h. in der Konfiguration “mit TacARA”. Um Lerneffekte auszuschließen wurde die Missionsreihenfolge für jeden Probanden variiert, aber stets so, dass die Missionspaare einmal mit und einmal ohne TacARA geflogen wurden.

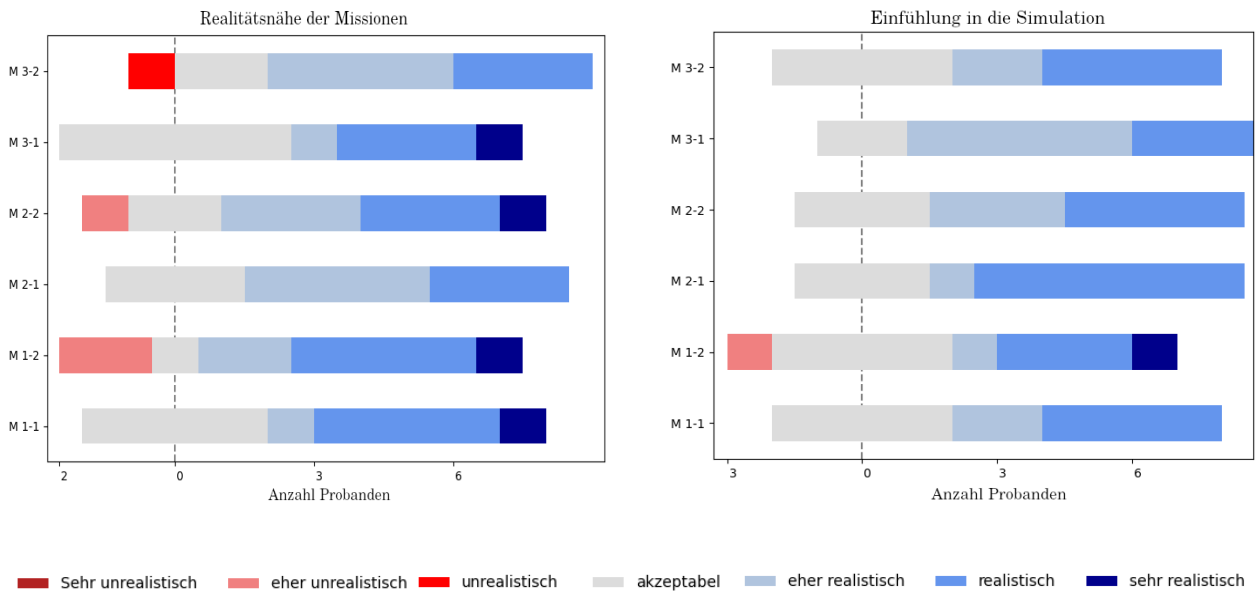
5.2.3 Experimentalergebnisse und Diskussion

Bis auf das Missionspaar, welches die Landezonensituation abbildete wurden alle Missionspaare gleich oft mit den jeweiligen Konfigurationen geflogen. Der Grund für die Abweichung bei diesem Missionspaar war ein Fehler, welcher sich während der Experimentdurchführung ergab. Eine Mission dieses Paares wurde mit der Konfiguration “mit TacARA” unbeabsichtigt einmal mehr geflogen. Allerdings ist dieser Fehler erst im Nachhinein aufgefallen, so dass eine Korrektur nicht mehr möglich war. Die Anzahl der Missionsdurchführungen mit den jeweiligen Konfigurationen ist in Tabelle 5-5 angegeben.

Missions-ID	mit TacARA	ohne TacARA
M-1-1	5	5
M-1-2	5	5
M-2-1	5	5
M-2-2	5	5
M-3-1	6	4
M-3-2	4	6

Tabelle 5-5: Anzahl der geflogenen Konfigurationen pro Mission

Nach jeder Mission wurden die Probanden hinsichtlich der Schwierigkeit und Realitätsnähe der Mission und dem Einfühlen in die Simulation befragt. Alle Missionen wurden überwiegend als realistisch angesehen und die Probanden empfanden auch die Simulation als realistisch (siehe Abbildung 5-14).



(a) Einschätzung zur Realitätsnähe

(b) Einschätzung zum Einfühlen in die Situationen

Abbildung 5-14: Einschätzung der Probanden zur Realitätsnähe der Missionen und zum Einfühlen in die Situationen

Bei der Einschätzung des Schwierigkeitsgrads der Mission gibt es für die Missionen M-2-1 und M-2-2 eine leichte Tendenz hin zu einem höheren Schwierigkeitsgrad im Vergleich zu den anderen Missionen (siehe Abbildung 5-15). Wenn man die Durchschnittsschwierigkeit für jede Mission berechnet, indem man eine Skala von -3 (*sehr schwer*) bis +3 (*sehr leicht*) einführt, so erhält man für die Schwierigkeitsgrade

Durchschnittswerte, die zwischen 0 und 1 liegen (siehe Abbildung 5-15), was den Kategorien *mittel* bzw. *eher leicht* entspricht. Missionen M-1-2, M-2-1 und M-2-2 würden demnach eher zu der Kategorie *mittel* tendieren, während alle anderen zu der Kategorie *eher leicht* einzuordnen sind. Damit sind die Missionen hinsichtlich des geringen Unterschieds beim Schwierigkeitsgrad gut miteinander vergleichbar. Trotzdem sollte man beachten, dass Missionen M-2-2 und M-2-2 tendenziell schwieriger eingeschätzt wurden.

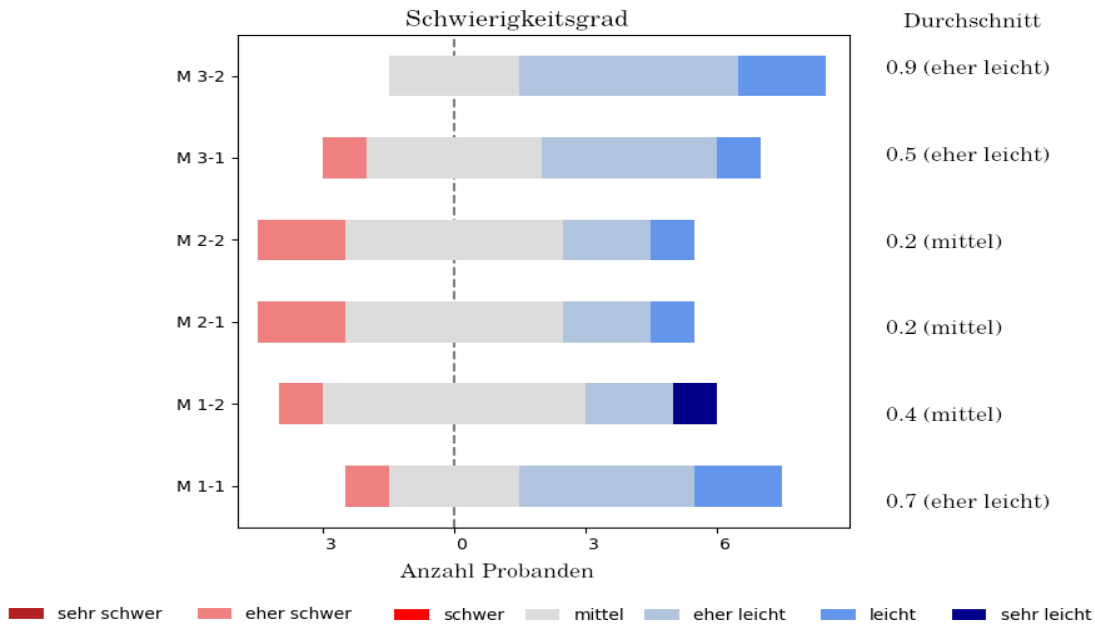


Abbildung 5-15: Einschätzung der Probanden hinsichtlich des Schwierigkeitsgrads der Missionen. Die ermittelte Durchschnittsschwierigkeit pro Mission ist für die verwendete Skala von -3 (sehr schwer) bis +3 (sehr leicht) in der Spalte unter Durchschnitt angegeben

5.2.3.1 Manuelle Anfragen

Die durchschnittlichen manuellen Anfragen, die die Piloten in den Missionen mit der Konfiguration “mit TacARA” tätigten, sind in dem Kuchendiagramm in Abbildung 5-16 abgebildet.

Durchschnittliche Anfragen

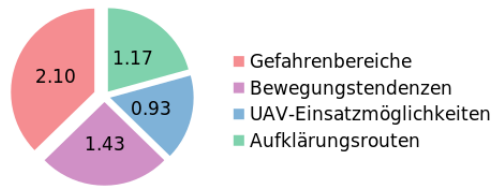
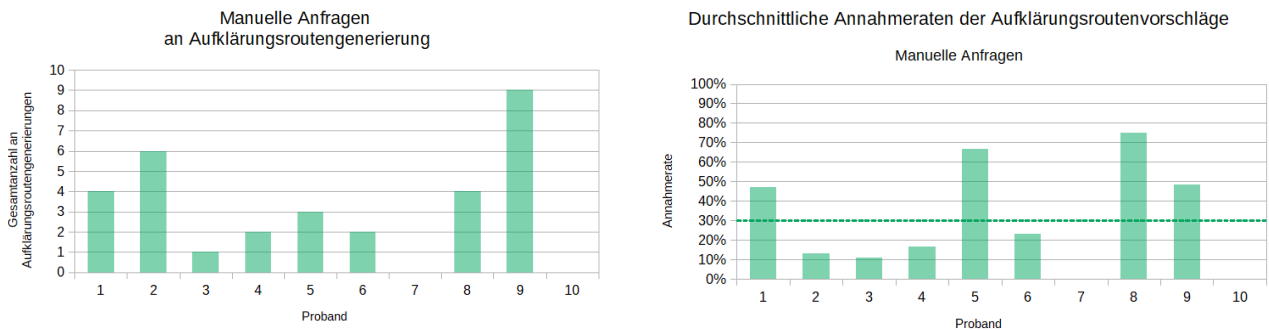


Abbildung 5-16: Durchschnittlich getätigte manuelle Anfragen

Alle Piloten nutzten alle Informationsebenen, um sich ein Situationsbild aufzubauen bzw. um sich die entsprechenden Bereiche auf der Karte hervorzuheben. Die am meist genutzte Informationsebene war die Anzeige der Gefahrenbereiche (HotSpots), gefolgt von der Bewegungstendenzanzeige von bekannten gegnerischen Einheiten im Einsatzgebiet. Die UAV-Anforderungsbereichebene wurde hauptsächlich genutzt, wenn die Piloten Zeit übrig hatten und sich um die Vorausplanung der UAV-Nutzung gekümmert haben. Sie setzten Aufklärungsrouten, die durch die angezeigten UAV-Anforderungsbereiche verliefen, um sich einen Vorrat an zukünftigen Aufklärungsrouten bereitzustellen. Im Durchschnitt wurde das Agentensystem einmal pro Mission angefragt, um Aufklärungsrouten entlang der geplanten Flugroute zu generieren (Aufklärungsrouten). Die meisten Probanden tätigten diese Anfrage zu Beginn der Planung der Mission. Einige setzten diese manuelle Anfrage auch während der Missionsausführung ab, damit sie sich vom System neue Aufklärungsroutenmöglichkeiten aufzeigen lassen konnten. Eine genauere Aufschlüsselung der manuell getätigten Anfragen zur Generierung von Aufklärungsrouten und deren Akzeptanzrate ist in den Diagrammen in Abbildung 5-17 dargestellt.



(a) Anzahl getätigter manueller Anfragen

(b) Durchschnittliche Akzeptanzrate

Abbildung 5-17: Anfragen und Akzeptanzrate zu Aufklärungsrouten

Aus dem Diagramm geht u.a. hervor, dass Proband 7 und Proband 10 in keiner Mission diese Funktion genutzt haben. Durch eine Befragung konnte ermittelt werden, dass Proband 10 diese Funktion aufgrund von mangelndem Training schlicht vergessen hatte und sie deswegen nicht nutzte. Proband 7 hingegen hat sie absichtlich nicht genutzt, da er eigene konkrete Ideen für einen Aufklärungsplan hatte und diese Unterstützung nicht in Anspruch nehmen wollte. Von den vom System vorgeschlagenen Aufklärungsrouten wurden im Durchschnitt ca. 30% akzeptiert. Klammert man Proband 7 und 10 aus dieser Anschauung aus, liegt der Wert sogar bei ca. 37%. Man kann sagen, dass bei den Probanden ungefähr jeder dritte Vorschlag akzeptiert wurde. Es ist zudem deutlich zu erkennen, dass bei vier Probanden (1, 5, 8 und 9) die Akzeptanzrate wesentlich höher lag als bei den anderen Probanden (2, 3, 4, 6, 7 und 10). Abgesehen von den Probanden 7 und 10 lag der Grund hierfür u.a. daran, dass die Piloten unterschiedliche Herangehensweisen bei der Planung der Aufklärung hatten. Proband 2 beispielsweise hat zwar mehrere Anfragen gestellt, bevorzugte aber eher länger Routenstücke für die Aufklärung und lehnte daher Vorschläge ab, die kurze Wegstücke anboten. Proband 9 wiederum stellte ebenfalls öfters Anfragen zur Generierung von Routenvorschlägen, akzeptierte allerdings wesentlich mehr, um sich einen "Vorrat" an Aufklärungsschwerpunkten auf der Karte zu hinterlegen. Proband 3 und 4 dagegen planten ihre Aufklärungsschwerpunkte abschnittsweise entlang der Route. Ihr Fokus lag während der Planungsphase zu Beginn einer jeden Mission auf den Teil der Helikopterroute, welcher sich am Anfang des Einsatzgebiets befand. Daher hatten sie bei Anfragen nur Aufklärungsziele akzeptiert, die sich auch auf diesen Bereich bezogen. Waren sie bereits im Flug und näherten sich dem nächsten Abschnitt an, haben sie die restlichen Aufklärungsschwerpunkte manuell gesetzt.

5.2.3.2 Automatisierte Unterstützung

Eine wesentlich höhere Akzeptanzrate wurde bei den Vorschlägen der automatisierten Unterstützungsstufen erreicht. Diese umfassten neben den Aufklärungsroutenvorschlägen ebenso UAV-Auftragsvergaben. In der Konfiguration "mit TacARA" traten über alle Probanden hinweg insgesamt 125 Assistenzsituationen auf, wobei sich 80 auf eine HotSpot Situation bezogen haben, 29 auf Bewegungstendenzen von Feinden, 8 auf die Positionierung der UAVs und 8 auf eine Annäherung an eine Landezone. Tabelle 5-6 zeigt die Anzahl der Dialoge, die das Assistenzsystem auf Grundlage der situativen Bedingung an den Piloten leitete und entsprechende Unterstützung anbot.

Unterstützungsstufe	Hot Spot	Movement	Demand Spots	Landing Site
Level 1	26	6	8	5
Level 2	0	0	0	3
Level 3	54	22	—	0
Gesamt	80	29	8	8

Tabelle 5-6: Anzahl der aufgetretenen Unterstützungsstufen

In vielen der eingeblendeten Dialoge hatten die Probanden die Möglichkeit die nächst höhere Automationsstufe manuell anzufragen. Die Raten der Anforderung höherer Unterstützungsstufe und die Akzeptanzraten der Vorschläge pro Probanden sind in den Diagrammen in Abbildung 5-18 dargestellt.

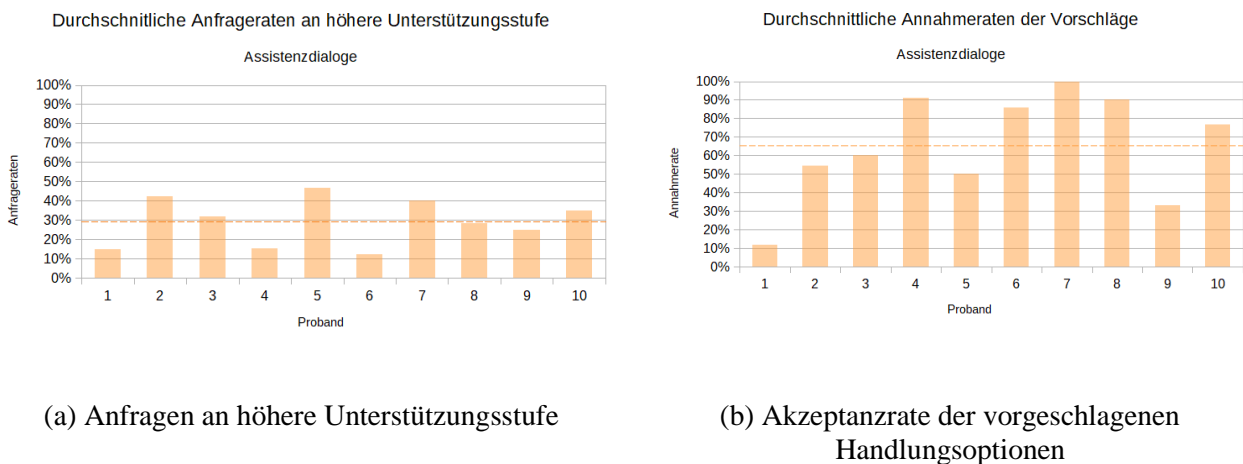


Abbildung 5-18: Prozentualer Anteil der Anfragen an höhere Unterstützungsstufe und der Akzeptanz vorgeschlagener Handlungsoptionen

Hier betrug die durchschnittliche Akzeptanzrate ca. 65.32%, d.h. fast jeder zweite Vorschlag wurde akzeptiert. Im Schnitt haben die Probanden mit ca. 29.20% eine höhere Automationsstufe angefragt. Bei Proband 1, 5 und 9 sind die Akzeptanzraten im Vergleich am niedrigsten. Bei Proband 1 lag dies u.a. daran, dass hier zu Beginn des Experiments noch ein Fehler in der Implementierung vorlag, welcher dazu geführt hat, dass viele Dialoge ausgelöst wurden. Das trieb die Ablehnungsrate bei diesem Probanden nach oben.

Man erkennt auch hier einige Unterschiede zwischen den Probanden. Wie auch bei den manuellen Anfragen lag das u.a. an persönlichen Präferenzen und der individuellen taktischen Vorgehensweise. Betrachtet man sich die Anzahl der getätigten Anfragen und Akzeptanzraten bei den Probanden 1, 2 und 9 (siehe Abbildung 5-17), sieht man, dass diese Probanden relativ viele manuelle Anfragen an das System

gestellt haben, insbesondere Proband 9. Das spricht dafür, dass diese Probanden den Agenten häufig als Planungswerkzeug genutzt haben. Die Akzeptanzrate der automatisch erzeugten Vorschläge durch das Assistenzsystem liegt bei Proband 1 und 9 weit unter dem Durchschnitt. Das deutet eher an, dass diese Probanden die Kontrolle über die taktische Planung selbst übernehmen wollten oder dem Agenten nicht das nötige Vertrauen entgegenbringen konnten bzw. mit dessen Vorschlägen nicht einverstanden waren. Sie nutzten das Agentensystem lediglich als Planungsunterstützung zu Beginn der Missionen zur Umsetzung ihres Plans. Anders verhält es sich bei Proband 4, 6 und 10. Bei diesen Probanden war die Akzeptanzrate bei manuellen Anfragen zwar gering ausgeprägt, dafür lag die Akzeptanzrate der automatisiert ausgelösten Vorschläge über dem Durchschnitt. Bei Proband 2 und 8 waren beide Akzeptanzraten eher hoch, d.h. sie haben sowohl eigene Überlegungen umgesetzt als auch die Vorschläge des Assistenzsystems akzeptiert. Ein weiterer Einflussfaktor bei den Akzeptanzraten der Vorschläge war die taktische Verwendung der UAVs. Vor allem Proband 9 wollte mindestens ein UAV in der Nähe des Helikopters halten, um es für etwaige Notfälle als Reserve zur Verfügung zu haben. Andere Probanden hingegen haben Vorschläge akzeptiert, sogar, wenn sie nicht der Ansicht waren, dass sie notwendig waren. Ihre Überlegung war, UAVs durch den Agenten beschäftigen zu lassen, wenn sie gegenwärtig keine Verwendung für diese hatten. Es gab auch einige Fälle, in denen die Vorschläge mit den Absichten des Piloten übereinstimmten und sie dadurch an Effizienz gewannen.

5.2.3.3 UAV-Aufklärung

Betrachtet man die Anzahl der vergebenen Aufträge über alle Missionen hinweg, stellt man fest, dass die Probanden tendenziell mehr Aufklärungsaufträge an die UAVs vergeben haben, wenn TacARA aktiv war (siehe Abbildung 5-19). Proband 7, 8 und 9 haben dazu mehr Transitaufträge erteilt, während bei den anderen Teilnehmern eher mehr Transitaufträge erteilt wurden, wenn TacARA ausgeschaltet war.

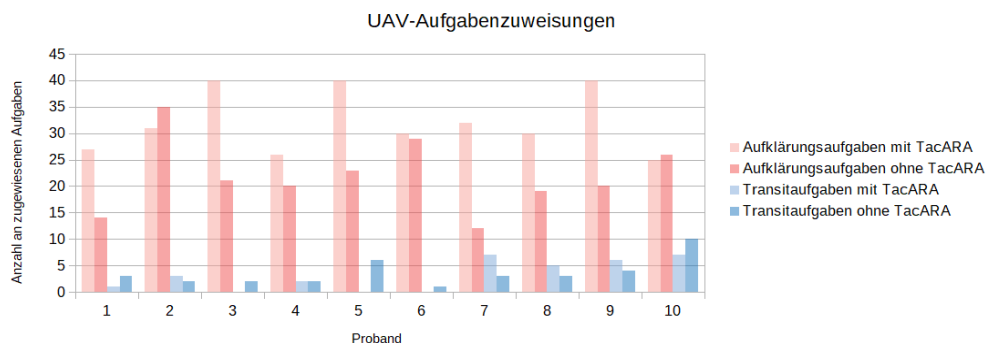


Abbildung 5-19: Anzahl der vergebenen Aufklärungs- und Transitaufgaben an die UAVs in den jeweiligen Konfigurationen

Dies hatte eine intensivere Aufklärung zur Folge, die in gewissen Fällen über alle Probanden hinweg auch eine breitere Fläche abgedeckt hat, wenn TacARA aktiv war. Es ergaben sich auch gewisse Unterschiede in dem generellen Aufklärungsmuster für die Missionen der zwei Konfigurationen. In den nachfolgenden Abbildungen werden die Aufklärungsflächen der einzelnen Probanden für jede Mission übereinandergelegt und beide Konfigurationen gegenübergestellt. Aufgeklärte Flächen werden in grüner Farbe dargestellt. Je höher die Deckkraft dabei ist, desto öfter wurde diese Fläche von den Probanden auch aufgeklärt.

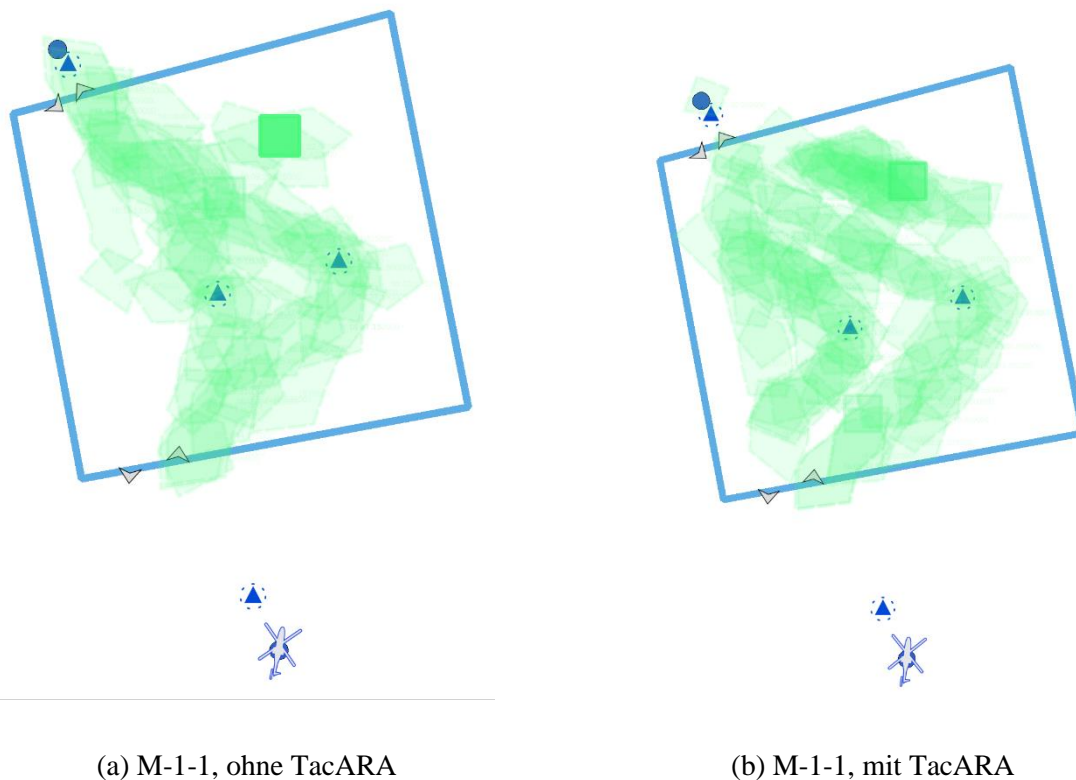
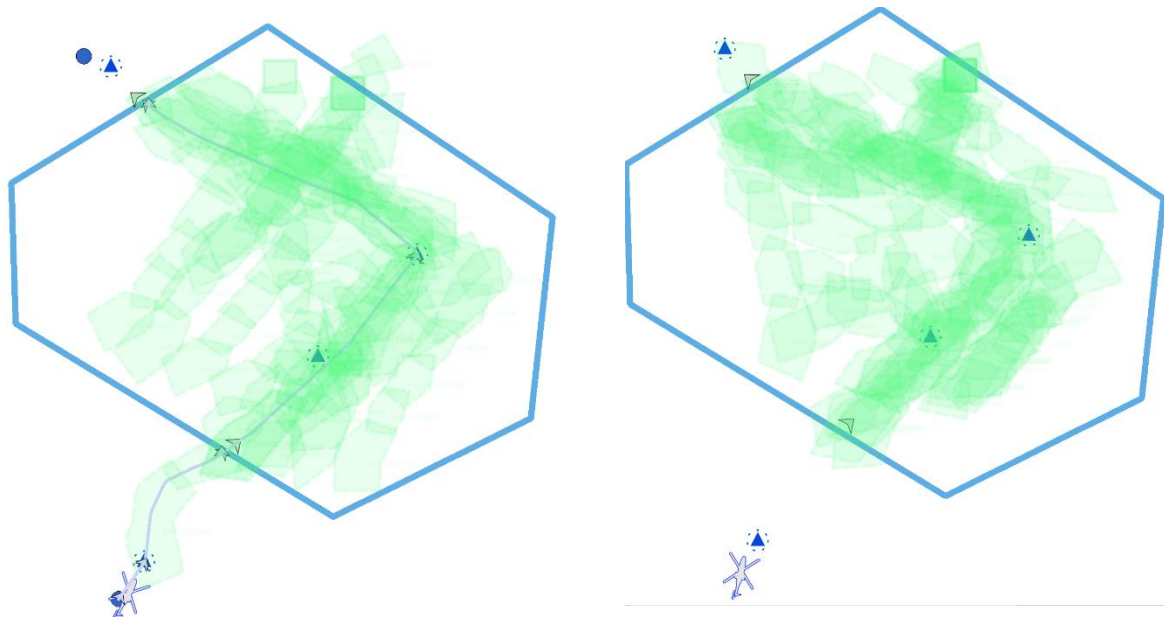


Abbildung 5-20: Aufklärungsflächen in Missionssituation M-1-1

Die rechteckige Fläche rechts oben in Abbildung 5-20 (a) stellt kein konkreten Aufklärungsbefehl dar, sondern repräsentiert eine durch den Piloten manuelle Ausrichtung der Kamera auf den Mittelpunkt dieses Rechtecks. Für diese Operation wird in der Simulation kein Foto von der Umgebung gemacht und es existiert deswegen in den aufgezeichneten Daten kein Aufklärungsteppich. Um diese manuelle Betrachtung durch den Piloten darzustellen, wurde um den vom Piloten gewählten Zentrumspunkt ein Rechteck mit der angenäherten Größe der Abdeckung durch die Kamera des UAVs eingezeichnet. Auf diese Weise können manuell betrachtete Videoausschnitte durch den Piloten mitberücksichtigt werden. Man kann bereits hier gut erkennen, dass sich die Aufklärungsfläche im Einsatzgebiet mit aktiver TacARA vergrößert hat,

insbesondere um den Bereich, in dem während der Missionsausführung eine gegnerische Einheit aufgetaucht ist.

Ähnliches Verhalten lässt sich in Mission M-1-2 beobachten (siehe Abbildung 5-21).



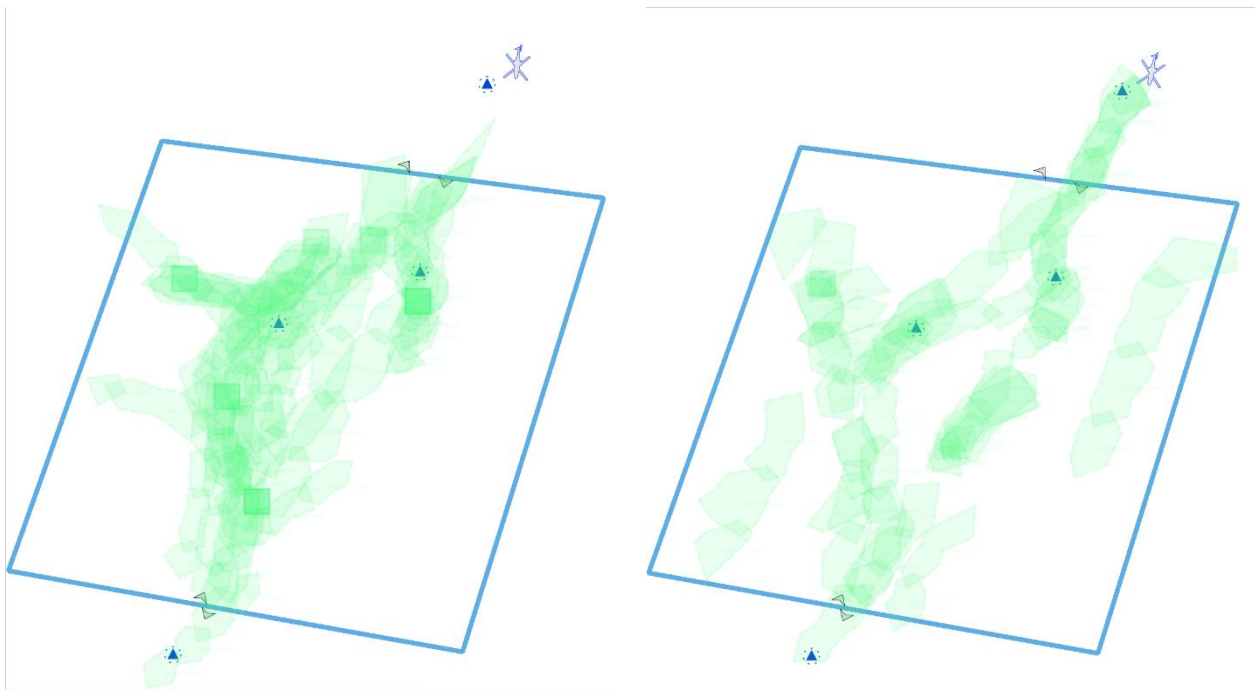
(a) M-1-2, ohne TacARA

(b) M-1-2, mit TacARA

Abbildung 5-21: Aufklärungsflächen in Missionssituation M-1-2

Auch hier ist gut zu erkennen, dass sich die Aufklärung um die Position des aufkommenden Gegners intensiviert hat, wenn TacARA aktiv war. Zudem wurden bei aktiver TacARA öfter eine Aufklärung um die Primärroute liegenden Flanken unternommen. Generell ist auch hier eine größere Fläche des Einsatzgebiets aufgeklärt worden.

Ein anderes Verhalten ist in dem Missionspaar M-2-1, M-2-2 zu beobachten (siehe Abbildung 5-22 bzw. Abbildung 5-23).



(a) M-2-1, ohne TacARA

(b) M-2-1, mit TacARA

Abbildung 5-22: Aufklärungsflächen in Missionssituation M-2-1

Im Vergleich zu den anderen Missionen wurde hier eine Aufklärung um den bekannten und aufkommenden Gegner intensiver betrieben als bei aktiver TacARA, insbesondere auch entlang der Alternativroute, die gewählt werden musste, nachdem der aufkommende Gegner die Primärroute blockiert hatte. Während man sich bei der Konfiguration “ohne TacARA” eher auf mögliche Annäherungswege des Gegners hin zur Route fokussiert hat, hatte man bei der Konfiguration “mit TacARA” den Fokus eher am Feind und direkt um die Alternativroute. Zu erklären ist das unterschiedliche Verhalten mit der zusätzlichen Fähigkeit sich Bewegungstendenzen des Feindes einblenden zu lassen. Dies hatte einen Einfluss auf die Vergabe von Aufklärungsaufträgen an die UAVs.

Ein interessanter Aspekt in Mission M-2-2 ist, dass in der Konfiguration “ohne TacARA” eine intensivere Aufklärung entlang einer durch das Missionsgebiet verlaufende Hauptstraße durchgeführt wurde. In der Konfiguration “mit TacARA” hingegen gibt es eine breite Streuung bzgl. der Aufklärungsflächen (siehe Abbildung 5-23).

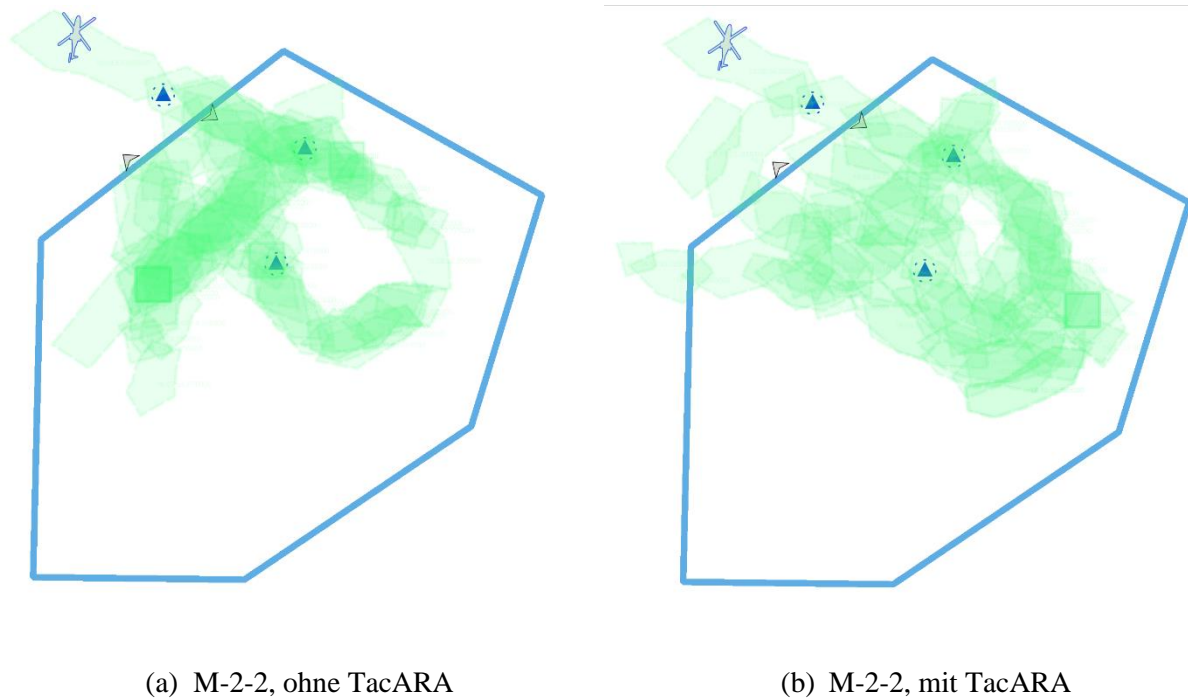


Abbildung 5-23: Aufklärungsflächen in Missionssituation M-2-2

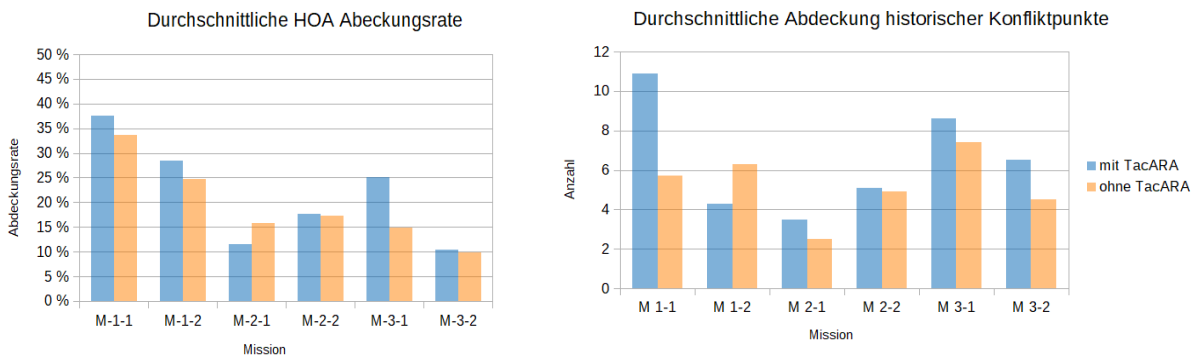
Hierzu ist anzumerken, dass TacARA Straßen nicht als spezielles taktisches Element bei den Vorschlägen von Aufklärungszielen berücksichtigt. Zudem hatte bei der Konfiguration “mit TacARA” auch hier die Visualisierungsoption der möglichen feindlichen Bewegungstendenz maßgeblichen Einfluss auf den UAV-Einsatz. Dieser Effekt ist bei Mission M-1-1 nicht aufgetreten, was vermutlich daran liegt, dass durch das Aufkommen des Gegners keine Routenänderung unmittelbar erforderlich war und es nur wenig Ausweichmöglichkeiten gegeben hat, der Gegner aber dennoch eine Gefahr für die Route darstellte.

Obwohl ein Übereinanderlegen der Aufklärungsteppiche bei den unterschiedlichen Herangehensweisen der Probanden aufgrund persönlicher Präferenzen und taktischem Vorgehen schwierig ist, um einen validen Vergleich zwischen den Konfigurationen zu machen, zeigen sich dennoch interessante Tendenzen bei der Setzung von Aufklärungsschwerpunkten. Es lässt sich durchaus schlussfolgern, dass TacARA in gewissen Situationen die Aufklärungstaktik beeinflusst hat.

Das kann man auch bei den Missionen zur Landezonenaufklärung erkennen (M-3-1 und M-3-2). Hier wurde zusätzlich die Anzahl der UAVs variiert. Je zwei Probanden hatten für die Mission bei beiden Konfigurationen ein, zwei bzw. alle drei UAVs zur Verfügung. Bei den Betrachtungen kam allerdings noch ein weiterer interessanter Aspekt hinzu. Potentielle Aufklärungsziele wurden durch die Piloten in Abhängigkeit der zur Verfügung stehenden UAVs priorisiert. Hatten die Probanden nur ein UAV zur Verfügung, so beschränkte sich die Aufklärung überwiegend auf die gegnerischen Einheiten, während bei

zwei oder drei UAVs auch andere Aufklärungsziele aufgeklärt wurden, um den Anflug zur Landezone abzusichern.

Tendenziell wurde in der Konfiguration “mit TacARA” prozentual mehr Fläche des Missionsgebiets aufgeklärt als in der Konfiguration “ohne TacARA” (siehe Abbildung 5-24 (a)). Einzige Ausnahme bildet hierbei die Mission M-2-1. Um ein Maß für die Effektivität der Aufklärung zu erlangen wurde die Anzahl der historischen Konflikte, die durch die UAVs aufgeklärt wurden, bestimmt. Hierbei wurden die historischen Konflikte in Betracht gezogen, die sich in einem bestimmten Abstand zur Hubschrauberflugroute befanden. Wenn sich die Flugroute während der Missionsausführung geändert hat, wurden entsprechend jene historische Konfliktpunkte mit dazugezählt, die daraufhin die nächst gelegenen waren. Die Durchschnittswerte für die jeweilige Konfigurationen sind in Abbildung 5-24 (b) dargestellt.



(a) Durchschnittliche Abdeckung der Fläche innerhalb des Missionsgebiets

(b) Durchschnittliche Abdeckung historischer Konfliktpunkte

Abbildung 5-24: Vergleich Aufklärungen durch UAVs in den verschiedenen Missionen mit und ohne TacARA

Es ist klar zu erkennen, dass mit aktiver Unterstützung durch den Agenten im Durchschnitt mehr historische Konfliktpotentiale abgedeckt wurden. Die einzige Ausnahme ist Mission M 1-2. Der Grund hierfür lag in diesem speziellen Fall darin, dass sich in dieser Mission eine Hauptstraße befindet, entlang derer die Piloten manuelle Aufklärungsrouten gesetzt haben und daher historische Konflikte abgedeckt haben, die sich in der Nähe der Primärroute befanden. Diese Konflikte wurden nicht durch die Vorschläge von Aufklärungsrouten des Agenten abgedeckt. Man muss bei der Betrachtung der abgedeckten historischen Konfliktpunkte berücksichtigen, dass die Kategorie der historischen Konflikte bei der Wichtigkeit von Aufklärungszielen nach Einschätzung der Piloten eine eher untergeordnete Rolle spielt und stark von dem Alter der Daten abhängig ist. Ältere Konflikte sind weniger wichtig als jüngere. Allerdings würde der

Einsatz eines Assistenzsystems wohl dafür sorgen, dass die Abdeckung von vergangenen Konflikten höher ausfällt.

5.2.3.4 Nutzereinschätzungen

Die Probanden wurden im Nachgang zu der Nützlichkeit der durch das Agentensystem bereitgestellten Funktionalitäten befragt, um ein subjektives Empfinden bezüglich der Erfahrung mit dem System zu erlangen. Dazu wurden die Probanden nach jedem Missionsszenario gefragt, wie hoch sie ihre persönliche mentale Auslastung einschätzen. Dafür wurde die Bedford Bewertungsskala verwendet [134] (siehe Abbildung 5-25).

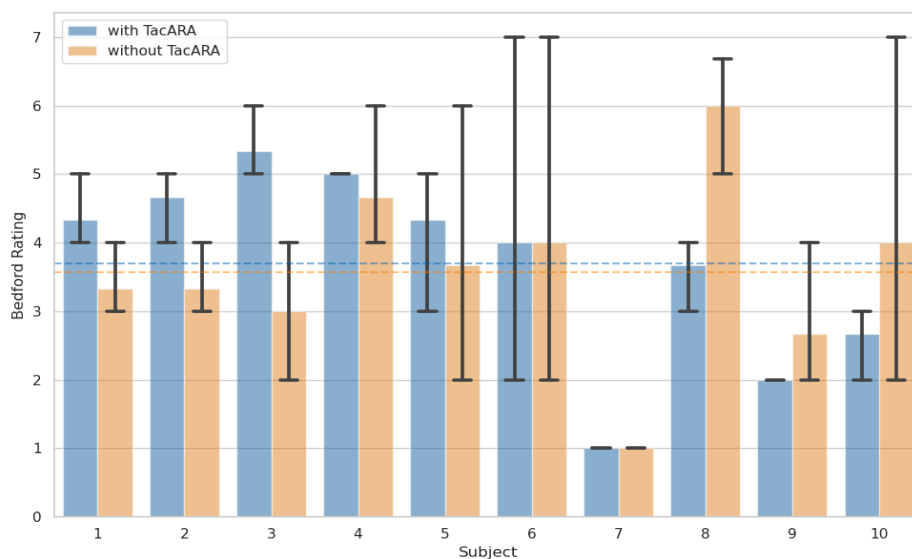


Abbildung 5-25: Auswertung der Bedfordbewertungen pro Probanden und geflogener Konfiguration.

Die Durchschnittswerte für die Konfigurationen über alle Probanden hinweg sind als gestrichelte Linien eingezeichnet. Für drei Probanden (Proband 8, 9, 10) war die subjektive Einschätzung der mentalen Auslastung sogar niedriger, wenn sie das Agentensystem genutzt haben. Bei zwei Probanden (Proband 6, 7) war die Einschätzung der mentalen Auslastung gleich in beiden Konfigurationen. Im Durchschnitt ergibt sich hier eine leicht höhere mentale Belastung, wenn das Agentensystem aktiv war. Allerdings ist der Unterschied zu der Konfiguration, in der das Agentensystem ausgeschaltet war, marginal. Daraus lässt sich schließen, dass die Nutzung des Agentensystems nur zu einem geringen Anteil zu einer höheren Beanspruchung geführt haben könnte und daher keinen signifikanten Anstieg an mentaler Aufmerksamkeit seitens des Piloten erforderlich war. Die Probanden konnten demnach mit dem Agentensystem arbeiten ohne eine erhöhte mentale Auslastung zu erfahren.

Um den Einfluss der Benutzerfreundlichkeit zu untersuchen, wurde die System Usability Scale (SUS) angewendet. Sie wurde von John Brooke [135] entwickelt. Es ist eine etablierte Methode zur quantitativen Analyse der Gebrauchstauglichkeit eines Systems mittels eines einfachen Fragebogens bestehend aus 10 Fragen, die mit einer Likert-Skala, d.h. einer Bewertungsskala, deren Antwortoptionen vorgegeben sind, beantwortet werden. Die Fragen bestehen aus 5 positiv und 5 negativ formulierten Fragen. Um den SUS-Wert zu berechnen werden die Werte der positiv formulierten Fragen aufsummiert und 5 abgezogen. Die Werte der negativ formulierten Fragen werden ebenfalls aufsummiert und deren Summe von 25 abgezogen. Anschließend werden beide Resultate addiert und mit 2.5 multipliziert. Das Resultat ergibt einen Wert zwischen 0 und 100. Forschungsstudien haben gezeigt, dass der Durchschnittswert bei 68 liegt. Wenn der Wert unter diesem Schwellwert liegt, gibt es eine höhere Wahrscheinlichkeit, dass die Usability des Systems Mängel aufweist. Die Ergebnisse des Fragebogens sind in Abbildung 5-26 dargestellt.

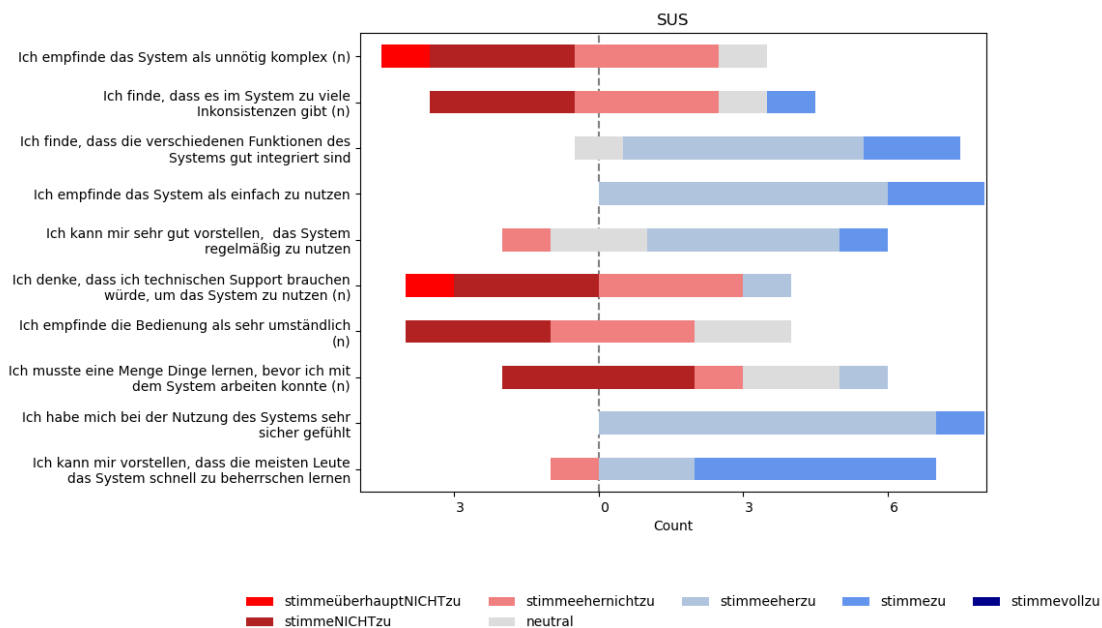


Abbildung 5-26: SUS-Auswertung. Negativ formulierte Fragen sind mit einem '(n)' gekennzeichnet.

Der resultierende SUS-Wert ist 68.958 und liegt damit etwas oberhalb des Durchschnitts. Das bedeutet, dass es bei der Benutzerfreundlichkeit des Systems zwar Verbesserungspotential gibt, trotzdem keine größeren Probleme aufweist. Daraus lässt sich schließen, dass die Gestaltung der Benutzeroberfläche keinen negativen Einfluss auf das Nutzererlebnis hat.

Weiterhin wurde ein modifizierter Fragebogen zur intuitiven Interaktion verwendet, um das Nutzererleben mit dem System abzufragen [136]. Der Fragebogen zur intuitiven Interaktion untersucht die Subkomponenten **Mühelosigkeit**, **Bauchgefühl**, **Verbalisierungsfähigkeit** und **Magisches Erlebnis**. Die

Ausprägungen auf diesen vier Komponenten charakterisieren allgemein ein Produkt bezogen auf dessen Intuitivität. Dieser Fragebogen gibt allerdings keinen Skalenwert aus, bei dem ein hoher Wert gleichzusetzen ist mit einer guten Nutzerfreundlichkeit, wie es in vielen anderen Usability-Fragebögen zu finden ist. Es liegt in der Interpretation des Anwenders, um festzustellen, ob die jeweiligen Ausprägungen der Komponenten das gewünschte Nutzererlebnis abbilden. Die Auswertung des INTUI-Fragebogens ist in Anhang C.6 in Abbildung B-6-2, Abbildung C-6-3 und Abbildung C-6-4 abgebildet.

Zu der Komponente der **Mühe** zählen die Antwortpaare 'fiel mir leicht vs. fiel mir schwer', 'war einfach vs. war schwer', 'war sehr intuitiv vs. war gar nicht intuitiv', 'erforderte viel Aufmerksamkeit vs. ging wie von selbst', 'erreichte ich mein Ziel nur mit Anstrengung vs. erreichte ich mein Ziel mit Leichtigkeit' und 'war ich orientierungslos vs. konnte ich mich gut zurechtfinden'. Es zeigt sich, dass die Probanden überwiegend ohne viel Mühe mit dem System zurechtgekommen sind. In einigen Fällen gab es Ausreißer (z.B. ein Proband tendierte eher zu 'fiel mir schwer', 'erforderte viel Aufmerksamkeit' und 'erreichte ich mein Ziel nur mit Anstrengung'), doch ist dies eher die Ausnahme und lässt sich u.a. mit Fehlern, die während der Ausführung der Mission aufgetreten sind erklären.

Die zweite Komponente, **Bauchgefühl**, wird durch die Antwortpaare 'ließ ich mich von meinem Verstand leiten vs. ließ ich mich von meinem Gefühl leiten', 'handelte ich überlegt vs. handelte ich spontan', 'handelte ich ohne dabei nachzudenken vs. konnte ich jeden Schritt genau begründen' und 'handelte ich unbewusst vs. handelte ich bewusst' abgedeckt. Hier zeigt sich eine Tendenz dahin, dass die Probanden sehr bewusst handelten und sich eher von ihrem Verstand leiten ließen als durch ihr Bauchgefühl. Dies spricht zwar auf dem ersten Blick gegen eine intuitive Nutzung, da eine intuitive Interaktion typischerweise dadurch gekennzeichnet ist, dass sie eher durch Gefühle geleitet wird als durch den Verstand, allerdings mussten die Probanden taktische Entscheidungen fällen, was durchaus kognitive Leistung erfordert. Die Auswertung zeigt damit, dass die Probanden sich nicht blind auf das System verlassen haben, sondern die Vorschläge und Empfehlungen bewusst wahrgenommen und eigene Überlegungen angestellt haben.

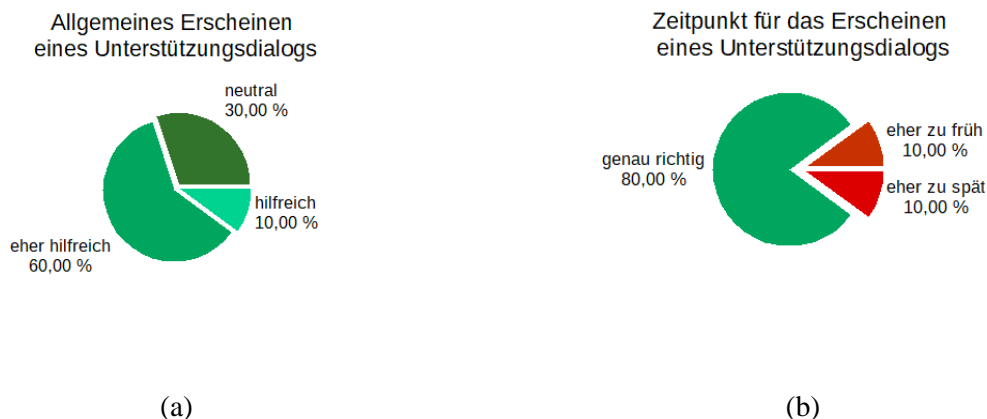
Die Komponente **Magisches Erlebnis** wird durch die Antwortpaare 'war belanglos vs. war mitreißend', 'war faszinierend vs. war trist', 'war nichts Besonderes vs. war ein magisches Erlebnis', 'war begeisternd vs. war unbedeutend' abgedeckt. Eine intuitive Interaktion wird meistens als eine magische Erfahrung wahrgenommen, d.h. die Probanden erfahren eine große Begeisterung bei der Nutzung des Systems. In dieser Komponente gibt es zwar keinen großen Ausschlag, doch die Tendenz zeigt bei der Betrachtung der Antwortpaare in die Richtung eines solchen Erlebnisses. Dies zeigt die positive Einstellung der Probanden gegenüber dem Erleben des Systems.

Bei der letzten Komponente, **der Verbalisierung**, gibt es eine größere Streuung der Probanden. Diese Komponente wird durch die Antwortpaare 'kann ich nicht sagen, auf welche Art und Weise ich das

System bedient habe vs. kann ich genau sagen, auf welche Art und Weise ich das System bedient habe’, ’kann ich mich gut an die Bedienung erinnern vs. kann ich mich schwer an die Bedienung erinnern’ und ’kann ich die Bedienschritte leicht beschreiben vs. kann ich die Bedienschritte schwer beschreiben’ abgebildet. Bei einer intuitiven Interaktion sind Nutzer manchmal nicht in der Lage einzelne Entscheidungen und Bedienschritte zu erklären. Dies trifft auf einige Probanden zu. Größere Tendenz gibt es in die Richtung, dass die Probanden sich sehr wohl an die Bedienschritte erinnerten und wie sie das System genutzt haben. Das bestätigt wiederum die bewusste Handhabung des Systems.

Der Fragebogen wurde zusätzlich um die Antwortpaare ’war ich zufrieden vs. war ich frustriert’, ’hat sich meine Effizienz erhöht vs. hat sich meine Effizienz verringert’, ’hat sich meine Produktivität erhöht vs. hat sich meine Produktivität verringert’, ’habe ich die UI gerne bedient vs. habe ich die UI ungern bedient’ und ’habe ich mich unsicher gefühlt vs. habe ich mich sicher gefühlt’ erweitert, um ein zusätzliches subjektives Empfinden der Probanden abzufragen. Demnach gab es keinen Probanden, der unzufrieden mit dem System war oder das Gefühl hatte, dass sich seine Effizienz und/oder Produktivität verschlechtern würde. Insgesamt haben sich die Probanden mit dem System sicherer gefühlt und haben die Benutzerschnittstelle gerne bedient. Das System hat eine positive Auswirkung auf die eigene Wahrnehmung der Leistung der Probanden gehabt. Dies spiegelt sich auch objektiv gesehen an dem erhöhten Einsatz der UAVs für Aufklärungsaufgaben und der höheren Abdeckung des Missionsgebiets im Allgemeinen (HOA) und der historischen Konfliktpunkte im Speziellen.

Die Probanden wurden weiterhin zur Interventionsstrategie des Agenten befragt. Hierbei wurde die Meinung zum direkten automatisierten Aufkommen von Unterstützungsdialogen, der Möglichkeit der manuellen Erhöhung des angebotenen Unterstützungsgrads, sowie der Zeitpunkt der aufkommenden Unterstützung und die dargebotene Unterstützungsstufe eingeholt. Die Probanden konnten ihre Meinung zu den jeweiligen Fragen ebenfalls über eine Likert-Skala angeben. Abbildung 5-27 stellt die Ergebnisse in einem Kuchendiagramm dar.



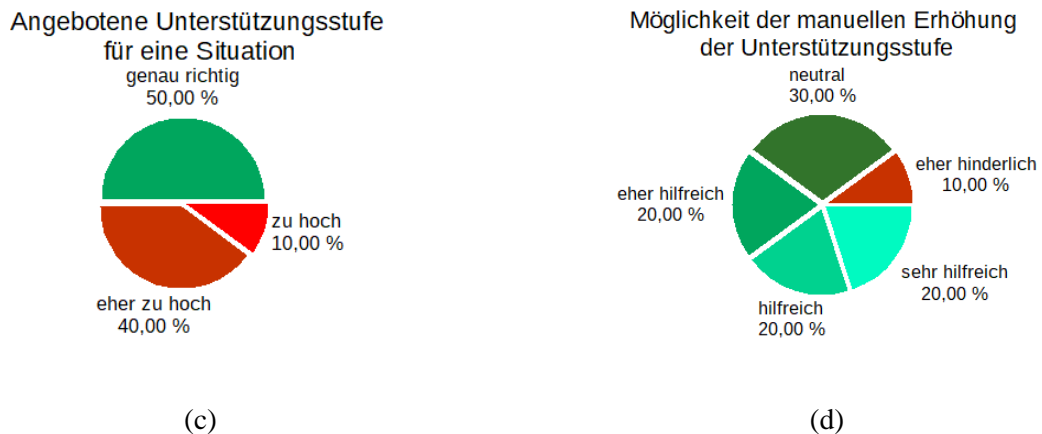


Abbildung 5-27: Einschätzung der Probanden zur Intervention von TacARA

Allgemein wurde die Intervention von über 2/3 der Teilnehmer als hilfreich angesehen (siehe Abbildung 5-27 (a)). Keiner der Probanden sah es als hinderlich an. Auch der Zeitpunkt, an dem der Agent automatisch an den Probanden über den Dialog herangetreten ist, wurde von einem überwiegenden Teil als genau richtig empfunden. Lediglich ein Proband empfand den Zeitpunkt als eher zu spät (siehe Abbildung 5-27 (b)). Bei der angebotenen Unterstützungsstufe sind die Probanden geteilter Meinung. Während die eine Hälfte diese als genau richtig empfand, sahen vier sie als eher zu hoch und einer als zu hoch an (siehe Abbildung 5-27 (c)). Die zweite Hälfte hätte sich eine niedrigere Automationsstufe bei der Bewältigung der Situation gewünscht, doch mit der Möglichkeit bei Bedarf diese selber manuell zu erhöhen. Das spiegelt sich auch in der Möglichkeit wider beim Erscheinen eines Dialogs zu einer Situation den Unterstützungsgrad manuell anzuheben. Hier sahen 60% diese Funktion als hilfreich an, lediglich 10% waren der Auffassung diese sei hinderlich gewesen (siehe Abbildung 5-27 (d)).

5.3 Bedrohungs- und UAV-Feindbeobachtungsanalyse von Assistenzsystem und Pilot

In einem gesonderten Experiment wurde zum einen die Einschätzung hinsichtlich der Bedrohungsbewertung feindlicher Einheiten zwischen Mensch und Maschine untersucht. Zum anderen wurde die Entscheidung der UAV-Aufgabenverteilung mit dem Modell des MDPs evaluiert. Das Entscheidungsmodell zur Ermittlung der UAV-Aufgaben wurde für dieses Experiment ausgetauscht, um eine weitere Methodik für die Entscheidungsfindung zu untersuchen. Die Ergebnisse wurden in [137] veröffentlicht.

Das Experiment wurde im Rahmen einer studentischen Arbeit [138] an der Professur für Flugmechanik und Flugführung durchgeführt. Ziel dieses Experiments war es die Ähnlichkeit der Bedrohungseinschätzung zwischen Mensch und Maschine bei unterschiedlichen Lagen zu untersuchen und zu vergleichen. Dazu wurden verschiedene taktische Lagen erstellt, die den Probanden vorgelegt wurden. Ihre Aufgabe war es eine Lagebewertung vorzunehmen, indem sie die Bedrohung durch vorhandene gegnerische Einheiten bewerteten und eine taktische Entscheidung für den Einsatz der zur Verfügung stehenden UAVs fällen sollten. Dabei wurde das Experiment in zwei Teile gegliedert. Im ersten Teil mussten die Probanden die Bewertung und Entscheidungsfindung alleine durchführen, während das System im Hintergrund lief. Im zweiten Teil wurden den Probanden die Ergebnisse des Agentensystems präsentiert, welche sie bewerten sollten. Die grundlegende Annahme hierbei war, dass diese Einschätzungen, die typischerweise vom Menschen sehr intuitiv getroffen werden, von einem System abgebildet werden können und dieses zu ähnlichen Ergebnissen gelangt. Zum anderen galt dieses Experiment auch als Vorabexperiment für das groß angelegte Experiment, welches unter Kap. 5.2 beschrieben wird, um das erstellte Bedrohungsbewertungsmodell und dessen gewählten Parameter zu validieren. Weiterhin war das Ziel eine erste Einschätzung und Nützlichkeit eines MDPs bezüglich der Entscheidungsfindung zu erhalten.

Um die unter Kap. 1.1 geschilderte Annahme zu evaluieren, dass das Agentensystem in der Lage ist menschliches, kognitives Verhalten nachzubilden, werden drei Hypothesen formuliert, die mit den Befragungen der Teilnehmer untersucht werden:

- H_1 : Das Assistenzsystem berücksichtigt jene Einflussfaktoren, die auch der menschliche Operateur verwenden würde.
- H_2 : Die Resultate entsprechen den Einschätzungen der menschlichen Operateure mit maximal geringen Abweichungen.
- H_3 : Das Assistenzsystem erhöht das Sicherheitsgefühl und beschleunigt dadurch die Lagebeurteilung.

5.3.1 Versuchspersonen

Für das Experiment wurden 12 Testpersonen befragt. Sechs davon waren Mitarbeiter im Helikoptersimulator des Instituts und waren dementsprechend mit den verwendeten Lagekarten und Missionen bereits vertraut. Die übrigen sechs Teilnehmer waren Offiziere des Heeres, die sich im Rahmen der Offiziersausbildung an der Universität befanden. Alle absolvierten vor der Universität den Offizierslehrgang Teil 1 und hatten grundlegende Erfahrungen zu Lagebeurteilungen, welche sich auf Lagebeurteilungen als Bataillonskommandeur bezog.

5.3.2 Versuchsaufbau und Durchführung

Ein experimenteller Durchlauf bestand aus drei Bestandteilen, einer Vorabbefragung, die Durchführung der Lagebewertung und schließlich ein Abschlussfragebogen. Dabei wurde jeder der 12 Teilnehmer einzeln befragt.

Bevor die Lagebewertungen durchgeführt wurden, wurde jeder Proband zunächst gefragt, ob sie, abgesehen von den bereits bekannten Aspekten, Erfahrungen mit Bedrohungsbewertung haben und welche Einflussfaktoren sie als bedeutend für die Bedrohungsbewertung erachten würden. Dafür wurde eine Auflistung von möglichen Einflussfaktoren, welche in dem DBN verwendet wurden, dargeboten mit der Möglichkeit weitere Einflussfaktoren selbst anzugeben. Die drei für die Probanden am wichtigsten Einflussfaktoren, sollten sie dabei ebenfalls nennen.

Anschließend wurde die Lagebewertung durchgeführt, die sich in zwei Teile gliedern lässt. Im ersten Teil wurden dem jeweiligen Probanden zwei Lagekarten in drei unterschiedlichen Gebieten (d.h. insgesamt sechs verschiedene taktische Lagen) vorgelegt. Die Aufgabe während dieses Teils war die gezeigte Lage hinsichtlich der Bedrohung durch die vorhandenen Gegner auf den Helikopter und der Flugroute zu beurteilen, sowie eine der taktischen Entscheidungen anzugeben und zu begründen. Im zweiten Teil der Lagebewertungen wurden ihnen weitere sieben Lagen gezeigt. Bei diesen wurden die Ergebnisse des Assistenten dargestellt und die Testpersonen sollten angeben, ob sie den Ergebnissen des Assistenten zustimmen oder inwiefern sie die Ergebnisse ablehnen. Zu einigen Lagen wurden durch Ansagen des Experimentalleiters den Probanden Zusatzinformationen über die militärischen Gegner gegeben. Diese Informationen enthielten das Aufklärungsalter und gegebenenfalls die Anzahl der durchgeführten Aufklärungen der jeweiligen Einheit. Während der gesamten Durchführung war der Experimentalleiter mit dabei, damit direkt Fragen zu den von den Probanden getroffenen Entscheidungen gestellt werden konnten. Eine Beschreibung der für das Experiment verwendeten Lagen und Fragebögen befindet sich in Anhang B.1.

Am Ende des Experiments wurden abschließende Fragen gestellt, um die Gedanken der Testpersonen zur Lagebewertung nachvollziehen zu können und zusätzliche Meinungen zu den Resultaten des Assistenzsystems und der Konzeption zu erhalten. Dabei wurden die Teilnehmer auch gefragt, ob sie auf der Lagekarte weitere Informationen nützlich fänden, die sie für die Bedrohungsbewertung bzw. der Entscheidungsfindung als wichtig erachten.

5.3.3 Experimentalergebnisse und Diskussion

Abbildung 5-28 zeigt die Auswertung der Fragen zu den Informationen, die für die einzelnen Testpersonen zu den drei einflussreichsten Faktoren für die Bedrohungsbewertung zählen. Dabei sind die Angaben vor sowie direkt nach den Lagebeurteilungen gegenübergestellt. Fragen zu der Zweckmäßigkeit der in dem Bedrohungsmodul verwendeten Variablen wurden erst am Ende nach dem Experiment gestellt, sodass die Teilnehmer nicht dadurch in ihren eigenen Einschätzungen beeinflusst wurden.

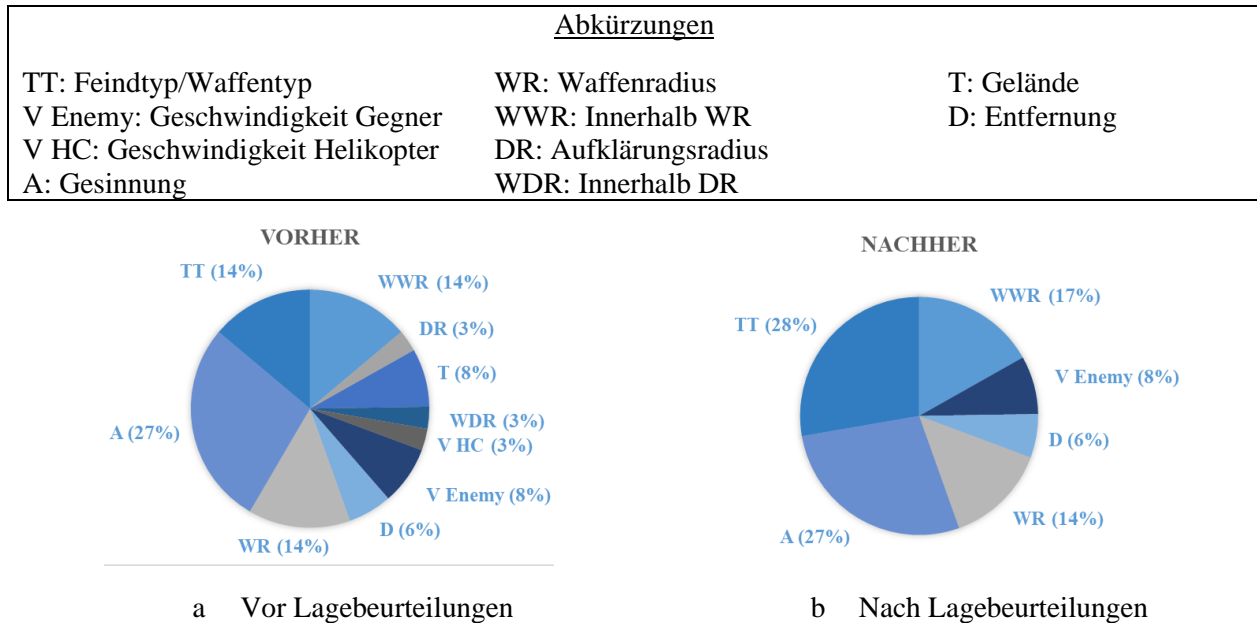


Abbildung 5-28: Übersicht der für die Teilnehmer relevanten Informationen für die Bedrohungsbewertung vor (a) und nach (b) den Lagebeurteilungen

Es ist deutlich zu sehen, dass die Anzahl an unterschiedlichen Angaben abnimmt. Nach den Lagebeurteilungen lässt sich erkennen, dass für die Testpersonen Informationen zu Waffenradius, Feind- bzw. Waffentyp, sowie Gesinnung am einflussreichsten sind. Vor allem in den Gesprächen während den Lagebewertungen ließ sich dies deutlich erkennen. Dabei ließen sich auch Änderungen in der Bedeutung der Information zu Feind- bzw. Waffentyp in der Bewertung beobachten. Mit Feindtyp ist gemeint, ob es sich um Personen, Jeeps oder Panzer handelt. Für einige Teilnehmer war dieser Unterschied erst dann umso einflussreicher, je älter die Aufklärungsinformation des Feind war. Alle Probanden waren jedoch der Meinung, dass nicht nur der Feindtyp, sondern auch der Waffentyp großen Einfluss auf den Bedrohungsgrad hat und auch in der Lagekarte zu sehen sein sollte. Dasselbe trifft auf das Alter der Aufklärungsdaten zu, welches ebenfalls laut den Probanden in der Lagekarte verzeichnet werden sollte. Vor der Lagebeurteilung gaben einige Teilnehmer auch die Geschwindigkeit des Helikopters an, welche jedoch wieder aus den Einflussfaktoren herausfiel, nachdem die Lagebeurteilung durchgeführt wurde. Ebenfalls zu sehen ist, dass

der Aufklärungsradius (DR), die Information, ob sich der Helikopter innerhalb dieses Radius befindet (WDR) und das Gelände (T) eine eher geringere Bedeutung für die Probanden hatte und nach der Lagebeurteilung sogar komplett vernachlässigt wurden. Diese Faktoren sind auch in der Modellierung zu Bedrohungsbeurteilung berücksichtigt worden, schien jedoch bei den Probanden keine wichtige Rolle zu spielen. Am wichtigsten empfanden die Probanden nach der Lagebeurteilung den Feindtyp/Waffentyp (TT) und die Gesinnung (A).

Die Auswertung der Bedrohungsbeurteilungen und der gewählten Aktionen ist in Tabelle 5-7 bzw. Tabelle 5-8 aufgeführt. Die Tabellen zeigen die absolute Häufigkeit der von den Versuchsteilnehmern gewählte Bedrohungskategorie (siehe Tabelle 5-7) pro gegnerische Einheit und Handlungsoptionen (siehe Tabelle 5-8) pro taktische Situation. Die kleinen Robotersymbole kennzeichnen die vom Agenten bestimmte Bedrohungskategorie. Die Farbe des Symbols deutet dabei eine Übereinstimmung (grün), eine Abweichung (rot) oder eine Teilübereinstimmung (gelb) mit der größten Häufigkeit der Probanden an.



Tabelle 5-7 Auswertung der Bedrohungsbeurteilungen für jede gegnerische Einheit aus allen Situationen

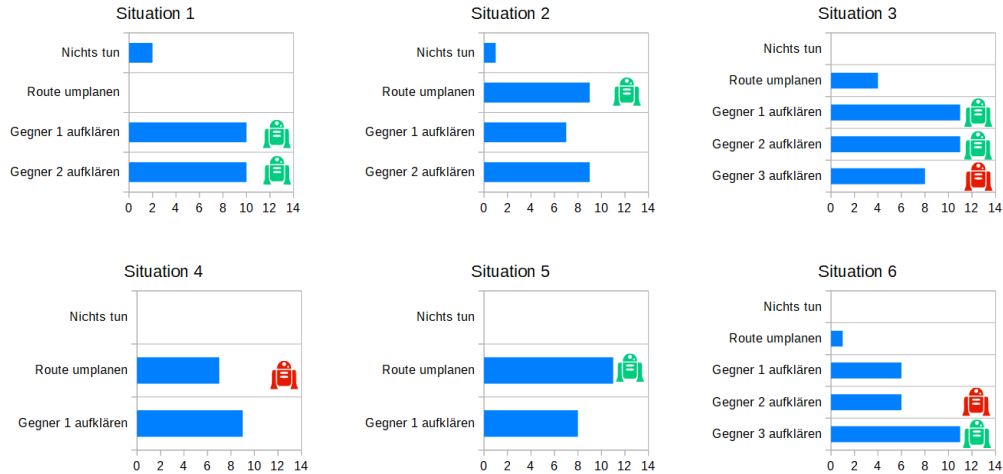


Tabelle 5-8: Auswertung der gewählten Handlungsoptionen für jede Situation. Die Aktionen „Gegner 1/2/3 aufklären“ stehen für eine Handlungsoption, weswegen mehrere Robotersymbole dargestellt sein können

Bei den ausgewählten Kategorien herrscht in beiden Tabellen meist eine breite Verteilung vor. So wurden beispielsweise bei der Bedrohungseinschätzung in Lage 3 für Feind 1 alle Kategorien von den Probanden mindestens einmal gewählt. Im Mittel entspricht die Bedrohungseinschätzung des Agenten dennoch meist der Einschätzung der Probanden. In Tabelle 5-8 ist eine breite Verteilung insbesondere in Lage 2 zu sehen. Außerdem ist erkennbar, dass die meisten Teilnehmer neben einer Routenumplanung zusätzlich UAVs für die Aufklärung entsenden würden. Die Zustimmung zu den vorgeschlagenen Bedrohungswerten und Handlungsempfehlungen des Assistenten ist in Abbildung 5-29 dargestellt.

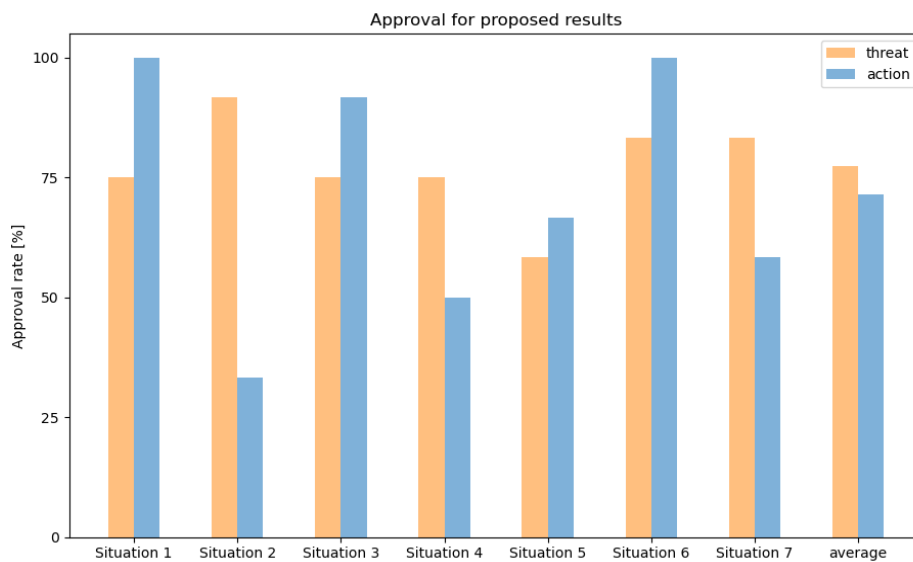


Abbildung 5-29: Akzeptanzraten der vorgeschlagenen Bedrohungsbewertungen und Handlungsoptionen pro Situation, sowie die durchschnittliche Akzeptanzraten über alle Situationen hinweg

Im Durchschnitt haben die Probanden bei der Bedrohungsbewertung mit bis zu 77% dem Vorschlag des Assistenzsystems zugestimmt und bei den vorgeschlagenen Handlungsoptionen im Schnitt mit 71%. In Situation 2 war die Zustimmungsrate mit ca. 33% deutlich niedriger im Vergleich zu den anderen. Auch Situation 4 hatte eine etwas niedrigere Zustimmung von ca. 50%. Die Zustimmung fiel bei diesen Lagen niedriger aus, weil die Teilnehmer Feinde aufklären wollten, die bereits kurze Zeit vorher aufgeklärt worden waren, das Assistenzsystem dies jedoch aufgrund des Aufklärungsalters als nicht notwendig erachtete. Im Gespräch mit den Testpersonen ließ sich ermitteln, dass dieser Unterschied auch auf eine unterschiedliche Einschätzung bzgl. des Werts der einzelnen UAVs zurückzuführen ist. Bei den in den Fragebögen verwendeten Handlungsempfehlungen wurden die UAVs als sehr kostbare Ressource angenommen, die nicht unnötig an Aufträge gebunden und dabei gegnerischen Einflüssen ausgesetzt werden sollten. Diese Annahme wurde jedoch von der Mehrheit der Testpersonen nicht geteilt.

Hypothese H_1 formulierte die Vermutung, dass das Assistenzsystem die Einflussfaktoren berücksichtigt, die auch menschliche Operateure verwenden würden. Gespräche und Befragung der Probanden bzgl. der Variablen, die für das DBN zur Bewertung der Bedrohung durch gegnerische Kräfte genutzt wurden, zeigen, dass diese auch größtenteils von den Probanden genutzt werden würden. Die erste Hypothese wird demnach bestätigt.

In Hypothese H_2 wurde die Vermutung aufgestellt, dass die Resultate des Agenten den Einschätzungen der menschlichen Operateure mit maximal geringen Abweichungen entsprechen. Auch diese Hypothese konnte bestätigt werden. Die Zustimmung bei den Bedrohungswerten war über alle Lagen hinweg hoch. Abweichende Einschätzungen betrafen nur den dargestellten Prozentwert durch das Agentensystem, doch nicht die Kategorie, in die dieser Prozentwert fiel. Bei den Handlungsempfehlungen zu der Verwendung der UAVs war die Zustimmung im Durchschnitt etwas geringer als bei der Bedrohungsbewertung. Wie bereits erwähnt lag dies größtenteils an einer abweichenden Wertigkeit, die die Probanden den UAVs gaben. Doch kann diese Wertigkeit durch entsprechende Justierung der Belohnungswerte modifiziert und den an den Vorstellungen der Probanden angepasst werden, so dass sich daraus kein Widerspruch zu der Hypothese ergibt.

In Hypothese H_3 wurde die Vermutung aufgestellt, dass das Assistenzsystem das Sicherheitsgefühl der Probanden erhöht und dadurch die Lagebeurteilung beschleunigt. Die Mehrheit der Teilnehmer war tatsächlich der Ansicht durch das System sicherer in der Bedrohungsbewertung zu sein und die Lage schneller erfassen zu können. Vor allem sah man in dem Assistenzsystem die Möglichkeit die eigene Einschätzung zu validieren. Zwar sind dies nur subjektive Einschätzungen der Probanden, doch zeigt sich daraus bereits eine Tendenz der Bestätigung für die dritte Hypothese. Weitere Forschungsmöglichkeiten in diese Richtung sind denkbar um die Hypothese mit objektiven Messdaten zu stützen. Hierbei könnte man

beispielsweise die Zeit messen, die ein Proband benötigt, um eine Lage abschließend zu beurteilen. Diese Zeit kann man dann mit und ohne Assistenzsystem messen und vergleichen. Die Herausforderung liegt dabei ähnliche Situationen zu gestalten, die miteinander verglichen werden können.

Auf Grundlage der erworbenen Kenntnisse durch die Auswertung des Experiments und der Befragung der Testpersonen bestätigten sich die aufgestellten Hypothesen. Die aufgetretenen Abweichungen zwischen Probanden und Assistenzsystem können durch Anpassung der Parameter ausgeglichen werden. Dies macht auch Sinn, da die Auswertung auch eine etwas größere Streuung in manchen Situationen zwischen den Probanden gezeigt hat. Eine individuelle Anpassung des Systems an die Vorstellungen des jeweiligen Piloten wäre daher sinnvoll. Die Modellierung des Problems mit einem MDP zeigte auch die Grenzen auf. Dies betrifft vor allem den Zustandsraum, der für die Modellierung des Problems notwendig ist. Der Fluch der Dimensionalität führt dazu, dass das Assistenzsystem unter Verwendung des MDPs für die Entscheidungsfindung für Lagen mit einer höheren Anzahl an beteiligten Einheiten nicht genutzt werden kann. Dieses Problem besteht zwar auch bei dem vorgestellten formalen Ansatz, allerdings wird diese Grenze erst weitaus später erreicht, d.h. es können mehr Feinde und UAVs theoretisch ohne signifikante Laufzeiteinschränkung berücksichtigt werden. Doch auch der formale Ansatz trifft irgendwann an seine Grenzen. Es gibt bereits verschiedene Lösungen, die dieses Problem angehen. Dabei handelt es sich um approximative Verfahren, für deren Lösung des MDPs nicht der gesamte Zustandsraum exakt betrachtet wird. Ein Beispiel hierfür ist, eine approximative Herangehensweise basierend auf neuronalen Netzwerken zu nutzen [139–141]. Eine weitere Möglichkeit zur Verbesserung der Entscheidungsfindung besteht darin, eine Abwandlung des klassischen MDPs zu verwenden. Diese Abwandlung ist der Partially Observable Markov Decision Process (POMDP). Während MDPs lediglich die Unsicherheit in den Folgen der ausgeführten Aktionen zulassen, können POMDPs zusätzlich Unsicherheiten in der Beschreibung des Zustands berücksichtigen. Ein POMDP kann Ungewissheiten antizipieren und aktiv Informationen sammeln [142]. Inwiefern dies zu einer Verbesserung der Entscheidungsfindung führen kann bedarf weiterer Forschung.

6 | FAZIT UND AUSBLICK

Im Rahmen dieser Arbeit wurde untersucht, wie ein menschlicher Operateur mit Hilfe automatisierter Assistenz bei der taktischen Situationsanalyse und Entscheidungsfindung kollaborativ unterstützt werden kann. Ausgehend von der Problemstellung (vgl. Kap. 1.1) wurde dafür ein Konzept erarbeitet, dass auf Grundlage von IMs Wissen zu verschiedenen Aspekten einer Situation in ein Modell (dem IM-Tree) vereint und Algorithmen dieses Wissen nutzen, um taktische Vorgehensweisen zu entwickeln. Zur Beantwortung der in Kap. 1.1 formulierten Fragen wurde der Agent prototypisch in einem Forschungssimulator des Instituts für Flugsysteme (IFS) implementiert, wobei Bezug auf MUM-T und militärische Transporthubschraubermissionen genommen wurde. In Mensch-Maschine-Experimenten wurde das Konzept schließlich evaluiert, indem Missionen mit zwei Konfigurationen geflogen wurden. Bei der ersten Konfiguration wurde die Unterstützungsleistung des Assistenzsystems abgeschaltet, während bei der zweiten Konfiguration der komplette Funktionsumfang dem Probanden zur Verfügung gestellt wurde. Zudem wurde in einem gesonderten Experiment speziell die Einschätzungen von Bedrohungsbewertungen und UAV-Auftragsvergaben zwischen Mensch und Maschine verglichen.

6.1 Schlussfolgerungen und Empfehlungen

Zunächst wird die Frage der kollaborativen Unterstützung betrachtet. Zur Beantwortung dieser Frage wird der Nutzen der automatisierten Unterstützungsleistung, sowie die dargebotenen Anfragemöglichkeiten durch den Nutzer kritisch in Augenschein genommen. Anschließend wird der Interventionsmechanismus begutachtet.

Zu den manuellen Anfragemöglichkeiten zählen die Vorschlagsgenerierung von Aufklärungsrouten und die Einblendung der Informationsebenen in die taktische Lage. Insgesamt standen die Probanden der Vorschlagsgenerierung von potentiellen Aufklärungszielen positiv gegenüber. Sie sahen darin nicht nur die Möglichkeit die eigene Vorgehensweise zu bestätigen, sondern auch das Assistenzsystem als Ideengeber für weitere Aufklärungsschwerpunkte zu verwenden. Allerdings gab es auch einige Probanden, die sich auf wenige Aufklärungsrouten bzw. Gebiete festlegen würden, wie z.B. die Primärroute mit entsprechenden Flanken, sowie mögliche Alternativrouten. Uneinigkeit gab es auch bei der Länge von Aufklärungsrouten. Einige bevorzugten eher kürzere Aufklärungsrouten, während andere sich eher längere gewünscht haben. Hier kommen unterschiedliche Erwartungshaltungen und Präferenzen der Teilnehmer zum Vorschein. Die Einblendung von taktischen Informationen wurden ebenfalls positiv gesehen. Alle drei implementierten Informationstypen wurden von den Probanden als hilfreich betrachtet. Allerdings ist darauf zu achten, dass durch eine Flut an Informationen (Auftragspfeile der UAVs, gegnerische Positionen, eingeblendete

Informationsebenen, ...) die Übersichtlichkeit gewahrt bleiben sollte. Letztlich empfand die Mehrheit der Teilnehmer die angebotene Unterstützung als Effizienzsteigerung und gab ihnen ein erhöhtes Sicherheitsgefühl. Subjektiv betrachtet bietet das System demnach einen Mehrwert.

Gestützt wird diese Beurteilung der Probanden auch durch objektive Datenanalysen. Die Unterstützung durch das Assistenzsystem führte dazu, dass wesentlich mehr Aufklärungsmissionen an die UAVs kommandiert wurden und allgemein eine höhere Abdeckung des Einsatzgebiets dadurch erzielt wurde. Die Abdeckung historischer Konflikte wurde dabei als Maß für die Effektivität herangezogen, welche bei aktivem Agenten höher war. Allerdings konnten nicht immer die Vorschläge des Agenten zur UAV-Auftragsvergabe nachvollzogen werden. Zurückzuführen war dies entweder auf Systemfehler oder auf unterschiedliche Ansichten zum taktischen Vorgehen zwischen Mensch und Maschine. Die Nachvollziehbarkeit von automatisiert getroffenen Entscheidungen sollten daher einen hohen Stellenwert einnehmen, um zu verhindern, dass es beim Kommandanten zu unnötigen Verwirrungen kommt und das Vertrauen in das System verloren geht. Letztlich kann dies dazu führen, dass die Unterstützungsleistung vom Kommandanten nicht angenommen wird. Zu dem Interventionsmechanismus, der eine angepasste Unterstützung anhand von Kritikalitätsstufen anbietet, gab es unterschiedliche Meinungen der Probanden. Alle stimmten zwar zu, dass eine an die Kritikalität einer Situation angepasste automatisierte Hilfestellung sinnvoll ist, allerdings würden sich die meisten Piloten eine andere Aufteilung wünschen. Während bei der Implementierung der Hinweis zu einer potentiell entstehenden Situation (Level 0) getrennt wurde von der ersten konkreten taktischen Hilfestellung (Level 1), wünschten sich die meisten Probanden bereits bei der ersten Unterstützungsstufe erste konkrete Hilfestellungen. Einige würden sogar nur eine Unterstützungsstufe bevorzugen, die beim ersten Auftreten einer kritischen Situation direkt Vorschläge zu UAV-Aufträgen anbietet. Andere wiederum sahen in der angebotenen Automationsstufe die Dringlichkeit einer Situation wieder und würden bei einer zu hohen Automationsstufe eine eher höhere Kritikalitätsstufe vermuten. Laut diesen Probanden könnte dies zu Verwirrungen führen, wenn sie selbst eine Situation als weniger dringlich beurteilen würden. Das wiederum bedeutet einen höheren Zeitaufwand, der betrieben werden muss, um sich mit der Mitteilung des Agenten auseinanderzusetzen. Für die zukünftige Realisierung eines solchen taktischen Unterstützungssystems ist es daher sinnvoll die Abstufungen in enger Zusammenarbeit mit den Nutzern zu spezifizieren. Die Mehrheit der Probanden empfand die manuelle Erhöhung der Automatisierung zur Lösung eines Problems als hilfreich, woraus man die Empfehlung ableiten kann, dass in zukünftigen Systemen unabhängig von der gewählten Abstufungsstrategie diese Funktionalität ebenfalls eingebaut werden sollte.

Der Einsatz eines Unterstützungssystems zur taktischen Situationsanalyse und Entscheidungsfindung kann nach dieser Studie als Vorteil angesehen werden. Dies gilt insbesondere für die Einblendung von taktischen Informationen, von denen die Piloten überzeugt waren, dass sie ihnen bei der Bildung des

Situationsbewusstseins geholfen haben. Auch in der Unterstützungsleistung zur taktischen Vorgehensweise sahen die Piloten einen Vorteil, der sie subjektiver und objektiver effektiver arbeiten lässt. Allerdings scheint in diesem Zusammenhang die Akzeptanz eines solchen taktischen Agentensystem von der individuellen Präferenz des Kommandanten abzuhängen. Eine an den Nutzer angepasste Unterstützungsleistung ist daher zu favorisieren, um eine möglichst effektive Kollaboration zu erreichen. Ebenfalls positiv war die automatisierte Hilfestellung bei kritischen Situationen, die während der Ausführung einer Mission erfolgten. Die Stärke des Assistenzsystems tritt vor allem in dynamischen Situationen zu Vorschein, in denen bedingt durch plötzliche Situationsänderungen der Kommandant gefordert ist schnell eine Lösung zu finden. Durch gezielte Hilfestellung kann in solchen Situationen für große Entlastung des Kommandanten gesorgt werden.

6.2 Weiterführende Forschungsrichtungen

Neben den Empfehlungen ergibt sich auch Raum für weiteren Forschungsbedarf und Weiterentwicklungen des Systems. In dem hier betrachteten Problemfeld beschränkte man sich auf die Fähigkeit der Aufklärung der UAVs. In militärischen Operationen können UAVs allerdings auch mit Waffen bestückt sein und die Fähigkeit der Bekämpfung von Zielen haben. Daraus ergeben sich weitere Handlungsmöglichkeiten, die obendrein um die Dimensionen ethischer und moralischer Entscheidungen erweitert werden. Zusammen mit der Aufklärungsfähigkeit wird der Raum an mögliches taktisches Vorgehen sehr schnell komplex. Damit wächst nicht nur die Komplexität für den Menschen, sondern auch die Herausforderung geeignete Verfahren in Computermodelle umzusetzen, die das Assistenzsystem für die taktische Generierung von Handlungsoptionen nutzen kann. Zudem gewinnt der Aspekt der Transparenz hierbei nochmal durch die Komplexitätssteigerung zusätzlich an Bedeutung. Die Erhöhung der Nachvollziehbarkeit von vorgeschlagenen Handlungsalternativen ist daher ein wichtiger Aspekt, der bei der Weiterentwicklung in dieser Richtung berücksichtigt werden muss. Im Agentenentwurf wurde dafür bereits die Intentionsanalyse- und Erklärungskomponente vorgesehen (siehe Kap. 3.8.4), welche es gilt weiter auszubauen.

Um mehr Allgemeinheit zu erreichen könnte man sich ebenso einen Mechanismus vorstellen, der zu bestimmten Anfragen verschiedene IMs zur Laufzeit miteinander kombiniert, um daraus eine entsprechende Antwort zu generieren. Damit lassen sich auch dynamisch verschiedene Verhaltensweisen erzeugen, z.B. indem man eine resultierende IM als Eingabe für die Berechnung eines (globalen) Minimums heranzieht und Einheiten dorthin bewegen lässt. Ein konkretes Anwendungsbeispiel wäre das Auffinden von Verteidigungspositionen, um ein bestimmtes Objekt vor Bedrohungen zu schützen. Dadurch wird zwar die Komplexität erhöht, doch wird das System dadurch auch flexibler und kann auf Veränderungen einer Situation besser reagieren. Um die Akzeptanz eines taktischen Unterstützungssystems zu steigern ist zudem, durch das Einbringen von Lernkomponenten, eine individuell an den Nutzer anpassbare taktische

Hilfestellung sinnvoll. Dies erhöht sowohl die Nachvollziehbarkeit als auch die Akzeptanz vorgeschlagener Handlungsempfehlungen, da sich das System an den Vorstellungen des Kommandanten orientiert. Während der Durchführung der Experimente kam auf, dass die Probanden teilweise unterschiedliche Ansichten über das taktische Vorgehen hatten, was sich u.a. auf die Akzeptanz der durch das Assistenzsystem hervorgebrachten Vorschläge niedergeschlagen hatte. Ein mögliches Experiment hierzu wäre die Präferenzen des Piloten bei der Wahl von taktischem Vorgehen abzufragen. Anschließend lässt man den Probanden Missionen mit dem Assistenzsystem fliegen, wobei einmal keine Anpassung an die individuellen Präferenzen vorgenommen wird und einmal eine Anpassung gemacht wird. Die Anpassung könnte beispielsweise über die Wahl geeigneter Parameterwerte erfolgen, indem geeignete Lernverfahren angewendet werden. Durch interaktives Lernen mit dem System, kann dieses die Parameterwerte so anpassen, dass sich die Ergebnisse an den Vorstellungen des Probanden orientieren.

Auch möglich wäre die Übertragung des IM-Modells auf die Agentenseite der UAVs, so dass sie eigenständig Informationen aus dem Wissensmodell für Entscheidungsfindung (z.B. Navigation) herausziehen können, was insbesondere in Funkausfallsituationen nützlich sein kann. Auf diese Weise wird aus dem hier vorgestellten zentralen Ansatz ein dezentraler Ansatz, bei dem jede automatisierte Einheit im Gefechtsfeld ein individuelles Situationsbild erzeugt.

6.3 Erweiterungen und Verbesserungen

Aus der Befragung ergaben sich zudem Verbesserungsvorschläge und Erweiterungen, die von Seite der Piloten gegeben wurden. Eine Erweiterung umfasst eine automatisierte Unterstützungsfunktion beim manuellen Setzen von Aufklärungszielen. Anstatt komplette Aufklärungsrouten selber einzutragen wäre demnach die Festlegung eines Start- und Zielpunkts und der Auswahl eines von mehreren geeigneten Aufklärungsmustern denkbar, welches das System zwischen die gesetzten Punkte so errechnet, dass der resultierende Aufklärungspfad optimal verläuft.

Die automatisierte Identifikation möglicher Zielobjekten (z.B. Aufklärungsrouten) sollten mit Priorisierungen versehen werden, damit die Nutzer einen Indikator an die Seite gestellt bekommen, der ihnen bei der Beurteilung und der Auswahl von möglichen taktischen Vorgehensweisen unterstützt. Damit verbunden ist auch die Anzahl der vorgeschlagenen Zielobjekte. Beim De-Briefing der Probanden wurde mehrheitlich der Vorschlag geäußert, dass sich die Anzahl der Vorschläge an den zur Verfügung stehenden UAVs orientieren sollte.

Bei der Bewertung der Bedrohung durch feindliche Kräfte wird nicht nur die aktuelle Helikopterposition herangezogen, sondern auch Punkte auf der aktuellen Flugroute. Dabei wird diese in Abschnitte untergliedert und pro Abschnitt der Bedrohungswert ermittelt. Auf diese Weise erhält man nicht

nur die aktuelle Bedrohung für den Helikopter, sondern auch für bestimmte Routenabschnitte. Diese Information kann verwendet werden, um die Qualität der Route hinsichtlich der Sicherheit zu bewerten. Sind Routenabschnitte besonders gefährdet, können alternative Routen berechnet werden, für die die Bedrohungslage geringer ist. Über einen geeigneten Suchalgorithmus können so andere Wege errechnet und miteinander verglichen werden. Theoretisch ist es auch möglich, nicht nur für Helikopter- und Routenpositionen diese Bedrohungswerte zu ermitteln, sondern für jegliche Position auf der Karte. So können strategisch relevante Punkte, auch für andere Missionsteilnehmer, ebenfalls auf den Bedrohungsgrad geprüft werden.

Um größere Karten effizient zu beherrschen und auch mehr Detailgrad des Zellgitters zu erreichen kann man sich einen Mechanismus vorstellen, der die Karte in mehrere Gebiete bzw. Kacheln unterteilt, wobei jede dieser Kacheln ein IM-Model enthält. Je nachdem, wo sich die eigene Einheit gerade befindet, wird das entsprechende IM-Model dieser Kachel für die Verarbeitung von Informationen herangezogen. Bei Übergängen von einer zur anderen Kachel kann man dabei Vorhersagen mit einbeziehen (z.B. Helikopter befindet sich in Kachel 0, wird aber die nächsten 30 Sekunden in Kachel 1 sein, d.h. obwohl der Helikopter noch in Kachel 0 ist, kann man für kommende Berechnungen auf Kachel 1 wechseln). Berechnungen von Einflüssen, die über die Kacheln hinausgehen müssen dabei allerdings beachtet werden. Man könnte dazu jede Kachel mit einem Index versehen und sich die Kachel-Indizes speichern, die durch eine Entität beeinflusst werden. Bei Suchanfragen, die eine bestimmte Region umfassen, ist es erforderlich anzugeben, wie groß der Suchbereich ist und wo sich das Zentrum der Suche, sprich der Anfang der Suche, befindet. Dadurch können dann auch alle angrenzenden Kacheln berücksichtigt werden.

Auch im ergonomischen Bereich gibt es Weiterentwicklungsmöglichkeiten. So sollte das Interaktionsmedium derart gestaltet sein, dass sich individuelle Einstellungen der Darstellung von taktischen Informationen auf Ebenen ausgelagert werden können. Dadurch hat der Nutzer mehr Kontrolle über die eingeblendeten Informationen, was sich positiv auf die Übersicht der taktischen Kartendarstellung auswirken kann. Zudem können sich weitere Gedanken zu möglichen Informationsebenen gemacht werden. Während des De-Briefings kamen von den Probanden hierzu Anregungen. Demnach könnte eine Ebene unter Berücksichtigung des Aufklärungsalters Bereiche bereits aufgeklärter Flächen darstellen.

LITERATURVERZEICHNIS

- [1] Situation, DWDS - Digitales Wörterbuch Der Deutschen Sprache. Das Wortauskunftssystem Zur Deutschen Sprache in Geschichte Und Gegenwart (n.d.). <https://www.dwds.de/wb/Situation> (accessed June 10, 2024).
- [2] D. Silver, A. Huang, C.J.M. et al., Mastering the game of Go with deep neural networks and tree search, *Nature* (2016) 484–489. <https://doi.org/https://doi.org/10.1038/nature16961>.
- [3] D. Silver, J. Schrittwieser, K.S. et al., Mastering the game of Go without human knowledge, *Nature* (2017) 354–359. <https://doi.org/https://doi.org/10.1038/nature24270>.
- [4] BBC, Artificial intelligence: Google’s AlphaGo beats Go master Lee Se-dol, *BBC News* (2016). <https://www.bbc.com/news/technology-35785875> (accessed March 3, 2024).
- [5] O. Vinyals, W.M.C. et al. I. Babuschkin, Grandmaster level in StarCraft II using multi-agent reinforcement learning, *Nature* 575 (2019) 350–354. <https://doi.org/https://doi.org/10.1038/s41586-019-1724-z>.
- [6] M.A. Frey, A. Schulte, Tactical Decision Support for UAV Deployment in MUM-T Helicopter Missions: Problem analysis and System Requirements, in: 2018 IEEE Conference on Cognitive and Computational Aspects of Situation Management (CogSIMA), 2018: pp. 1–7. <https://doi.org/10.1109/COGSIMA.2018.8423986>.
- [7] J. McCarthy, P.J. Hayes, Some Philosophical Problems from the Standpoint of Artificial Intelligence, in: B. Meltzer, D. Michie (Eds.), *Machine Intelligence 4*, Edinburgh University Press, 1969: pp. 463–502.
- [8] Y. Fischer, A. Bauer, J. Beyerer, A conceptual framework for automatic situation assessment, in: 2011 IEEE International Multi-Disciplinary Conference on Cognitive Methods in Situation Awareness and Decision Support (CogSIMA), 2011: pp. 234–239. <https://doi.org/10.1109/COGSIMA.2011.5753451>.
- [9] Bewusstsein, DWDS - Digitales Wörterbuch Der Deutschen Sprache. Das Wortauskunftssystem Zur Deutschen Sprache in Geschichte Und Gegenwart (n.d.). <https://www.dwds.de/wb/Bewusstsein> (accessed June 10, 2022).

-
- [10] V. Gadenne, *Bewusstsein im Dorsch Lexikon der Psychologie*, (2021). <https://dorsch.hogrefe.com/stichwort/bewusstsein>.
- [11] *Bewußtsein*, (2000). <https://www.spektrum.de/lexikon/psychologie/bewusstsein/2317> (accessed June 22, 2022).
- [12] T.B. Sheridan, R. Parasuraman, *Human-Automation Interaction*, *Reviews of Human Factors and Ergonomics* 1 (2005) 89–129. <https://doi.org/10.1518/155723405783703082>.
- [13] R.D. Gilson, *Special Issue Preface.*, *Human Factors* 37, No. 1 37 (1995) 3–4. <https://doi.org/https://doi.org/10.1518/001872095779049426>.
- [14] M.R. Endsley, *Design and Evaluation for Situation Awareness Enhancement*, in: *Proceedings of the Human Factors Society - 32nd Annual Meeting - 1988*; Vol. 32 Issue 2, 1988: pp. 97–101.
- [15] W.L. Hamilton, *Situation Awareness Metrics Program*, in: *SAE Technical Paper Series No. 871767*, PA: Society of Automotive Engineers, 1987.
- [16] M. Vidulich, C. Dominguez, E. Vogel, G. McMillan, *Situation Awareness: Papers and annotated bibliography*, 1994.
- [17] L. Carroll, *Desperately seeking SA*, *TAC Attack*, *TAC SP 127-1*, Volume 32, Issue 3 (1992) 5–6.
- [18] M.L. Fracker, *Measures of Situation Awareness: Review and Future Directions*, 1991. <https://apps.dtic.mil/sti/tr/pdf/ADA262672.pdf> (accessed April 20, 2024).
- [19] M.R. Endsley, D.G. Jones, *Designing for Situation Awareness: An Approach to User-Centered Design*, 2nd edition, Taylor & Francis Ltd., 2017.
- [20] M.R. Endsley, *Situation Awareness Analysis and Measurement*, 1st edition, Routledge, Mahwah, NJ, 2000. <https://doi.org/https://doi.org/10.1201/b12461>.
- [21] M.R. Endsley, *Toward a Theory of Situation Awareness in Dynamic Systems*, *Human Factors: The Journal of the Human Factors and Ergonomics Society (HFES)* 37 (1995) 32–64. <https://doi.org/https://doi.org/10.1518/001872095779049543>.

- [22] D. Hall, *Mathematical Techniques in Multisensor Data Fusion*, 2nd edition, ARTECH House Inc, 2004.
- [23] A.N. Steinberg, C.L. Bowman, F.E. White, Revisions to the JDL data fusion model, in: B. V Dasarathy (Ed.), *Sensor Fusion: Architectures, Algorithms, and Applications III*, SPIE, 1999: pp. 430–441. <https://doi.org/10.1117/12.341367>.
- [24] M. She, Z. Li, Team Situation Awareness: A Review of Definitions and Conceptual Models, in: D. Harris (Ed.), *Engineering Psychology and Cognitive Ergonomics: Performance, Emotion and Situation Awareness*, Springer International Publishing, Cham, 2017: pp. 406–415.
- [25] N.A. Stanton, P.M. Salmon, G.H. Walker, E. Salas, P.A. Hancock, State-of-science: situation awareness in individuals, teams and systems, *Ergonomics* 60 (2017) 449–466. <https://doi.org/10.1080/00140139.2017.1278796>.
- [26] M. Endsley, W.M. Jones, A model of inter and intra team situation awareness: Implications for design, training and measurement. *New trends in cooperative activities: Understanding system dynamics in complex environments*, *New Trends in Cooperative Activities: Understanding System Dynamics in Complex Environments* (2001) 46–67.
- [27] E. Salas, C. Prince, D.P. Baker, L. Shrestha, Situation Awareness in Team Performance: Implications for Measurement and Training, *Hum Factors* 37 (1995) 123–136. <https://doi.org/10.1518/001872095779049525>.
- [28] P.M. Salmon, N.A. Stanton, D.P. Jenkins, G.H. Walker, M.S. Young, A. Aujla, What Really is Going on? Review, Critique and Extension of Situation Awareness Theory, in: *Proceedings of the 7th International Conference on Engineering Psychology and Cognitive Ergonomics*, Springer-Verlag, Berlin, Heidelberg, 2007: pp. 407–416.
- [29] T. O’Neill, N. McNeese, A. Barron, B. Schelble, Human–Autonomy Teaming: A Review and Analysis of the Empirical Literature, *Hum Factors* 64 (2022) 904–938. <https://doi.org/10.1177/0018720820960865>.
- [30] M.M. Cummings, Man versus machine or man + machine?, *IEEE Intell Syst* 29 (2014) 62–69. <https://doi.org/10.1109/MIS.2014.87>.

- [31] J.B. Lyons, K. Wynne, Human-machine teaming: Evaluating dimensions using narratives, in: *Human-Intelligent Systems Integration*, 2021: pp. 129–137. <https://doi.org/10.1007/s42454-020-00019-7>.
- [32] J.Y. Chen, M.J. Barnes, Human-Agent Teaming for Multi-Robot Control: A Literature Review, 2013. <https://apps.dtic.mil/sti/tr/pdf/ADA583900.pdf> (accessed August 16, 2022).
- [33] M. Wild, Mental models and computer modelling, *J Comput Assist Learn* 12 (1996) 10–21. <https://doi.org/https://doi.org/10.1111/j.1365-2729.1996.tb00033.x>.
- [34] M.M. Kokar, M.R. Endsley, Situation Awareness and Cognitive Modeling, *IEEE Intell Syst* 27 (2012) 91–96. <https://doi.org/10.1109/MIS.2012.61>.
- [35] L. Padgham, M. Winikoff, *Developing Intelligent Agent Systems - A practical guide*, John Wiley & Sons, Ltd., Liverpool University, UK, 2004. <https://doi.org/https://doi.org/10.1002/0470861223>.
- [36] S. Franklin, A. Graesser, Is It an agent, or just a program?: A taxonomy for autonomous agents, in: J.P. Müller, M.J. Wooldridge, N.R. Jennings (Eds.), *Intelligent Agents III Agent Theories, Architectures, and Languages*, Springer Berlin Heidelberg, Berlin, Heidelberg, 1997: pp. 21–35.
- [37] K. Rabuzin, M. Maleković, M. Bača, A Survey of the properties of agents, *Journal of Information and Organizational Sciences* 30 (2006). <https://jios.foi.hr/index.php/jios/article/view/14> (accessed June 23, 2024).
- [38] F. Qureshi, D. Terzopoulos, R. Gillett, The Cognitive Controller: A Hybrid, Deliberative/Reactive Control Architecture for Autonomous Robots, in: B. Orchard, C. Yang, M. Ali (Eds.), *Innovations in Applied Artificial Intelligence*, Springer Berlin Heidelberg, Berlin, Heidelberg, 2004: pp. 1102–1111.
- [39] S. Russell, P. Norvig, *Artificial Intelligence: A Modern Approach*, 4th ed., Pearson, 2021.
- [40] L. Niklasson, M. Riveiro, F. Johansson, A. Dahlbom, G. Falkman, T. Ziemke, C. Brax, T. Kronhamn, M. Smedberg, H. Warston, P.M. Gustavsson, A Unified Situation Analysis Model for Human and Machine Situation Awareness - Semantic Scholar, in: *Gesellschaft für Informatik e. V.*, Bonn, 2007: pp. 105–109.

- [41] P. Millot, M. Pacaux-Lemoine, A Common Work Space for mutual enrichment of Human-machine Cooperation and Team-Situation Awareness, in: 12th IFAC Symposium on Analysis, Design, and Evaluation of Human-Machine Systems, Las Vegas, NV, USA, 2013: pp. 387–394. <https://doi.org/https://doi.org/10.3182/20130811-5-US-2037.00061>.
- [42] P. Millot, F.V. Serge Debernard, Authority and Cooperation between Humans and Machines, in: The Handbook of Human-Machine Interaction, Taylor & Francis Group, 2011. <https://doi.org/https://doi.org/10.1201/9781315557380>.
- [43] C.A. Rieger, J.S. Greenstein, The allocation of tasks between the human and computer in automated systems, *Proceedings of the IEEE* (1982) 204–208.
- [44] M.P. Lemoine, S. Debernard, I. Crevits, P. Millot, Cooperation between humans and machines: First results of an experiment with a multi-level cooperative organisation in air traffic control, *Computer Supported Cooperative Work (CSCW)* 5 (1996) 299–321. <https://doi.org/10.1007/BF00133661>.
- [45] M.R. Endsley, E.O. Kiris, The out-of-the-loop performance problem and level of control in automation, *Hum Factors* 37 (1995) 381–394. <https://doi.org/10.1518/001872095779064555>.
- [46] T.B. Sheridan, G. Johanssen, eds., *Monitoring behavior and supervisory control*, 1st ed., Springer New York, NY, 1976. <https://doi.org/https://doi.org/10.1007/978-1-4684-2523-9>.
- [47] L. Onnasch, C.D. Wickens, H. Li, D. Manzey, Human Performance Consequences of Stages and Levels of Automation: An Integrated Meta-Analysis, *Hum Factors* 56 (2014) 476–488. <https://doi.org/10.1177/0018720813501549>.
- [48] E.M. Roth, K.B. Bennett, D.D. Woods, Human interaction with an “intelligent” machine, *Int J Man Mach Stud* 27 (1987) 479–525. [https://doi.org/https://doi.org/10.1016/S0020-7373\(87\)80012-3](https://doi.org/https://doi.org/10.1016/S0020-7373(87)80012-3).
- [49] M. Cummings, *Decision Making in Aviation*, in: AIAA 1st Intelligent Systems Technical Conference, Routledge, 2004: pp. 289–294. <https://doi.org/10.2514/6.2004-6313>.

- [50] R. Parasuraman, D. Manzey, Complacency and Bias in Human Use of Automation: An Attentional Integration, *Hum Factors* 52 (2010) 381–410. <https://doi.org/10.1177/0018720810376055>.
- [51] R.J. Shively, J. Lachter, S.L. Brandt, M. Matessa, V. Battiste, W.W. Johnson, Why Human-Autonomy Teaming?, in: C. Baldwin (Ed.), *Advances in Neuroergonomics and Cognitive Engineering*, Springer International Publishing, Cham, 2018: pp. 3–11.
- [52] P. McDermott, C. Dominguez, N. Kasdaglis, M. Ryan, I. Trhan, A. Nelson, *Human-Machine Teaming Systems Engineering Guide*, 2018.
- [53] C. Alexander, S. Ishikawa, M. Silverstein, *A Pattern Language: Towns, Buildings, Construction*, Oxford University Press, New York, 1977.
- [54] J. van Diggelen, M. Johnson, Team Design Patterns, in: *Proceedings of the 7th International Conference on Human-Agent Interaction*, Association for Computing Machinery, New York, NY, USA, 2019: pp. 118–126. <https://doi.org/10.1145/3349537.3351892>.
- [55] A. Schulte, D. Donath, D.S. Lange, Design patterns for human-cognitive agent teaming, in: *Lecture Notes in Computer Science (Including Subseries Lecture Notes in Artificial Intelligence and Lecture Notes in Bioinformatics)*, Springer, Cham, 2016: pp. 231–243. https://doi.org/10.1007/978-3-319-40030-3_24.
- [56] C. von Clausewitz, *Vom Kriege*, 2. Auflage, Null Papier Verlag, 2019.
- [57] Headquarters Department of the Army, *Offense and Defense (ADP 3-90)*, ADP 3-90, Lulu.com, United States Government US Army, Washington, D.C., 2012. https://www.moore.army.mil/mssp/PDF/adp3_90.pdf (accessed June 10, 2022).
- [58] Department of the Army Headquarters, *Planning and Orders Production, FM 5-0, C1*, Army Publishing Directorate (<http://www.armypubs.army.mil>), Washington, D.C., 2022. https://rdl.train.army.mil/catalog-ws/view/100.ATSC/46BBB965-286D-4642-83BE-A4EE1CE42B46-1308623627080/fm5_0wc1.pdf (accessed July 15, 2022).
- [59] F.P.B. Osinga, *Science, Strategy and War – The Strategic Theory of John Boyd (Strategy and History)*, 1st edition, Routledge, 2007.

- [60] M. Ryder, C. Downs, Rethinking reflective practice: John Boyd’s OODA loop as an alternative to Kolb, *The International Journal of Management Education* 20 (2022) 100703. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.ijme.2022.100703>.
- [61] A.J. Bousquet, *The Scientific Way of Warfare: Order and Chaos on the Battlefields of Modernity*, 3rd edition, Columbia University Press, 2009.
- [62] T. Grant, B. Kooter, Comparing OODA & other models as Operational View C2 Architecture, in: 10th International Command and Control Research and Technology Symposium, The Future of C2., McLean, Virginia, USA, 2005. <https://citeseerx.ist.psu.edu/document?repid=rep1&type=pdf&doi=84b6d4a49b5923fd265b7d4b3e9532dce13ca20c> (accessed September 10, 2024).
- [63] M.R. Endsley, S.J. Selcon, T.D. Hardiman, D.G. Croft, A Comparative Analysis of Sagat and Sart for Evaluations of Situation Awareness, *Proceedings of the Human Factors and Ergonomics Society Annual Meeting* 42 (1998) 82–86. <https://doi.org/10.1177/154193129804200119>.
- [64] Department of the Army Headquarters, Reconnaissance and Scout Platoon, FM 3-20.98, *Army Knowledge Online* (www.us.army.mil), Washington, D.C., 2009. <https://info.publicintelligence.net/USArmy-ReconScoutPlatoon.pdf> (accessed May 23, 2022).
- [65] H.D. of the Army, Engineer Reconnaissance, ATP 3-34.81, Headquarters, Department of the Army, Washington, D.C., 2016. <https://www.marines.mil/portals/1/Publications/MCWP%203-17.4.pdf> (accessed June 10, 2022).
- [66] U.S.G.U. Army, Intelligence Preparation of the Battlefield, ATP 2-01.3, Headquarters, Department of the Army, Washington, D.C., 2019. https://home.army.mil/wood/application/files/8915/5751/8365/ATP_2-01.3_Intelligence_Preparation_of_the_Battlefield.pdf (accessed June 18, 2022).
- [67] Jr. Edward Hanlon, Air Reconnaissance, DEPARTMENT OF THE NAVY Headquarters United States Marine Corps, 2016. <https://www.marines.mil/Portals/1/Publications/MCTP%203->

- 20G%20Formerly%20MCWP%203-26.pdf?ver=2017-11-02-133506-713 (accessed May 15, 2022).
- [68] Headquarters Department of the Army, Reconnaissance, in: *Opposing Force Tactics*, TC 7-100.2, Army Knowledge Online (www.us.army.mil), Washington, D.C., 2011: pp. 187–204. <https://www.govinfo.gov/content/pkg/GOVPUB-D101-PURL-gpo122554/pdf/GOVPUB-D101-PURL-gpo122554.pdf> (accessed June 22, 2022).
- [69] Headquarters Department of the Army, *Special Forces Detachment Mission Planning Guide*, GTA 31-01-003, Independently published, 2020. https://irp.fas.org/doddir/army/gta31_01_003.pdf (accessed October 20, 2022).
- [70] J. Roy, S. Paradis, M. Allouche, Threat evaluation for impact assessment in situation analysis systems, in: I. Kadar (Ed.), *Signal Processing, Sensor Fusion, and Target Recognition XI*, SPIE, 2002: pp. 329–341. <https://doi.org/10.1117/12.477618>.
- [71] S. Paradis, A. Benaskeur, M. Oxenham, P. Cutler, Threat evaluation and weapons allocation in network-centric warfare, in: *2005 7th International Conference on Information Fusion*, 2005: pp. 1078–1085. <https://doi.org/10.1109/ICIF.2005.1591977>.
- [72] A.N. Steinberg, An approach to threat assessment, in: *2005 7th International Conference on Information Fusion*, 2005: pp. 8 pp.-. <https://doi.org/10.1109/ICIF.2005.1592001>.
- [73] A.N. Steinberg, *Foundations of Situation and Threat Assessment*, in: *Handbook of Multisensor Data Fusion*, 2nd Editio, CRC Press, 2009: p. 451.
- [74] G. Digiioia, S. Panzieri, INFUSION: A system for stuation and threat assessment in current and foreseen scenarios, in: *2012 IEEE International Multi-Disciplinary Conference on Cognitive Methods in Situation Awareness and Decsision Support*, 2012: pp. 316–323. <https://doi.org/10.1109/CogSIMA.2012.6188403>.
- [75] G. Chen, D. Shen, C. Kwan, J.B. Cruz, M. Kruger, Game Theoretic Approach to Threat Prediction and Situation Awareness, in: *2006 9th International Conference on Information Fusion*, 2006: pp. 1–8. <https://doi.org/10.1109/ICIF.2006.301670>.

- [76] C.G. Looney, L.R. Liang, Cognitive situation and threat assessments of ground battlespaces, *Information Fusion* 4 (2003) 297–308. [https://doi.org/https://doi.org/10.1016/S1566-2535\(03\)00044-7](https://doi.org/https://doi.org/10.1016/S1566-2535(03)00044-7).
- [77] S.-P. Ting, S. Zhou, N. Hu, A Computational Model of Situation Awareness for MOUT Simulations, in: *2010 International Conference on Cyberworlds*, 2010: pp. 142–149. <https://doi.org/10.1109/CW.2010.11>.
- [78] O. Juarez-Expinosa, C. Gonzalez, Situation Awareness of Commanders: A Cognitive Model, 2004. <https://doi.org/https://doi.org/10.1184/R1/6571430.v1>.
- [79] G.L. Zacharias, A.X. Miao, C. Illgen, J.M. Yara, G.M. Siouris, SAMPLE: SITUATION AWARENESS MODEL FOR PILOT IN-THE-LOOP EVALUATION, in: *Proceedings of the 9th Conference on Computer Generated Forces and Behavior Representation*, 2000.
- [80] M. Hoogendoorn, R. van Lambalgen, J. Treur, Modeling Situation Awareness in Human-Like Agents Using Mental Models, in: *Proceedings of the Twenty-Second International Joint Conference on Artificial Intelligence (IJCAI)*, 2011: pp. 1697–1704. <https://doi.org/10.5591/978-1-57735-516-8/IJCAI11-285>.
- [81] J.J. Salerno, M.L. Hinman, D.M. Boulware, A situation awareness model applied to multiple domains, in: B. V Dasarathy (Ed.), *Multisensor, Multisource Information Fusion: Architectures, Algorithms, and Applications 2005*, SPIE, 2005: pp. 65–74. <https://doi.org/10.1117/12.603735>.
- [82] G. Jakobson, A framework for cognitive situation control, in: *2017 IEEE Conference on Cognitive and Computational Aspects of Situation Management (CogSIMA)*, 2017: pp. 1–7. <https://doi.org/10.1109/COGSIMA.2017.7929577>.
- [83] G. D’Aniello, A. Gaeta, V. Loia, F. Orciuoli, Integrating GSO and SAW ontologies to enable Situation Awareness in Green Fleet Management, in: *2016 IEEE International Multi-Disciplinary Conference on Cognitive Methods in Situation Awareness and Decision Support (CogSIMA)*, 2016: pp. 138–144. <https://doi.org/10.1109/COGSIMA.2016.7497801>.

-
- [84] M. Liebhaber, B. Feher, Air threat assessment: Research, model, and display guidelines, in: Proceedings of the 2002 Command and Control Research and Technology Symposium, 2002. <https://doi.org/10.21236/ada458047>.
- [85] J.N. Roux, J.H. van Vuuren, Threat evaluation and weapon assignment decision support: A review of the state of the art, *ORiON* 23 (2007) 151–187. <https://doi.org/10.5784/23-2-54>.
- [86] Q. Changwen, H. You, A method of threat assessment using multiple attribute decision making, in: 6th International Conference on Signal Processing, 2002: pp. 1091–1095. <https://doi.org/10.1109/ICOSP.2002.1179979>.
- [87] A. Benavoli, B. Ristic, A. Farina, M. Oxenham, L. Chisci, An approach to threat assessment based on evidential networks, in: 10th International Conference on Information Fusion, 2007: pp. 1–8. <https://doi.org/10.1109/ICIF.2007.4408020>.
- [88] R.R. Yager, Generalized Dempster–Shafer Structures, *IEEE Transactions on Fuzzy Systems* 27 (2019) 428–435. <https://doi.org/10.1109/TFUZZ.2018.2859899>.
- [89] S. Kumar, B.K. Tripathi, Modelling of Threat Evaluation for Dynamic Targets Using Bayesian Network Approach, *Procedia Technology* 24 (2016) 1268–1275. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.protcy.2016.05.112>.
- [90] F. Johansson, G. Falkman, Implementation and integration of a bayesian network for prediction of tactical intention into a ground target simulator, in: 2006 9th International Conference on Information Fusion, 2006: pp. 1–7. <https://doi.org/10.1109/ICIF.2006.301605>.
- [91] F. Johansson, G. Falkman, A Bayesian network approach to threat evaluation with application to an air defense scenario, in: 2008 11th International Conference on Information Fusion, 2008: pp. 1–7. <https://doi.org/10.1109/ICIF.2008.4632368>.
- [92] N. Okello, G. Thorns, Threat assessment using bayesian networks, in: Sixth International Conference of Information Fusion, 2003. Proceedings of The, 2003: pp. 1102–1109. <https://doi.org/10.1109/ICIF.2003.177361>.

- [93] E. Azimirad, J. Haddadnia, Target threat assessment using fuzzy sets theory, *International Journal of Advances in Intelligent Informatics* 1 (2015) 47–74. <https://doi.org/https://doi.org/10.26555/ijain.v1i2.18>.
- [94] E. Azimirad, J. Haddadnia, A new model for threat assessment in data fusion based on fuzzy evidence theory, *International Journal of Advances in Intelligent Informatics* 2 (2016) 54–64. <https://doi.org/https://doi.org/10.26555/ijain.v2i2.56>.
- [95] Y. Xu, Y. Wang, X. Miu, Multi-attribute decision making method for air target threat evaluation based on intuitionistic fuzzy sets, *Journal of Systems Engineering and Electronics* 23 (2012) 891–897. <https://doi.org/10.1109/JSEE.2012.00109>.
- [96] P. Gonsalves, R. Cunningham, N. Ton, D. Okon, Intelligent threat assessment processor (ITAP) using genetic algorithms and fuzzy logic, in: *Proceedings of the Third International Conference on Information Fusion*, 2000: pp. 18–24. <https://doi.org/10.1109/IFIC.2000.859870>.
- [97] F. Johansson, G. Falkman, A Comparison between Two Approaches to Threat Evaluation in an Air Defense Scenario, in: *5th International Conference on Modeling Decisions on Artificial Intelligence (MDAI)*, 2008: pp. 110–121. https://doi.org/10.1007/978-3-540-88269-5_11.
- [98] X. Wang, J. Zuo, R. Yang, Z. Zhang, L. Yue, H. Liu, Target Threat Assessment Based on Dynamic Bayesian Network, *J Phys Conf Ser* 1302 (2019) 42023. <https://doi.org/10.1088/1742-6596/1302/4/042023>.
- [99] D. Koller, N. Friedman, *Probabilistic Graphical Models: Principles and Techniques*, MIT Press, Cambridge, Massachusetts, 2009.
- [100] F. Jensen, T. Nielsen, *Bayesian networks and decision graphs*, 2nd edition, Springer, New York, NY, 2007. <https://doi.org/https://doi.org/10.1007/978-0-387-68282-2>.
- [101] K. Murphy, *How to use the Bayes Net Toolbox*, *How to Use the Bayes Net Toolbox* (2007). <http://bayesnet.github.io/bnt/docs/usage.html> (accessed June 22, 2024).

- [102] J. Pearl, Probabilistic Reasoning in Intelligent Systems: Networks of Plausible Inference, Morgan Kaufmann Publishers Inc., San Francisco, CA, USA, 1988. <https://doi.org/10.5555/534975>.
- [103] D.L. Poole, A.K. Mackworth, Artificial Intelligence: Foundations of Computational Agents, 2nd edition, Cambridge University Press, 2017.
- [104] K. Murphy, Dynamic bayesian networks: representation, inference and learning, University of California, 2002. <https://ibug.doc.ic.ac.uk/media/uploads/documents/courses/DBN-PhDthesis-LongTutorail-Murphy.pdf> (accessed December 9, 2020).
- [105] A. Darwiche, Bayesian Networks, in: Foundations of Artificial Intelligence, 2008: pp. 467–509. [https://doi.org/10.1016/S1574-6526\(07\)03011-8](https://doi.org/10.1016/S1574-6526(07)03011-8).
- [106] U.B. Kjaerulff, A.L. Madsen, Bayesian Networks and Influence Diagrams: A Guide to Construction and Analysis, 2nd ed., Springer, New York, NY, 2013. <https://doi.org/https://doi.org/10.1007/978-1-4614-5104-4>.
- [107] A. Kolmogorow, Grundbegriffe der Wahrscheinlichkeitsrechnung, Zentralblatt Für Mathematik 2 (1933).
- [108] Y.-C. Chen, T.A. Wheeler, M.J. Kochenderfer, Learning Discrete Bayesian Networks from Continuous Data, Journal of Artificial Intelligence Research 59 (2017) 103–132. https://www.jair.org/index.php/jair/article/download/11063/26242/20586&ved=2ahUKEwiR89PdQ_KGAXVbhv0HHen7B5oQFnoECBEQAQ&usg=AOvVaw30Qz5buDOKamuL4nZhANO7 (accessed January 9, 2023).
- [109] C.J. Matheus, M.M. Kokar, K. Baclawski, A core ontology for situation awareness, in: Sixth International Conference of Information Fusion, 2003. Proceedings of The, 2003: pp. 545–552. <https://doi.org/10.1109/ICIF.2003.177494>.
- [110] J. Ye, S. Dobson, S. McKeever, Situation identification techniques in pervasive computing: A review, Pervasive Mob Comput 8 (2012) 36–66. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.pmcj.2011.01.004>.

- [111] A.L. Zobrist, A Model of Visual Organization for the Game of GO, in: Proceedings of the May 14-16, 1969, Spring Joint Computer Conference, ACM, New York, NY, USA, 1969: pp. 103–112. <https://doi.org/10.1145/1476793.1476819>.
- [112] S. Rabin, Game Ai Pro2: Collected wisdom of game AI professionals, 1st ed., A K Peters/CRC Press, 2015. <https://doi.org/10.1201/b18373>.
- [113] M.A. Frey, A. Schulte, Tactical situation modelling of MUM-T helicopter mission scenarios using influence maps, in: Conf Proc IEEE Int Conf Syst Man Cybern, Institute of Electrical and Electronics Engineers Inc., 2019: pp. 552–558. <https://doi.org/10.1109/SMC.2019.8914650>.
- [114] Global Terrorism Database, (n.d.). <https://www.start.umd.edu/gtd/> (accessed January 27, 2019).
- [115] A.T. Grogan, Creating a Spatial Analysis Model for Generating Composite Cost Surfaces to Depict Cross Country Mobility in Natural Terrain, in: ASPRS/MAPPS 2009 Conference, 2009.
- [116] M. Rybansky, A. Hofmann, M. Hubacek, V. Kovarik, V. Talhofer, The impact of terrain on cross-country mobility - Geographic factors and their characteristics, 18th International Conference of the ISTVS (2014).
- [117] R.G. Burgess, C.J. Darken, Realistic human path planning using fluid simulation, 2004. <https://apps.dtic.mil/sti/citations/ADA575052> (accessed August 8, 2022).
- [118] M.A. Frey, A. Schulte, Towards A Tactical UAV Assessment System to Support Transport Helicopter Crews in MUM-T Scenarios, in: IEEE Trans Syst Man Cybern Syst, Institute of Electrical and Electronics Engineers (IEEE), 2020: pp. 3206–3213. <https://doi.org/10.1109/SMC42975.2020.9283165>.
- [119] R. Onken, A. Schulte, System-Ergonomic Design of Cognitive Automation: Dual-Mode Cognitive Design of Vehicle Guidance and Control Work Systems, in: Studies in Computational Intelligence, Springer Berlin, Heidelberg, 2010. <https://doi.org/10.1007/978-3-642-03135-9>.

- [120] M.J. Kochenderfer, T.A. Wheeler, K.H. Wray, Algorithms for Decision Making, The MIT Press, 2022. <https://algorithmsbook.com/files/dm.pdf>.
- [121] B.K. Potluri, Algorithms for Decision Making: Optimization, Heuristics and Machine Learning, LinkedIn.Com (2020). <https://www.linkedin.com/pulse/algorithms-decision-making-optimization-heuristics-machine-potluri> (accessed November 23, 2022).
- [122] D. Braziunas, C. Boutilier, Elicitation of Factored Utilities, AI Mag 29 (2008) 79–92. <https://doi.org/https://doi.org/10.1609/aimag.v29i4.2203>.
- [123] S. Lloyd, Least squares quantization in PCM, IEEE Trans Inf Theory 28 (1982) 129–137. <https://doi.org/10.1109/TIT.1982.1056489>.
- [124] M.L. Puterman, Markov Decision Processes: Discrete Stochastic Dynamic Programming, John Wiley & Sons, Inc., 1994. <https://doi.org/10.1002/9780470316887>.
- [125] R. Bellman, Dynamic Programming, Revised ed. Edition, Princeton University Press, 2010.
- [126] W.T. Scherer, S. Adams, P.A. Beling, On the Practical Art of State Definitions for Markov Decision Process Construction, IEEE Access 6 (2018) 21115–21128. <https://doi.org/10.1109/ACCESS.2018.2819940>.
- [127] T.B. Sheridan, W.L. Verplanck, Human and Computer Control of Undersea Teleoperators, Cambridge, MA, 1978. <https://apps.dtic.mil/sti/citations/ADA057655> (accessed December 12, 2022).
- [128] S. Clauß, A. Schulte, Task delegation in an agent supervisory control relationship capability awareness in a cognitive agent, in: 2014 IEEE International Conference on Systems, Man, and Cybernetics (SMC), 2014: pp. 825–830. <https://doi.org/10.1109/SMC.2014.6974013>.
- [129] J. Uhrmann, A. Schulte, Concept, Design and Evaluation of Cognitive Task-based UAV Guidance, International Journal on Advances in Intelligent Systems 5 (2012) 145–158.
- [130] G. Rudnick, A. Schulte, Implementation of a Responsive Human Automation Interaction Concept for Task-Based-Guidance Systems, in: Engineering Psychology and Cognitive Ergonomics: Performance, Emotion and Situation Awareness, Springer, Cham, 2017: pp. 394–405. https://doi.org/10.1007/978-3-319-58472-0_30.

- [131] P. Hart, N. Nilsson, B. Raphael, A Formal Basis for the Heuristic Determination of Minimum Cost Paths, {IEEE} Transactions on Systems Science and Cybernetics 4 (1968) 100–107. <https://doi.org/10.1109/tssc.1968.300136>.
- [132] I. Chadès, G. Chapron, M.-J. Cros, F. Garcia, R. Sabbadin, MDPtoolbox: a multi-platform toolbox to solve stochastic dynamic programming problems, *Ecography* 37 (2014) 916–920. <https://doi.org/https://doi.org/10.1111/ecog.00888>.
- [133] M.A. Frey, A. Schulte, TacARA: Tactical Analysis and Reconnaissance Assistant to Support Pilots in MUM-T Scenarios, in: *AIAA SCITECH 2022 Forum*, 2022: p. 2437. <https://doi.org/https://doi.org/10.2514/6.2022-2437>.
- [134] A.H. Roscoe, G.A. Ellis, *A Subjective Rating Scale for Assessing Pilot Workload in Flight: A decade of Practical Use*, 1990.
- [135] J. Brooke, SUS: A “Quick and Dirty” Usability Scale, in: P.W. Jordan, B. Thomas, I.L. McClelland, B. Weerdmeester (Eds.), *Usability Evaluation in Industry*, 1st Editio, Taylor and Francis Group, 1996: pp. 189–194. <https://doi.org/https://doi.org/10.1201/9781498710411>.
- [136] D. Ullrich, S. Diefenbach, INTUI. Exploring the Facets of Intuitive Interaction, in: J. Ziegler, A. Schmidt (Eds.), *Mensch & Computer 2010: Interaktive Kulturen*, Oldenbourg Verlag, München, 2010: pp. 251–260.
- [137] M.A. Frey, J. Attmanspacher, A. Schulte, A Dynamic Bayesian Network and Markov Decision Process for Tactical UAV Decision Making in MUM-T Scenarios, in: *2022 IEEE Conference on Cognitive and Computational Aspects of Situation Management (CogSIMA)*, 2022: pp. 47–54. <https://doi.org/10.1109/CogSIMA54611.2022.9830690>.
- [138] J. Attmanspacher, *Taktischer Bedrohungsbewertungsassistent für MUM-T-Transporthubschraubermissionen*, Universität der Bundeswehr München, 2020.
- [139] S. Lange, M. Riedmiller, A. Voigtländer, Autonomous reinforcement learning on raw visual input data in a real world application, in: *The 2012 International Joint Conference on Neural Networks (IJCNN)*, 2012: pp. 1–8. <https://doi.org/10.1109/IJCNN.2012.6252823>.

- [140] N. Botteghi, R. Obbink, D. Geijs, M. Poel, B. Sirmacek, C. Brune, A. Mersha, S. Stramigioli, Low Dimensional State Representation Learning with Reward-shaped Priors, in: 2020 25th International Conference on Pattern Recognition (ICPR), 2021: pp. 3736–3743. <https://doi.org/10.1109/ICPR48806.2021.9412421>.
- [141] T. Lesort, N. Díaz-Rodríguez, J.-F. Goudou, D. Filliat, State representation learning for control: An overview, *Neural Networks* 108 (2018) 379–392. <https://doi.org/10.1016/j.neunet.2018.07.006>.
- [142] S. Thrun, W. Burgard, D. Fox, *Probabilistic Robotics (Intelligent Robotics and Autonomous Agents)*, The MIT Press, 2005. <https://doi.org/10.5555/1121596>.

A.1 IMPLEMENTIERUNGSDetails ZUM DBN

A.1.1 Knotenindexierung

Die Variable `order_nodes` beschreibt die Reihenfolge bzw. Indexierung der verwendeten Knoten. Dazu werden in der Variablen des Python-Datentyps `dict` die Knotenbezeichnungen der Nummerierung des Knotens zugeordnet. Die für diese Arbeit verwendeten Nummerierungen und Bezeichnungen können der Abbildung 3-5 entnommen werden und sind in Tabelle A-6-1 aufgelistet.

Knotenbezeichnung	Knotennummer	Knotenbezeichnung	Knotennummer
<code>target_type</code>	0	<code>capability</code>	9
<code>distance</code>	1	<code>movement</code>	10
<code>weapon_radius</code>	2	<code>affiliation</code>	11
<code>detection_radius</code>	3	<code>danger</code>	12
<code>speed</code>	4	<code>intent</code>	13
<code>direction</code>	5	<code>threat</code>	14
<code>terrain</code>	6		
<code>within_weapon_radius</code>	7		
<code>within_detection_radius</code>	8		

Tabelle A-6-1: Knotennummerierungen der im DBN verwendeten Knoten

A.1.2 Grenzwerte

Die Variable `node_values` enthält die gewünschten Grenzwerte der einzelnen Variablen. Bei `node_values` handelt es sich um ein verschachteltes `dict`. Jeder Knotenbezeichnung innerhalb des `dict` besitzt als Wert ein weiteres `dict`, in welchem den jeweiligen Bezeichnungen der diskreten Werte ihre Grenzwerte zugeordnet sind. Die Knotenbezeichnungen müssen dabei den Bezeichnungen in der Variablen `order_nodes` entsprechen. Einzige Ausnahme sind die Knoten “distance”, “speed” und “direction”, da diese unterschiedlichen Grenzwerte für Boden- und Lufteinheiten haben. Aus diesem Grund gibt es für diese Variablen jeweils zwei Einträge in `node_values`. Die Knotenbezeichnungen besitzen einmal das Suffix “_ground” bzw. “_air” für Boden- bzw. Lufteinheiten. Die Grenzwerte der einzelnen Variablen sind in Tabelle A-6-2 aufgelistet.

Knotenbezeichnung	Grenzwerte
target_type	'Person_gunner': 0, 'Person_manpad': 1, 'Jammer': 2, 'Jeep_gunner': 3, 'Jeep_manpad': 4, 'Tank': 5, 'SAM': 6
distance_ground	'far': float('inf'), 'medium': 20000, 'close': 2000, 'very close': 500
distance_air	'far': float('inf'), 'medium': 35000, 'close': 5000, 'very close': 2000
weapon_radius	'short': 1500, 'medium': 5000, 'long': float('inf')
detection_radius	'short': 3000, 'medium': 7500, 'long': float('inf')
speed_ground	'low': 10, 'medium': 20, 'high': float('inf')
speed_air	'low': 50, 'medium': 90, 'high': float('inf')
direction_ground	'away': float('inf'), 'along': 100, 'towards': 45
direction_air	'away': float('inf'), 'along': 90, 'towards': 35
terrain	'hindering': float('inf'), 'medium': 40, 'flat': 15
within_weapon_radius	'far': float('inf'), 'surrounding': 4, 'close': 2, 'within': 1
within_detection_radius	'far': float('inf'), 'surrounding': 4, 'close': 2, 'within': 1
capability	'low': 0, 'medium': 1, 'high': 2
movement	'irrelevant': 0, 'considerable': 1, 'relevant': 2
affiliation	'Neutral': 0, 'Unknown': 1, 'Enemy': 2
danger	'low': 0, 'medium': 1, 'high': 2
intent	'low': 0, 'medium': 1, 'high': 2
threat	'false': 0, 'true': 1

Tabelle A-6-2: Grenzwerte für die einzelnen Knoten des DBN

A.2 MATRIX ZUR BESCHREIBUNG MÖGLICHER VERWECHSELUNGEN VON EINHEITENTYPEN

Die folgende Matrix (siehe Tabelle A-6-3) beschreibt die möglichen Verwechslungen von Einheitentypen. Dabei gilt, dass der Wert des Einheitentyps in der Variablen `target_type` der Spalte/Zeile in der Matrix entspricht.

	0 (Person_gunner)	1 (Person_manpad)	2 (Jammer)	3 (Jeep_gunner)	4 (Jeep_manpad)	5 (Tank)	6 (SAM)
0 (Person_gunner)	1	1	0	0	0	0	0
1 (Person_manpad)	1	1	0	0	0	0	0
2 (Jammer)	0	0	1	1	1	0	0
3 (Jeep_gunner)	0	0	1	1	1	0	0
4 (Jeep_manpad)	0	0	1	1	1	0	0
5 (Tank)	0	0	0	0	0	1	0
6 (SAM)	0	0	0	0	0	0	1

Tabelle A-6-3: Matrix mit Angabe der Verwechslungsmöglichkeiten von Einheitentypen. Verwechslungsmöglichkeiten sind mit 1 gekennzeichnet, ansonsten 0.

A.3 IMPLEMENTIERTER IM-TREE

Abbildung A-6-1 zeigt den Aufbau des verwendeten IM-Trees. Die Grünen Knoten sind Kombinerungsalgorithmusknoten (CA) und die blauen rechteckigen Kästen stellen IMs/DMs dar. Die gelben Kästen sind Berechnungsmodelle oder Datencontainer, aus denen Informationen herausgezogen werden, um die Blattknoten bzw. IMs mit Daten zu befüllen. Dabei können diese Berechnungsmodelle weiterhin auf bestimmte Informationen zurückgreifen, die als gelbe Kreise dargestellt sind.

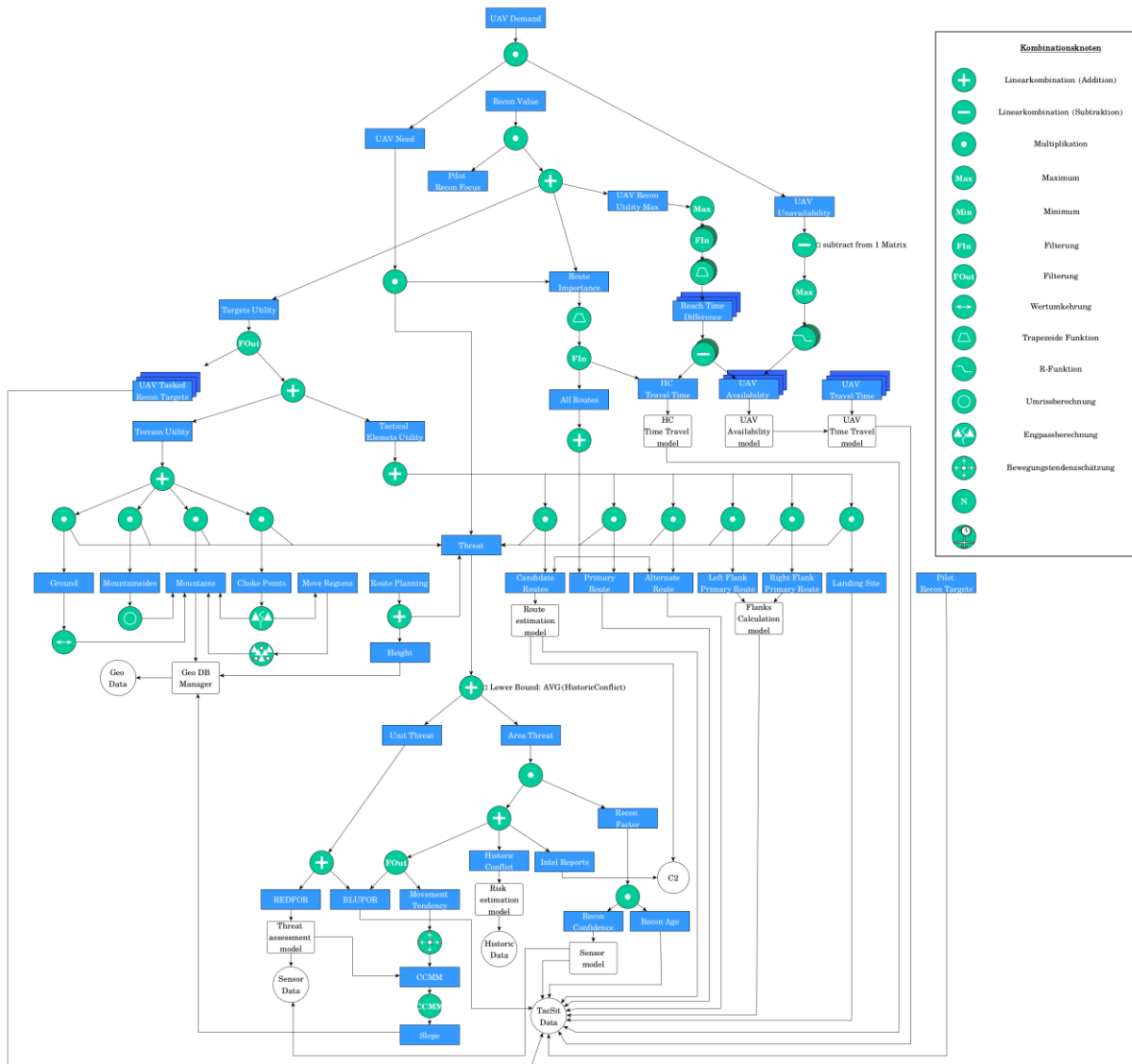


Abbildung A-6-1: IM-Tree

A.4 TABELLE FÜR DIE BERECHNUNG DES WAFFENSCHWEREGRADES BEI HISTORISCHEN KONFLIKTEN

Zur Berechnung des Bedrohungswerts eines historischen Konflikts werden die Anzahl der Opfer mit einem Waffenschadensausmaß linear kombiniert. Der Wert für das Waffenschadensausmaß ergibt sich aus den Waffentypen, die in dem Konflikt von gegnerischer Seite zum Einsatz gekommen sind. Für einen möglichen Waffentyp w wurde geschätzt, wie hoch in etwa die Trefferwahrscheinlichkeit $p(h \vee w)$ gegenüber einem Helikopter h ist und diese mit einem ebenfalls geschätzten Schadenswert d_w multipliziert. Die verwendeten Werte für die unterschiedlichen Waffentypen sind in Tabelle Tabelle A-6-4 aufgelistet.

Dabei sind Waffentypen, für die die gleichen Werte gewählt wurden in einem Zeileneintrag mit Komma separiert zusammengefasst (siehe erste Spalte). Es wurden die gleichen Bezeichnungen genommen, wie sie auch in der GTD ("GTD, Global Terrorism Database," n.d.) verwendet werden.

w	$p(h \vee w)$	d_w	$p(h \vee w)d_w$	Kommentar
Poisoning, blunt object, hands, fists, feet, sharp objects, ropes	0.0	0.0	0.0	Annahme ist, dass von diese Waffentypen keine Gefahr für den Helikopter darstellen
Handgun	0.08	5	0.4	Annahme ist, dass eine Handfeuerwaffe nur geringen Schaden am Helikopter anrichtet
Rifle/Shotgun	0.3	10	3.0	Annahme ist, dass ein Gewehr eine höhere Trefferwahrscheinlichkeit hat und mehr Schaden verursacht als eine Handfeuerwaffe
Automatic, Semi-Automatic Rifle	0.5	20	10.0	Annahme ist, dass mit einer (halb-)automatischen Feuerwaffe mehr Schaden angerichtet werden kann als mit einer nicht automatischen Feuerwaffe (siehe Rifle/Shotgun)
landmine, vehicle, suicide	0.05	100	5.0	Eine Landmine, Fahrzeug bzw. Selbstmordkommando kann für den Helikopter in den meisten Fällen nur gefährlich werden, wenn sich dieser am Boden befindet. Daher wird eine geringe Trefferwahrscheinlichkeit angenommen, allerdings ein hoher Schadenswert, da ein solcher Treffer fatale Folgen hat
unknown gun type, grenade, projectiles, other explosives	0.8	100	80.0	stellt den höchsten Wert dar. Dieser wird bei einem unbekanntem Waffentyp als Worst-Case-Scenario angenommen
all others	0.5	50	25.0	Für alle nicht aufgelisteten Waffentypen wird ein Standardwert gesetzt

Tabelle A-6-4: Verwendete Tabelle zur Berechnung des Waffenschweregrads bei historischen Konflikten

A.5 ALGORITHMEN

A.5.1 Propagierungsfunktion

Eingabe sind die Ursprungsposition e , der Wert an der Ursprungszelle t_{x_s,y_s} , die maximale Distanz bzw. Radius d_m , sowie die IM, auf die sich die Werte beziehen. Der letzte Parameter, PropFunc, gibt eine Funktion an, die das Verhalten der Propagierung bestimmt. Sie wird genutzt, um den resultierenden Einflusswert für eine Zelle zu berechnen, in Abhängigkeit von der Distanz zur Ursprungszelle, dem maximalen Radius und dem Ursprungswert.

Algorithm A-1: Creating/Updating Influence Maps

```

1  def CreateOrUpdateIM( $e$ ,  $t_{x_s,y_s}$ ,  $d_m$ ,  $IM_i$ , PropFunc):
2       $IM_i[e.x][e.y] := t_{x_s,y_s}$ 
3      stack := [e]
4      visited := empty collection
5      while length of stack > 0:
6          c := stack.pop()
7          for all neighbours n of c:
8              d := Dist(c, n)
9              if n is not visited and  $d \leq d_m$ :
10                  $IM_i[n.x][n.y] := IM_i[n.x][n.y] + \text{PropFunc}(t_{x_s,y_s}, d, d_m)$ 
11                 visited := Append(visited, n)
12                 stack := Append(stack, n)

```

A.5.2 Bestimmung Zellposition für Pfadsuche von Aufklärungszielen

Algorithm A-2: Selection of Cell Position

```

1  def SelectCellPos( $c_{curr}$ , ns,  $IM_{cm}$ ,  $IM_{pref}$ , prevDir):
    # Select next path candidate according to priority of same
    # preferred cell type and same direction as the path already
    # follows
2  preferred:=GetCellsGreaterThan(ns,  $IM_{pref}$ , 0.0)
3   $c_{sel}$ :=Empty
4  if Size(preferred) > 0:
5      if IsEmpty(prevDir):
6          # Choose the cell position that follows the helicopter
6          # flight route
6           $c_{sel}$ :=SelectCellPosFollowingHCRout(e(preferred)
7      else:
8          for prefNeighbour in preferred:
9              if GetDirectionForCell( $c_{curr}$ , prefNeighbour)==prevDir):
10                  $c_{sel}$ :=prefNeighbour
11                 Finish For Loop
12             if IsEmpty( $c_{sel}$ ):
13                  $c_{sel}$ :=SelectMaxValueCellPos(preferred,  $IM_{cm}$ )
14  return  $c_{sel}$ 

```

A.5.3 Bestimmung von UAV-Positionen

Algorithm A-3: Re-Position Determination

```

1  def DetermineRePos (uavs,  $\mathfrak{S}_D$ , poshc, tacSitModel, step):
2      demandCenters := GetClusterCenters (IMD)
3      centerPosOpRanges := CalcOperationRangeCenters (uavs)
4      repositions := empty collection
5      for uav in uavs:
6          vhc, vopRange, vuavDemand := CalcVectors (uav.pos, poshc,
7              centerPosOpRanges[uav], demandCenters)
8          Whc, WopRange, WuavDemand := GetUAVRePosWeightFactors (uav)
9          posChange := step (Whc * vhc + WopRange * vopRange + WuavDemand *
10             vuavDemand)
11             newPos := AddPosChange (uav.pos, posChange)
12             repositions := Append (repositions, newPos)
13     return repositions

```

A.5.4 Bestimmung von Aufklärungsplänen

Algorithm A-4 : Recon Plans Generation

```

1  def GenerateReconPlans (uavRecLst, uavs, numRecPlans):
2      filterUavRecLst := Filter (lambda x:x.utilVal <= 0, uavRecLst)
3      sortUavRecLst := Sort (lambda x:x.utilVal, filterUavRecLst)
4      allRecPlans := empty collection
5      while Size(sortUavRecLst) > 0:
6          recPlan := empty collection
7          for i in uavs:
8              tup := PopNextOccurrence (sotUavRecLst, i)
9              if tup:
10                 recPlan := Append (recPlan, tup)
11             allRecPlans := Append (allRecPlans, recPlan)
12     bestRecPlans := GetHighestUtilValRecPlans (allRecPlans,
13         numRecPlans)
14     return bestRecPlans

```

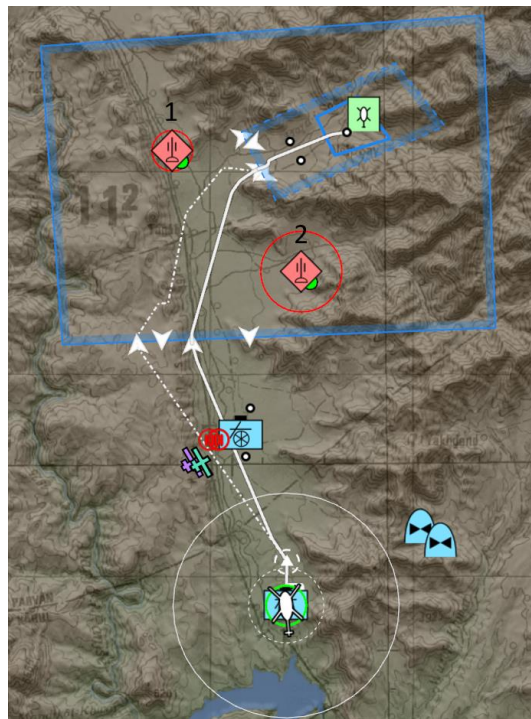
B EXPERIMENT - BEDROHUNGS- UND FEINDANALYSE

In diesem Anhang befinden sich die Missionsszenarien und Fragebögen, die für das Experiment zur Evaluation des Agentensystems unter Verwendung eines MDP für den Entscheidungsprozess (siehe Kap. 5.3) verwendet wurden.

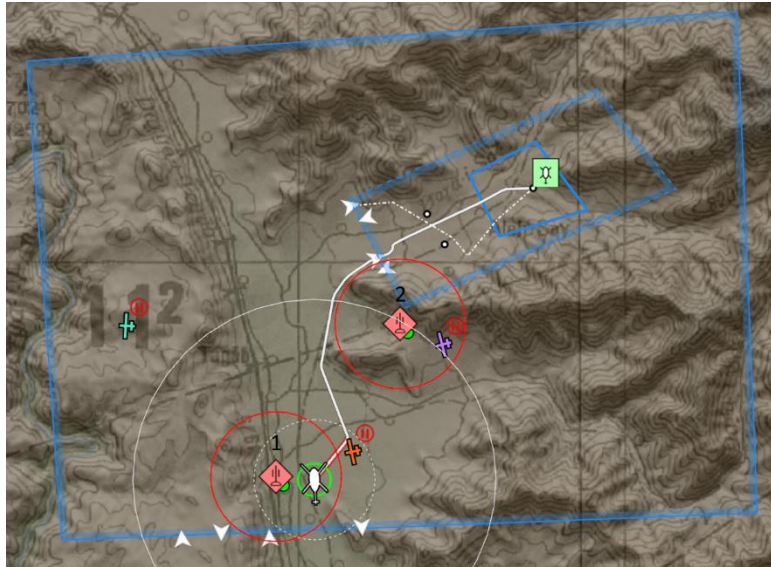
B.1 MISSIONSSZENARIEN

Insgesamt wurden 13 Missionsszenarien für die Lagebeurteilung erstellt. Sechs Lagen wurde für den ersten Teil des Experiments verwendet, bei dem die Probanden die Bedrohungsbewertung und taktische Entscheidung über den UAV-Einsatz alleine vornahmen. Im zweiten Teil wurden den Probanden sieben Lagen präsentiert, in dem sie die Ergebnisse des Agentensystems beurteilen sollten. In den folgenden Unterkapiteln werden die einzelnen Lagen für den ersten und den zweiten Teil des Experiments abgebildet und die jeweiligen Zusatzinformationen angegeben.

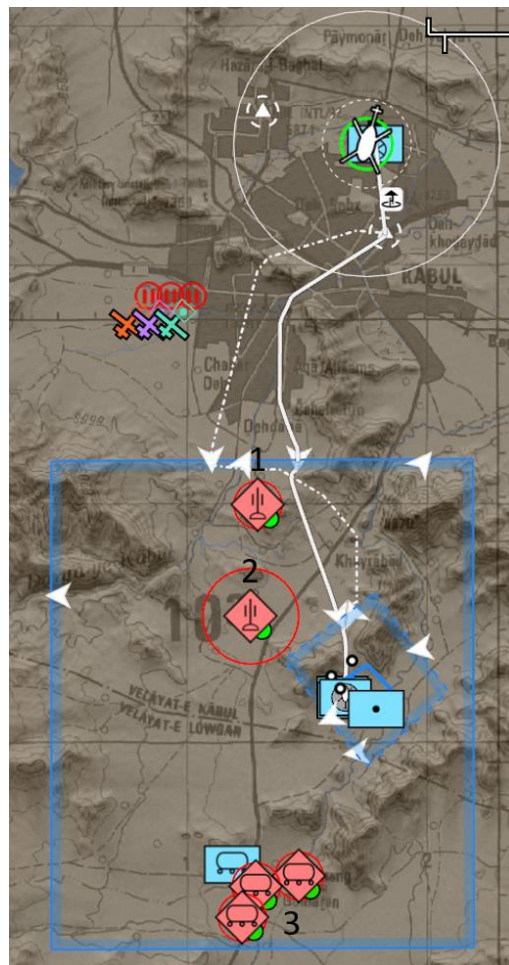
B.1.1 Missionsszenarien für Experiment Teil 1



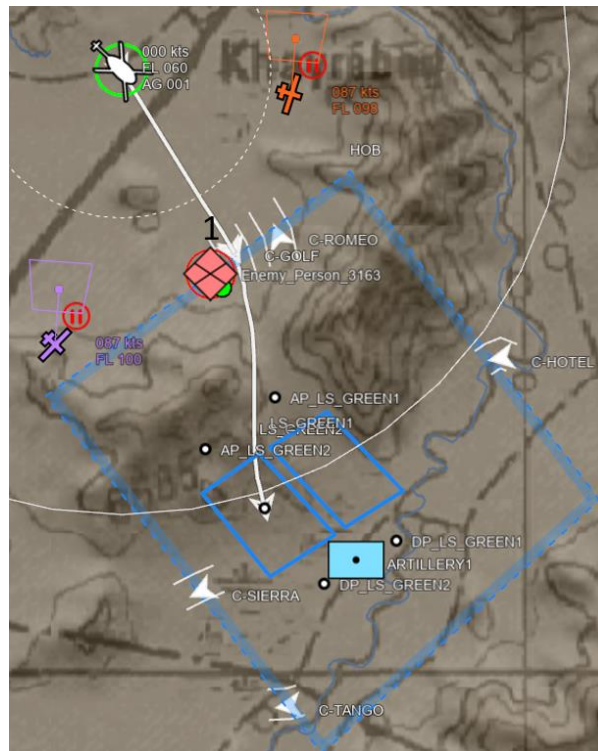
Teil 1, Szenario 1 **Zusatzinformation:** keine weiteren Informationen



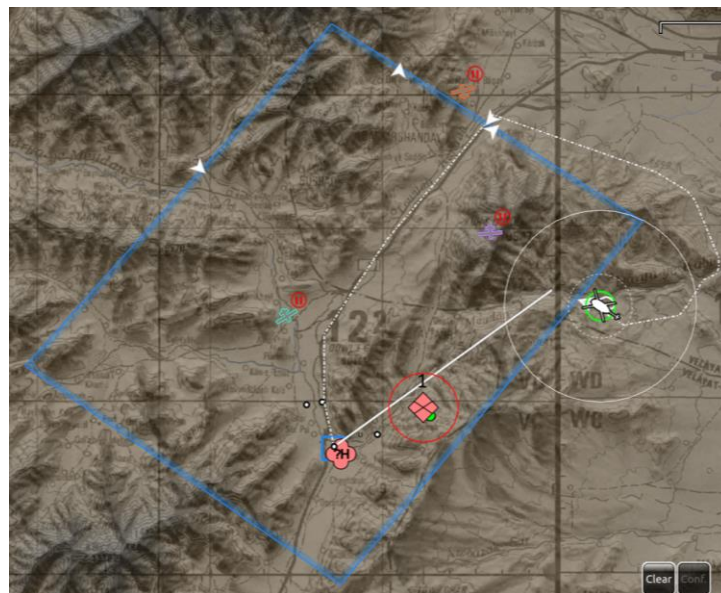
Teil 1, Szenario 2 **Zusatzinformation:** keine weiteren Informationen



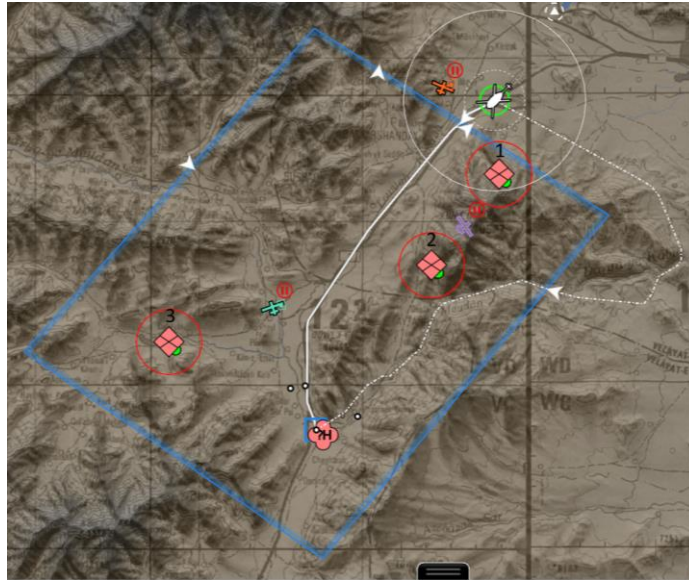
Teil 1, Szenario 3 **Zusatzinformation:** keiner der militärischen Gegner wurde in den letzten 15 Minuten aufgeklärt



Teil 1, Szenario 4 **Zusatzinformation:** militärischer Gegner wurde vor ca. 7 Minuten aufgeklärt

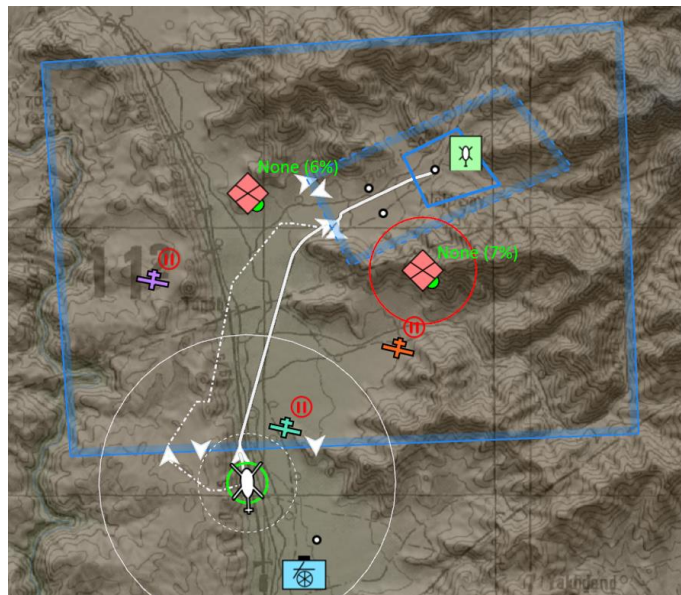


Teil 1, Szenario 5 **Zusatzinformation:** militärischer Gegner wurde vor ca. 10 Minuten zum ersten Mal aufgeklärt mit einer relativ hohen Unsicherheit der Aufklärungsergebnisse

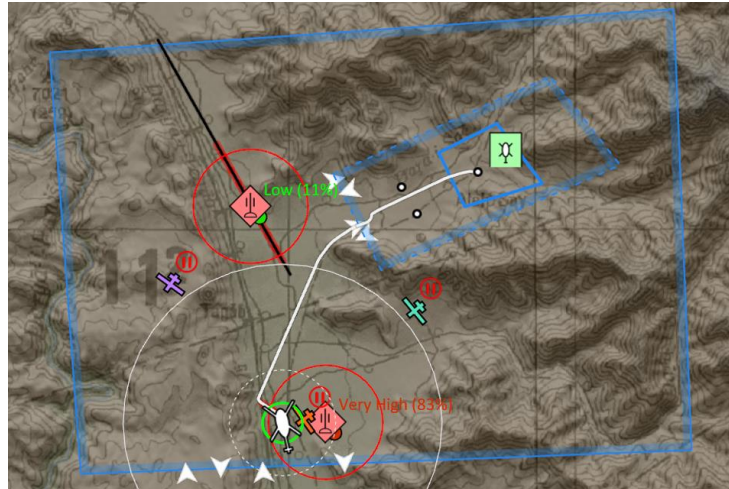


Teil 1, Szenario 6 **Zusatzinformation:** militärischer Gegner 1 wurde zuletzt vor ca. 1 Minute zum dritten Mal aufgeklärt, militärischer Gegner 2 wurde zuletzt vor ca. 8 Minuten zum ersten Mal aufgeklärt, militärischer Gegner 3 wurde seit mehr als 15 Minuten nicht mehr aufgeklärt

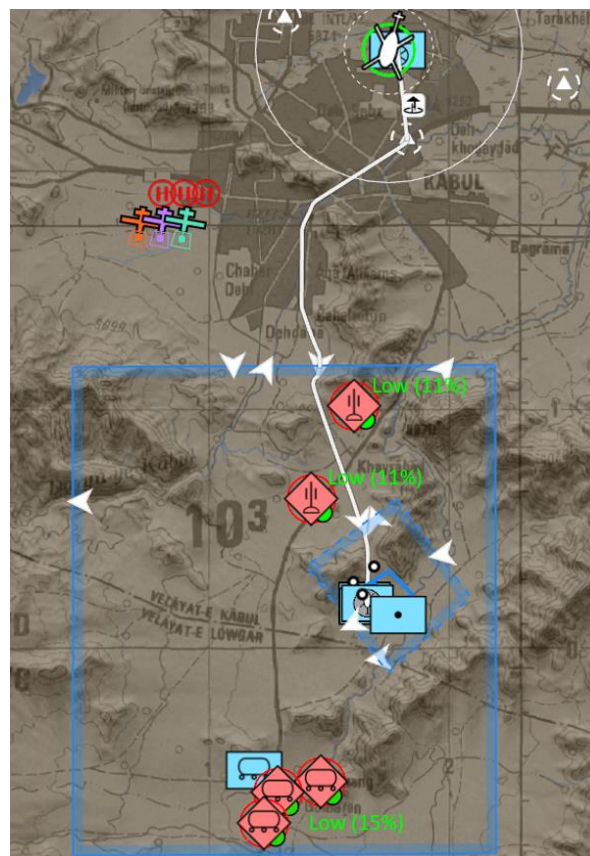
B.1.2 Missionsszenarien für Experiment Teil 2



Teil 2, Szenario 1 **Zusatzinformation:** militärischer Gegner links (Bedrohungsgrad 6%) wurde zuletzt vor ca. 8 Minuten aufgeklärt, militärischer Gegner rechts (Bedrohungsgrad 7%) wurde zuletzt vor ca. 11 Minuten aufgeklärt **Aktion des Agenten:** Mit UAV1 militärischen Gegner rechts aufklären, mit UAV2 militärischen Gegner links aufklären

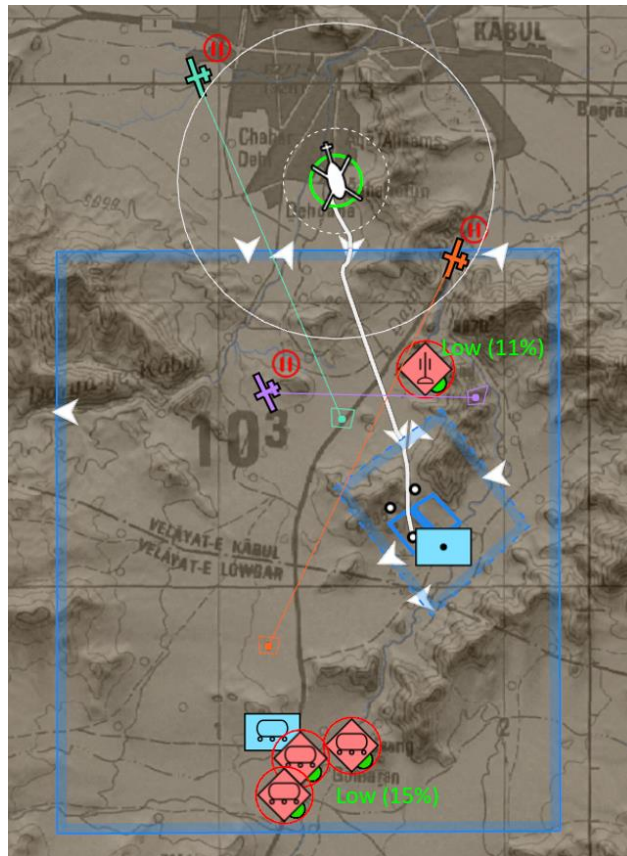


Teil 2, Szenario 2 **Zusatzinformation:** oberer militärischer Gegner (Bedrohungsgrad 11%) wurde zuletzt vor ca. 2 Minuten aufgeklärt, unterer militärischer Gegner (Bedrohungsgrad 83%) wurde zuletzt vor mehr als 15 Minuten aufgeklärt **Aktion des Agenten:** Nichts tun

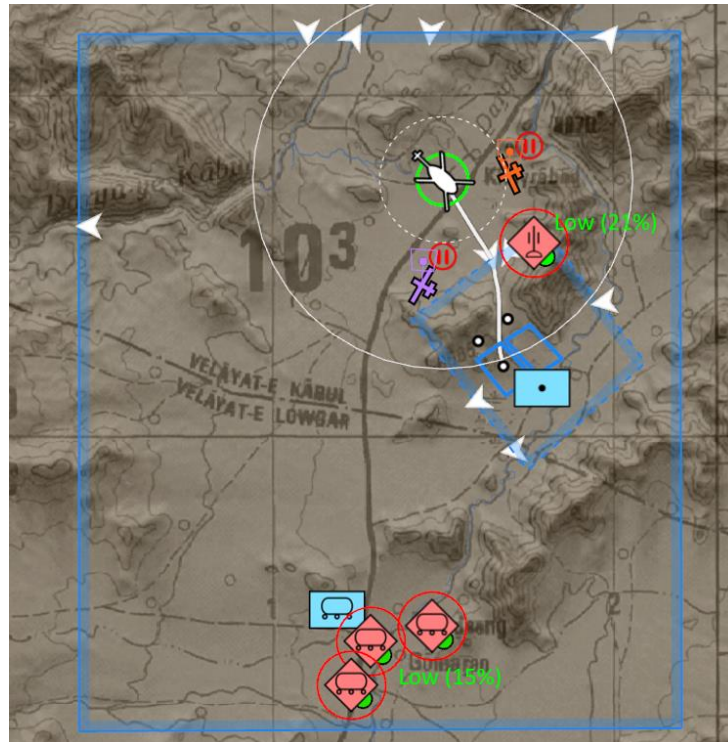


Teil 2, Szenario 3 **Zusatzinformation:** keine der militärischen Gegner in den letzten 15 Minuten aufgeklärt **Aktion des Agenten:** Mit UAV3 den mittleren militärischen Gegner (Bedrohungsgrad 11%, welcher näher

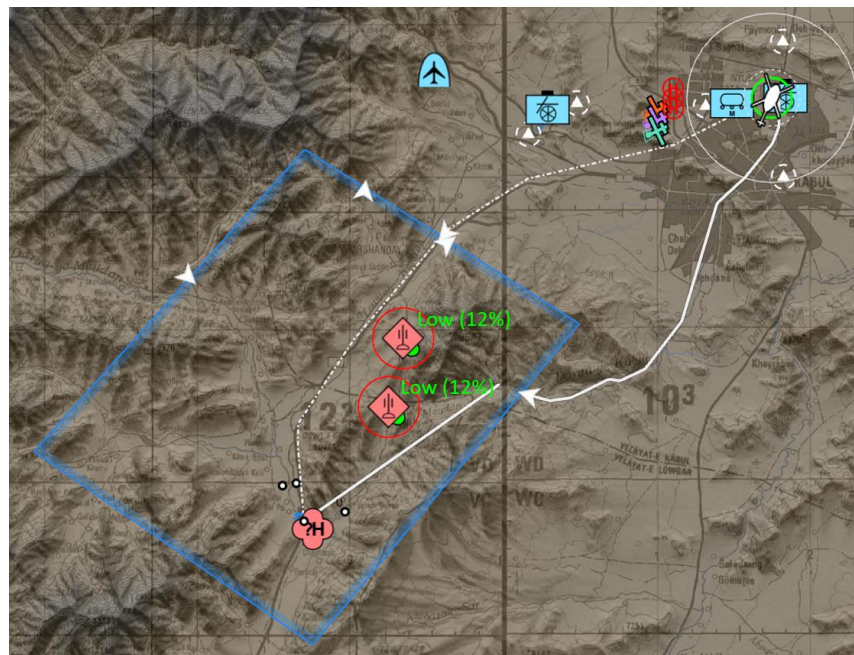
an der Landezone lokalisiert ist) aufklären, mit UAV2 den oberen militärischen Gegner (Bedrohungsgrad 11% nahe des Einflugpunkts in die HOA) aufklären



Teil 2, Szenario 4 **Zusatzinformation:** oberer militärischer Gegner (Bedrohungsgrad 11%) wurde zuletzt vor ca. 5 Minuten aufgeklärt **Aktion des Agenten:** Nichts tun

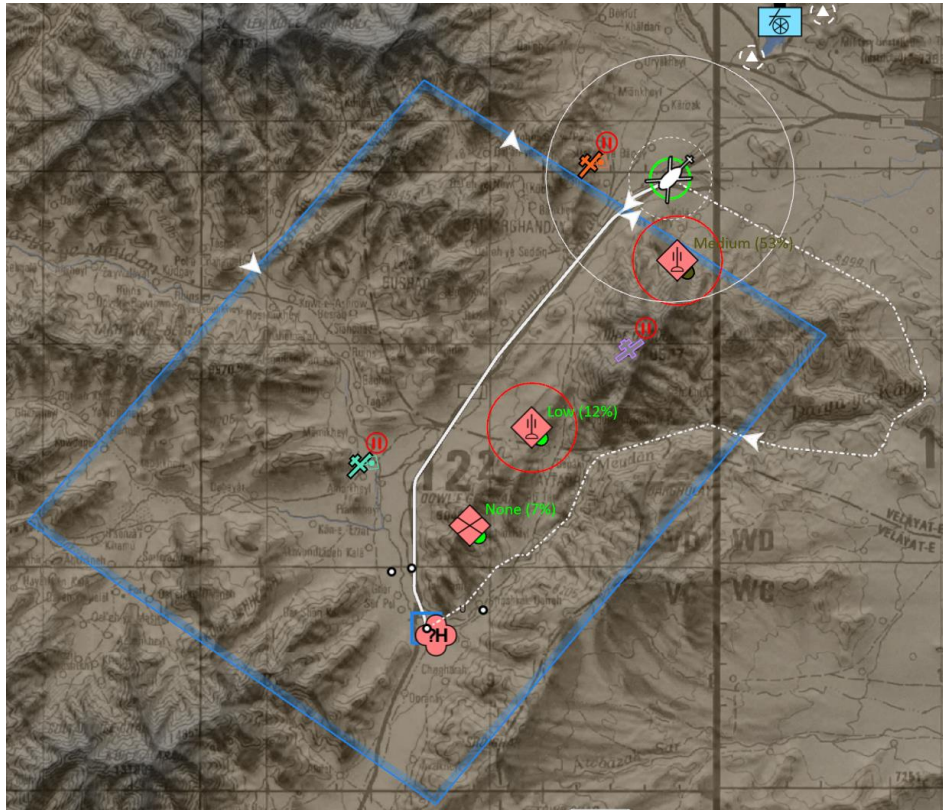


Teil 2, Szenario 5 **Zusatzinformation:** oberer militärischer Gegner (Bedrohungsgrad 21%) wurde zuletzt vor ca. 10 Minuten aufgeklärt **Aktion des Agenten:** Route neu planen



Teil 2, Szenario 6 **Zusatzinformation:** keine militärischen Gegner wurden in den letzten 15 Minuten aufgeklärt **Aktion des Agenten:** Mit UAV3 oberen militärischen Gegner (Bedrohungsgrad 12%, der näher

zu dem Hubschrauber lokalisiert ist) aufklären, mit UAV2 den unteren militärischen Gegner (Bedrohungsgrad 12%, der weiter weg vom Hubschrauber lokalisiert ist) aufklären



Teil 2, Szenario 7 **Zusatzinformation:** Oberer militärischer Gegner (Bedrohungsgrad 53%) wurde in den letzten 15 Minuten nicht aufgeklärt, mittlerer militärischer Gegner (Bedrohungsgrad 12%) wurde zuletzt vor ca. 7 Minuten aufgeklärt, unterer militärischer Gegner (Bedrohungsgrad 7%) wurde zuletzt vor mehr als 15 Minuten aufgeklärt **Aktion des Agenten:** mit UAV2 den mittleren militärischen Gegner aufklären

B.2 FRAGEBÖGEN

Im Folgenden werden die Fragebögen präsentiert, die bei dem Experiment für die Bedrohungs- und Feindanalyse (siehe Kap. 5.3) genutzt wurden. Insgesamt gibt es vier verschiedene Fragebögen. Der erste Fragebogen (Allgemeine Frage) wurde vor Beginn der Lagebeurteilungen, der Fragebogen mit der Bezeichnung “Fragen zu Szenario (I 1)” im ersten Teil des Experiments nach jeder Lagebeurteilung und der Fragebogen mit der Bezeichnung “Fragen zu Szenario (II 1)” im zweiten Teil des Experiments nach jeder Lagebeurteilung gestellt. Bei jeder Lage wurden entsprechend des Experimentteils dieselben Fragen gestellt. Neben den allgemeinen Fragen, die vorab gestellt wurden, wurden nach Ende aller Lagebeurteilungen abschließenden Fragen an die Probanden gestellt (Bezeichnung “Allgemeine Fragen danach”).

Bedrohungsbewertungsassistent

Allgemeine Frage:

- 1 Welche Erfahrungen haben Sie im Bereich Bedrohungsbewertung (z.B. Strategiespiele, Arbeit, ...)?

- 2 Welche Informationen sind für Sie bei der Bedrohungsbewertung entscheidend?

Kreuzen Sie die entscheidenden Informationen an, unterstreichen Sie die drei Wichtigsten.

- | | |
|------------------------------------------------------|--------------------------------------------------------------------|
| <input type="checkbox"/> Geschwindigkeit | <input type="checkbox"/> Geschwindigkeit |
| <input type="checkbox"/> Name | <input type="checkbox"/> Aufklärungsradius |
| <input type="checkbox"/> Waffenradius | <input type="checkbox"/> Dienstgrad |
| <input type="checkbox"/> Innerhalb Aufklärungsradius | <input type="checkbox"/> Innerhalb Waffenradius |
| <input type="checkbox"/> Gelände | <input type="checkbox"/> Feind Typ/Waffentyp |
| <input type="checkbox"/> Alter | <input type="checkbox"/> Entfernung |
| <input type="checkbox"/> Bewegungsrichtung | <input type="checkbox"/> Gesinnung (feindlich, unbekannt, neutral) |
| <input type="checkbox"/> Sonstiges: _____ | |

Fragen zu Szenario (I 1):

- 1 Einschätzung der Bedrohung des Feindes auf den Helikopter

	Feind 1	Feind 2
Keine		
Niedrig		
Mittel		
Hoch		
Sehr hoch		

- 2 Welcher Routenabschnitt ist in ihren Augen am stärksten bedroht?

- 3 Welche Informationen fehlen Ihnen, um eine Bedrohungsbewertung durchzuführen?

- 4 Welche Aktion würde sie in dieser Situation durchführen? O kein Handlungsbedarf

- kein Handlungsbedarf
- Route neu planen
- UAV aussenden -> vgl. Tabelle

	UAV 1 (orange)	UAV 2 (lila)	UAV 3 (blau)
Feind 1			
Feind 2			

- 5 Was ist der Ausschlaggebende Faktor für Ihre Entscheidung?

Fragen zu Szenario (II 1):

1 Stimmen Sie dem vorgeschlagenen Bedrohungsgrad zu?

Ja

Nein, zu hoch

Nein, zu niedrig

2 Würden Sie die vorgeschlagene Aktion so ausführen?

Ja

Nein, weil _____

Allgemeine Fragen danach:

1 Welche Informationen wurden tatsächlich verwendet, um die Bedrohung zu bewerten?

2 Sind die verwendeten Einflussfaktoren und deren grobe Gewichtung für Sie zweckmäßig?

Ja

Nein, weil _____

3 Welche Informationen fehlen zum Nachvollziehen der Systementscheidung?

4 In welchen Lagen/zu welchen Zeitpunkten sollte sich der grundlegende Bedrohungsgrad ändern?

5 Wie sehr haben Sie dem System vertraut?

6 Half das System Ihnen zu einem besseren Überblick über die Situation und damit eine schnellere Beurteilung der Lage und der Handlung?

C EXPERIMENT - BEWERTUNG DES ASSISTENZSYSTEMS

In diesem Anhang ist im Folgenden zunächst das allgemeine Briefing angehängt, welches vor Beginn der Missionsvignetten den Piloten zur Einführung gezeigt wurde. Anschließend wird beispielhaft das Missionsbriefing “Basic Instinct” (M-Sit-1-1) vorgestellt. Die jeweiligen Missionsbriefings hatten alle den gleichen Aufbau und wurden den Probanden zur Einführung der Mission unmittelbar vor der Missionsdurchführung präsentiert.

C.1 MISSIONSVIGNETTEN

Für die Evaluation des Agentensystems im Hubschraubersimulator wurden sechs Missionen verwendet, die paarweise eine ähnliche Situation abbilden und im Folgenden vorgestellt werden. Die Textabschnitte beschreiben die Abläufe der jeweiligen Missionen. Damit die Missionsdurchgänge über die Probanden hinweg besser vergleichbar waren, wurden die Probanden angehalten sich an vordefinierte Flugrouten zu halten. Diese wurden in den jeweiligen Briefings beschrieben. In wenigen Ausnahmefällen kam es zu Abweichungen von dem geplanten Flugplan, doch wurde die logische Abfolge der Missionen dadurch nicht verändert. Der Hubschrauber trägt den Codenamen BOOMER und wird über Funk und in den Briefings so bezeichnet. Der Codename, der bei Funksprüchen der Versuchsleiter an die Crew des Hubschraubersimulators genutzt wurde, ist GALACTICA. Die Primärflugrouten sind als durchgezogene blaue Linien dargestellt. Alternativrouten werden über gepunktete Linien dargestellt. Meldepunkte, über die die jeweiligen Routen gelegt werden sollten, sind als blaue Dreiecksmarkierungen in der taktischen Lage eingetragen.

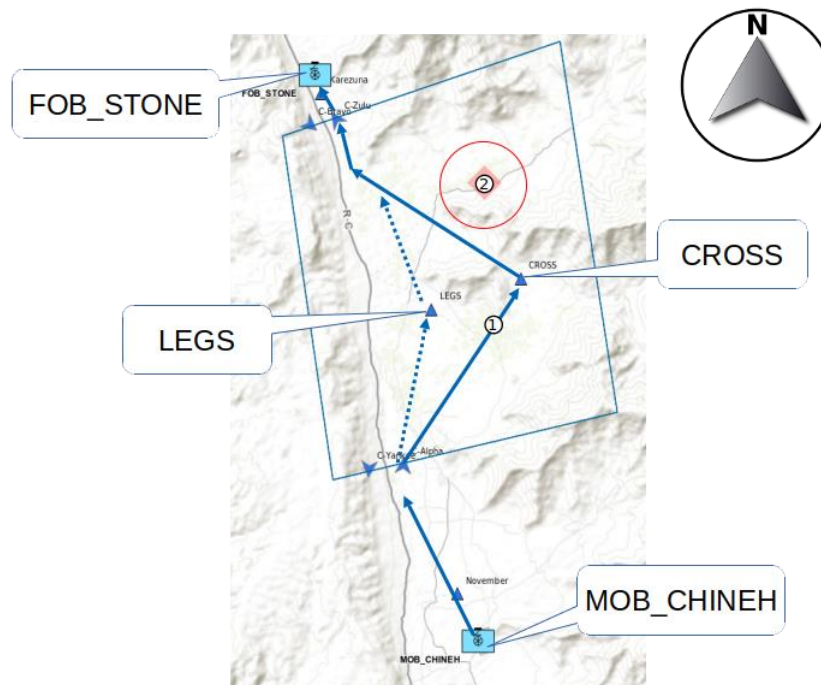
C.1.1 Trainingsmission

C.1.2 Mission M-1-1: Basic Instinct

- **Lage:** Im Norden Tagabs in der Nähe von Kazula wird derzeit eine neu Forward Operating Base (FOB) aufgebaut mit dem Codenamen STONE. Es werden Ingenieure und IT-Fachleute benötigt, um beim Aufbau zu helfen. Das benötigte Personal hat den Codenamen SHARON.
- **Auftrag:** BOOMER transportiert das Fachpersonal SHARON vom Stützpunkt MOB_CHINEH zum Außenposten FOB_STONE. Feindkontakt ist zu vermeiden.
- **Durchführung:** BOOMER startet in MOB_CHINEH, fliegt über den Einflugkorridor in die HOA ein und folgt der Primärflugroute zum Zielort FOB_STONE. Um Bedrohungshotspots in Tagab zu umfliegen erfolgt der Flugweg über den Meldepunkt CROSS. Sollte die Primärroute blockiert sein,

fliegen Sie eine Alternativroute über den Meldepunkt LEGS (gepunktete Route). Sobald BOOMER an FOB_STONE angekommen ist, wird die Einheit SHARON dort entladen.

- **Ablauf:** Sobald der Hubschrauber Punkt (1) passiert hat, wird folgende Funkmeldung ausgegeben: “BOOMER. GALACTICA. We have received reports about enemy activities nearby your primary flight route on the east. The estimated location of the enemies is marked on your map”. Gleichzeitig wird an Punkt (2) ein Feind in die Karte gesetzt, dessen Bedrohungsradius die Primärroute aber nicht schneidet.



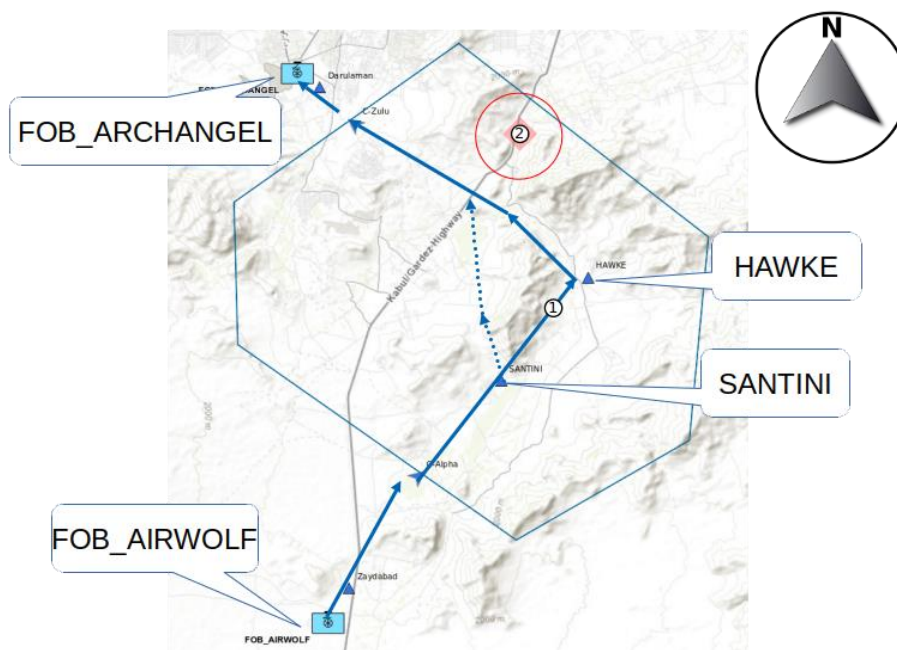
Taktische Lage und Missionsablauf der Mission M-1-1 (Basic Instinct)

C.1.3 Mission M-1-2: Blue Airwolf

- **Lage:** In der letzten Zeit gab es rund um Kabul vermehrt terroristische Aktivitäten. Zur besseren Absicherung sollen deswegen neuartige kleine Überwachungsdrohnen unsere Bodentruppen in der urbanen Umgebung unterstützen. Der Codename dieser kleinen Drohnen ist AIRWOLFS.
- **Auftrag:** BOOMER transportiert die Drohnen AIRWOLFS vom Stützpunkt FOB_AIRWOLF zum Außenposten FOB_ARCHANGEL. Feindkontakt ist zu vermeiden.
- **Durchführung:** BOOMER startet in FOB_AIRWOLF, fliegt über den Einflugkorridor in die HOA ein und folgt der Primärflugroute zum Zielort FOB_STONE. Um Bedrohungshotspots entlang des

Kabul Gardes Highways zu umfliegen erfolgt der Flugweg über den Meldepunkt HAWKE hinter den Bergen. Sollte die Primärroute blockiert sein, fliegen Sie eine Alternativroute über den Meldepunkt SANTINI (gepunktete Route). Sobald BOOMER an FOB_ARCHANGEL angekommen ist, wird die Einheit AIRWOLFS dort entladen.

- **Ablauf:** Sobald der Hubschrauber Punkt (1) passiert hat, wird folgende Funkmeldung ausgegeben: “BOOMER. GALACTICA. We have received reports about enemy activities nearby your primary flight route on the north east. The estimated location of the enemies is marked on your map”. Gleichzeitig wird an Punkt (2) ein Feind in die Karte gesetzt, dessen Bedrohungsradius die Primärroute aber nicht schneidet.



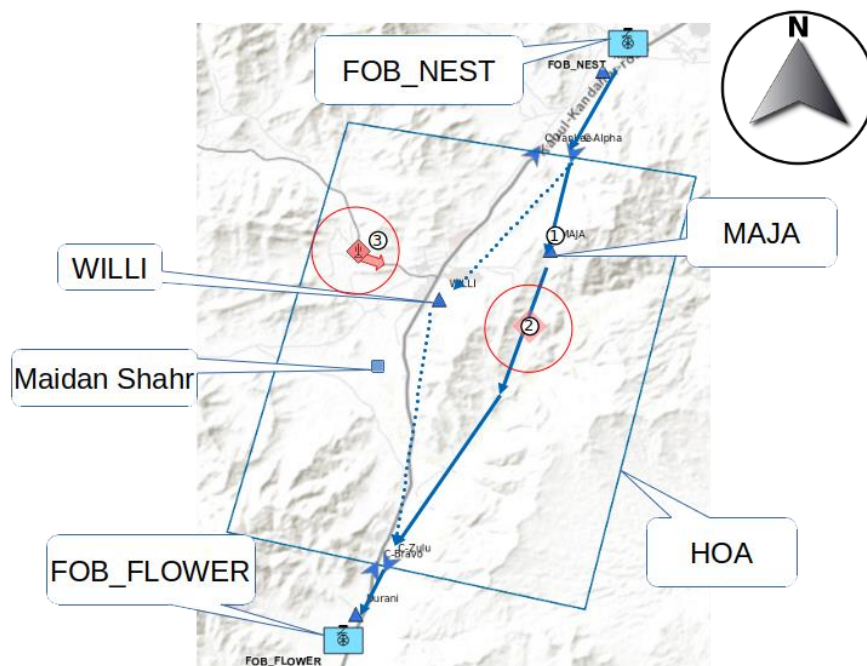
Taktische Lage und Missionsablauf der Mission M-1-2 (Blue Airwolf)

C.1.4 Mission M-2-1: Fire Bee

- **Lage:** Zur Verstärkung eines Außenpostens soll eine Einheit mit dem Codenamen RATCEN von FOB_NEST zu FOB_FLOWER transportiert werden.
- **Auftrag:** BOOMER transportiert die Einheit RATCEN von FOB_NEST zum Außenposten FOB_FLOWER. Feindkontakt ist zu vermeiden.
- **Durchführung:** BOOMER startet in FOB_NEST, fliegt über den Einflugkorridor in die HOA ein und folgt der Primärflugroute zum Zielort FOB_FLOWER. Um Bedrohungshotspots um die Stadt Maidan

Shahr zu umfliegen erfolgt der Flugweg über den Meldepunkt MAJA hinter den Bergen. Sollte die Primärroute blockiert sein, fliegen Sie eine Alternativroute über den Meldepunkt WILLI (gepunktete Route). Sobald BOOMER an FOB_FLOWER angekommen ist, wird die Einheit RATCEN dort entladen.

- Ablauf:** Sobald der Hubschrauber entweder den gesetzten (nicht in der taktischen Karte eingezeichneten) Feind bei Punkt (2) durch den Einsatz der UAVs aufgeklärt hat oder spätestens, nachdem der Hubschrauber Punkt (1) passiert hat und folgende Funkmeldung ausgegeben wurde: “BOOMER. GALACTICA. We have received reports about enemy activities on your primary flight route. The estimated location of the enemies is marked on your map. Replan your flight route”, erfolgt durch die Crew des Hubschraubers eine Umplanung auf die Alternativroute über den Meldepunkt WILLI. Gleichzeitig wird an Punkt (2) ein Feind in die Karte auf die Primärroute gesetzt, sofern dieser nicht durch die UAVs direkt aufgeklärt wurde.

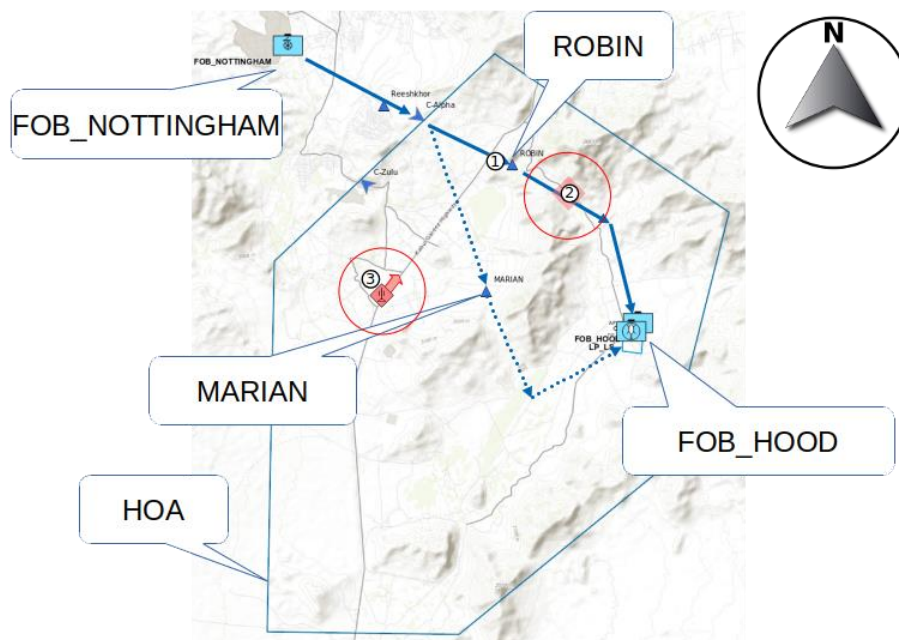


Taktische Lage und Missionsablauf der Mission M-2-1 (Fire Bee)

C.1.5 Mission M-2-2: Blue Arrow

- Lage:** Der Außenposten FOB_HOOD hatte in letzter Zeit viele Gefechte mit dem Feind und braucht dringend Munitionsnachschub.

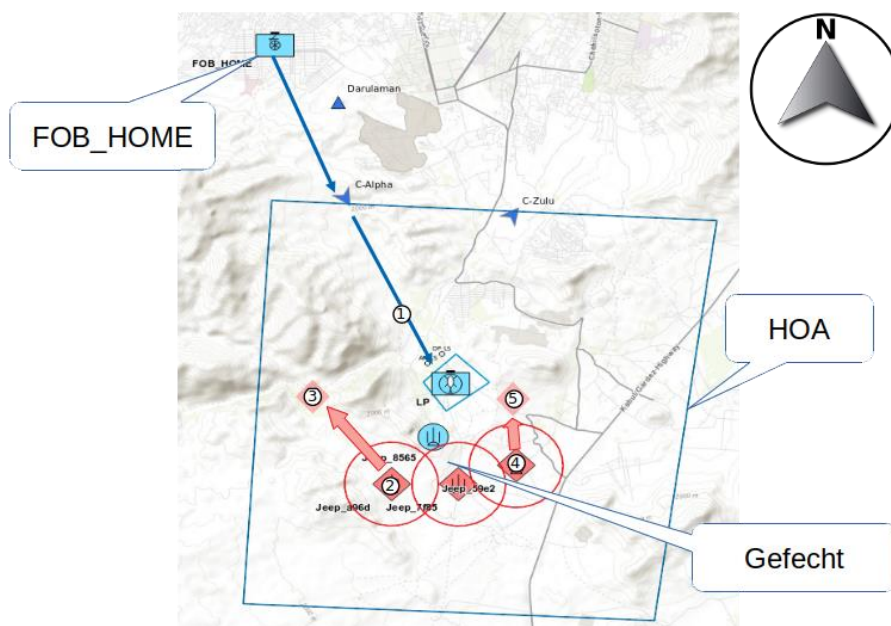
- **Auftrag:** BOOMER transportiert die Munition von FOB_NOTTINGHAM zum Außenposten FOB_HOOD. Feindkontakt ist zu vermeiden.
- **Durchführung:** BOOMER startet in FOB_NOTTINGHAM, fliegt über den Einflugkorridor in die HOA ein und folgt der Primärflugroute zum Zielort FOB_HOOD. Um Bedrohungshspots entlang des Kabul Gardez Highways zu umfliegen erfolgt der Flugweg über den Meldepunkt ROBIN. Sollte die Primärroute blockiert sein, fliegen Sie eine Alternativroute über den Meldepunkt MARIAN (gepunktete Route). Sobald BOOMER an FOB_HOOD angekommen ist, wird die Munition dort entladen.
- **Ablauf:** Sobald der Hubschrauber entweder den gesetzten (nicht in der taktischen Karte eingezeichneten) Feind bei Punkt (2) durch den Einsatz der UAVs aufgeklärt hat oder spätestens, nachdem der Hubschrauber Punkt (1) passiert hat und folgende Funkmeldung ausgegeben wurde: “BOOMER. GALACTICA. We have received reports about enemy activities on your primary flight route. The estimated locations of the enemies are marked on your map. Replan your flight route”, erfolgt durch die Crew des Hubschraubers eine Umplanung auf die Alternativroute über den Meldepunkt WILLI. Gleichzeitig wird an Punkt (2) ein Feind in die Karte auf die Primärroute gesetzt, sofern dieser nicht durch die UAVs direkt aufgeklärt wurde.



Taktische Lage und Missionsablauf der Mission M-2-2 (Blue Arrow)

C.1.6 Mission M-3-1: Heat

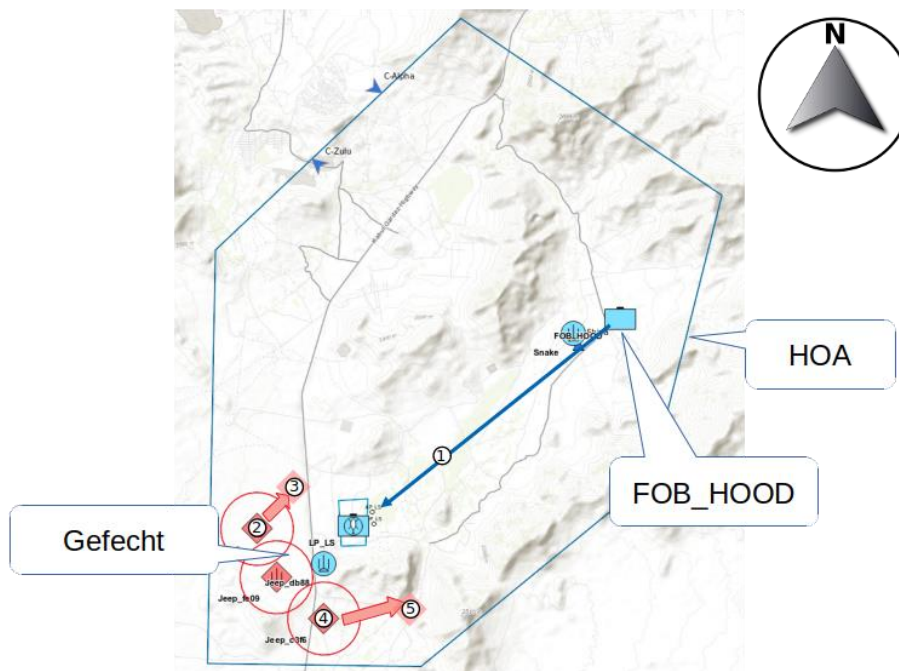
- **Lage:** Ein wichtiger Informant, der sensible Daten über den Feind besitzt und sein Leben in Gefahr sieht bat um Hilfe. Er wurde von einer unserer Einheiten aufgenommen und sollte zu unserem Stützpunkt eskortiert werden. Auf dem Weg dorthin sind sie jedoch in einen Hinterhalt geraten und wurden von feindlichen Einheiten eingekesselt. Der Informant darf nicht sterben und muss sofort evakuiert werden.
- **Auftrag:** BOOMER startet in FOB_HOME und evakuiert den Informanten aus Gefechtszone. Feindkontakt ist zu vermeiden.
- **Durchführung:** BOOMER startet in FOB_HOME und fliegt direkt zur Abholzone in der Nähe des Gefechts. BOOMER lädt Informant ein und evakuiert diesen nach FOB_HOME. Sichern Sie den Anflugweg sowie die Landezone durch die zur Verfügung stehenden UAVs.
- **Ablauf:** Sobald der Hubschrauber Punkt (1) passiert hat (ca. 2000 m von der Landezone entfernt), werden die Positionen der gegnerischen Einheiten bei Punkt (2) und (4) aktualisiert auf Position bei Punkt (3) bzw. Punkt (4) (siehe Pfeilrichtung in der Abbildung zur taktischen Lage M-3-1 (Heat)) und folgende Funkmeldung ausgegeben: “BOOMER. GALACTICA. We have received updates about enemy positions. The new positions are updated on your map.”



Taktische Lage und Missionsablauf der Mission M-3-1 (Heat)

C.1.7 Mission M-3-2: Blue Angel

- **Lage:** Eine Patrouille unserer Streitkräfte wurde in ein Feuergefecht verwickelt. Es gibt Verletzte, die sofort evakuiert werden müssen.
- **Auftrag:** BOOMER startet in FOB_HOOD und evakuiert verletzte Einheiten aus Gefechtszone. Feindkontakt ist zu vermeiden.
- **Durchführung:** BOOMER startet in FOB_HOOD und fliegt direkt zur Abholzone in der Nähe des Gefechts. BOOMER lädt verletzte Soldaten ein und evakuiert diese nach FOB_HOOD. Sichern Sie den Anflugweg sowie die Landezone durch die zur Verfügung stehenden UAVs.
- **Ablauf:** Sobald der Hubschrauber Punkt (1) passiert hat (ca. 2000 m von der Landezone entfernt), werden die Positionen der gegnerischen Einheiten bei Punkt (2) und (4) aktualisiert auf Position bei Punkt (3) bzw. Punkt (4) (siehe Pfeilrichtung in der Abbildung der taktischen Lage M-3-2 (Blue Angel)) und folgende Funkmeldung ausgegeben: “BOOMER. GALACTICA. We have received updates about enemy positions. The new positions are updated on your map.”



Taktische Lage und Missionsablauf der Mission M-3-2 (Blue Angel)

C.2 ALLGEMEINES BRIEFING

Institute of Flight Systems
IFS

Allgemeines über Lage und Hintergrund

Aerospace Engineering Department
Institute of Flight Systems
Rheinisch-Westfälische Technische Hochschule Aachen University

Institute of Flight Systems
IFS

Hintergrund

- Afghanistan ist im Jahr 2025 noch immer nicht befreit. Feindliche Kräfte kontrollieren weite Gebiete.
- Sie sind Kommandant eines *unbewaffneten* Transporthubschraubers mit dem Codenamen **BOOMER**

Aerospace Engineering Department
Institute of Flight Systems
Rheinisch-Westfälische Technische Hochschule Aachen University

2

Institute of Flight Systems
IFS

Generelle Feindlage

- In allen Missionen ist die Ausgangslage feindlicher Kräfte identisch
- Es ist mit mobilen Kämpfern mit folgender Ausstattung und Bewaffnung zu rechnen:
 - Aufgerüstete Geländefahrzeuge TOYOTA HILUX
 - MANPADS und Handfeuerwaffen
 - Die Bedrohung durch MANPADS überwiegt.



Aerospace Engineering Department
Institute of Flight Systems
Rheinisch-Westfälische Technische Hochschule Aachen University

3

Institute of Flight Systems
IFS

Aufgaben während Missionsdurchführung

- In den folgenden Missionen ist ihre Primäraufgabe die Absicherung Ihrer Flugroute zum Missionsziel durch den Einsatz von zur Verfügung stehenden Unmanned Aerial Vehicles (UAVs)
- Die UAVs sind *unbewaffnet* und dienen zur Aufklärung
- Nutzen Sie die UAVs um eine möglichst hohe Gewissheit zur Sicherheit über die gewünschten Gebiete zur Absicherung der Flugroute zu erlangen
- Sie können dem Piloten taktische Flugbefehle geben, z.B.:
 - Geschwindigkeitsanpassung
 - Zirkeln (Im Kreis fliegen)
 - Flughöhe anpassen
- Sollten Sie auf eine Alternativroute umplanen wollen, löschen Sie die Primärroute zunächst, bevor sie mit der Alternativroutenplanung beginnen
- Weichen Sie von Ihrer geplanten Flugroute nicht zu weit ab! Der Helikopter sollte immer entlang einer Flugroute fliegen
 - Kleinere Abweichungen sind erlaubt

Aerospace Engineering Department
Institute of Flight Systems
Rheinisch-Westfälische Technische Hochschule Aachen University

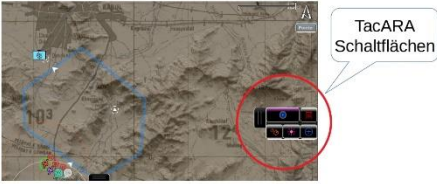
4

Institute of Flight Systems

IFS

TacARA

- In manchen Missionen wird Ihnen "**Tactical Analysis and Reconnaissance Assistant**" (TacARA) zur Verfügung stehen, um Sie bei der taktischen Situationsbewertung und dem UAV-Einsatz zu unterstützen
- Sie erkennen es, wenn die Kontrollelemente am rechten Rand auf der taktischen Karte verfügbar sind
 - Die Versuchsleiter werden Sie ebenfalls darauf hinweisen



- Beachten Sie, dass sich TacARA stets bei der Unterstützung an der Primärflugroute orientiert und die Bewertung nur entlang dieser vornimmt

Aerospace Engineering Department
Institute of Flight Systems
RWTH Aachen University, Aachen

5

C.3 BEISPIELBRIEFING

Institute of Flight Systems
IFS

Mission: Basic Instinct

Aerospace Engineering Department
 Institute of Flight Systems
 Headquarters University of Munich

Institute of Flight Systems
IFS Lage

Hintergrund:

- Im Norden Tagabs in der Nähe von Kazula wird derzeit eine neue Forward Operating Base (FOB) aufgebaut mit dem Codenamen **STONE**
- Es werden Ingenieure und IT-Fachleute benötigt, um beim Aufbau zu helfen
- Das benötigte Personal hat den Codenamen **SHARON**

Aerospace Engineering Department
 Institute of Flight Systems
 Headquarters University of Munich

2

Institute of Flight Systems
IFS Auftrag und Eigene Lage

Auftrag

- BOOMER transportiert Fachpersonal **SHARON** vom Stützpunkt **MOB_CHINEH** zum Außenposten **FOB_STONE**.
- Feindkontakt ist zu vermeiden

Eigene Lage

- Das Gebiet innerhalb der HOA ist als feindlich eingestuft
- Einsatzunterstützung: 3 unbewaffnete UAVs (in eigener Verantwortung) für Aufklärungszwecke

Aerospace Engineering Department
 Institute of Flight Systems
 Headquarters University of Munich

3

Institute of Flight Systems
IFS Intelligence

- In und um Tagab kam es in der Vergangenheit vermehrt zu Konflikten durch Terroristen
- Die vergangenen Konflikte sind auf der Karte eingezeichnet (rote Punkte)
- Besonders in der Region um Tagab wurden Projektilwaffen eingesetzt

Aerospace Engineering Department
 Institute of Flight Systems
 Headquarters University of Munich

5

Institute of Flight Systems

IFS

Durchführung – Eigene Absicht

- BOOMER startet in MOB_CHINEH und fliegt über den Einflugkorridor C-Alpha in die HOA ein
- BOOMER folgt der **Primären Flugroute** zum Zielort **FOB_STONE**
- Um die Bedrohungshotspots in Tagab zu umfliegen erfolgt der Flugweg über Meldepunkt **CROSS**
- Sollte die Primärroute blockiert sein, fliegen Sie eine Alternativroute über den Meldepunkt **LEGS** (gepunktete Route)
- UAVs werden eingesetzt, um Aufklärungsschwerpunkte aufzuklären und Flugweg dadurch abzusichern
- BOOMER entlädt die Einheit **SHARON** bei **FOB_STONE**

FOB_STONE

CROSS

LEGS

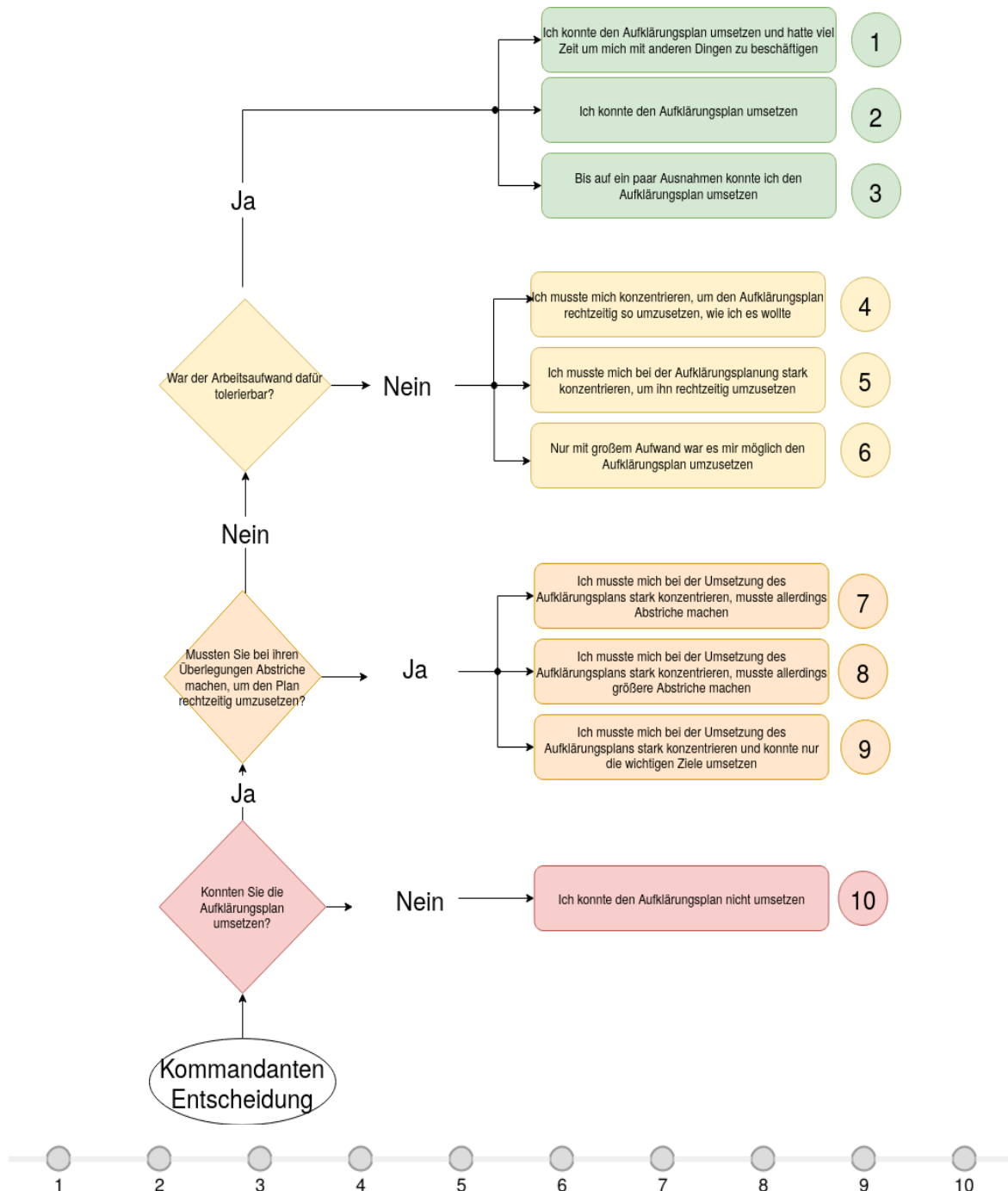
MOB_CHINEH

Aerospace Engineering Department
Institute of Flight Systems
Humboldt-Universität zu Berlin

6

C.4 FRAGEBOGEN - NACH ABSCHLUSS EINER MISSION

Einschätzung der mentalen Auslastung



Wie hoch schätzen Sie den Aufwand ein, Aufklärungspläne (setzen von Aufklärungsschwerpunkten und/oder UAV-Aufgabenvergabe) umzusetzen? Starten Sie links unten am Knoten 'Kommandanten Entscheidung' und gehen Sie entsprechend Ihrer Einschätzung den Kanten entlang und wählen Sie anschließend unten die Zahl aus.

Bewertung des Szenarios

Die Simulation war...



Das Szenario war...



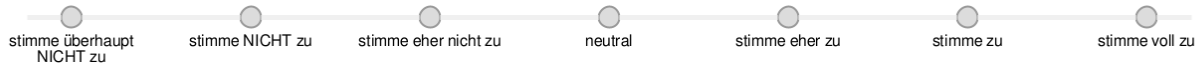
Wie bewerten Sie die Schwierigkeit des Szenarios?



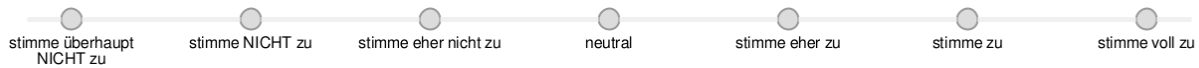
C.5 FRAGEBOGEN – DEBRIEFING

Bewerten Sie die allgemeine Bedien-/Benutzbarkeit des Assistenzsystems

Ich finde, dass die verschiedenen Funktionen des Systems gut integriert sind



Ich empfinde die Bedienung als sehr umständlich



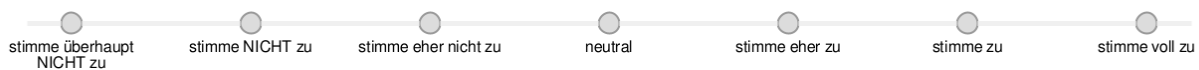
Ich habe mich bei der Nutzung des Systems sehr sicher gefühlt



Ich musste eine Menge Dinge lernen, bevor ich mit dem System arbeiten konnte



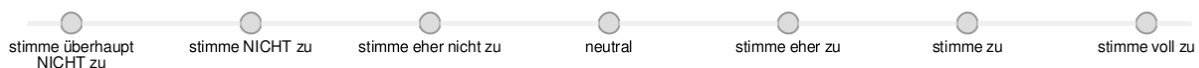
Ich empfinde das System als einfach zu nutzen



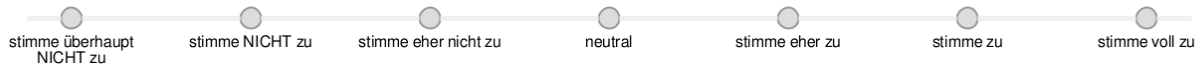
Ich kann mir vorstellen, dass die meisten Leute das System schnell zu beherrschen lernen



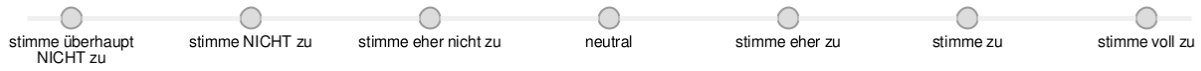
Ich empfinde das System als unnötig komplex



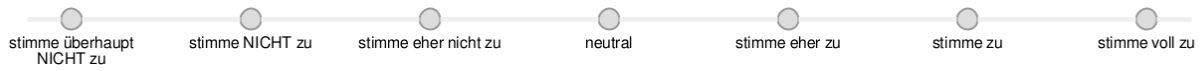
Ich denke, dass ich technischen Support brauchen würde, um das System zu nutzen



Ich kann mir sehr gut vorstellen, das System regelmäßig zu nutzen

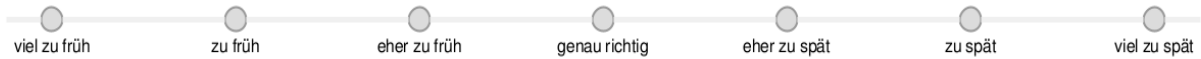


Ich finde, dass es im System zu viele Inkonsistenzen gibt

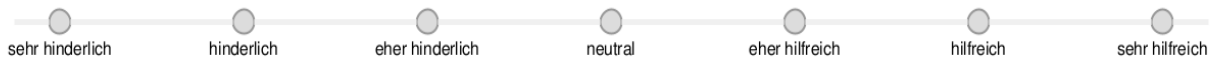


Bewerten Sie die Interventionen und Assistenzdialoge des Systems

Die Hinweise auf mögliche Gefahren kamen vom System ...



Wie bewerten Sie die Interventionen des Systems generell in den Situationen ...



Der Unterstützungsgrad vom System zu einer Situation war ...



Ich Die manuelle Anforderungsmöglichkeit zur erhöhten Unterstützung für das angesprochene Problem war ...



Ich habe länger nachdenken müssen, um zu verstehen, worauf das System mich aufmerksam machen wollte



Beschreiben Sie Ihr Erleben der Nutzung mit Hilfe der folgenden Ausgangspaare. Die Paare stellen extreme Gegensätze dar, zwischen denen eine Abstufung möglich ist. Geben Sie an, welcher Begriff Ihrer Meinung nach eher zutrifft.

Bei der Nutzung des Systems/Die Nutzung des Systems ...

handelte ich spontan	<input type="radio"/> <input type="radio"/> <input type="radio"/> <input type="radio"/> <input type="radio"/> <input type="radio"/> <input type="radio"/>	handelte ich spontan
erreichte ich mein Ziel nur mit Anstrengung	<input type="radio"/> <input type="radio"/> <input type="radio"/> <input type="radio"/> <input type="radio"/> <input type="radio"/> <input type="radio"/>	erreichte ich mein Ziel mit Leichtigkeit
handelte ich unbewusst, ohne lange über die einzelnen Schritte nachzudenken	<input type="radio"/> <input type="radio"/> <input type="radio"/> <input type="radio"/> <input type="radio"/> <input type="radio"/> <input type="radio"/>	führte ich bewusst einen Schritt nach dem anderen aus
ließ ich mich von meinem Verstand leiten	<input type="radio"/> <input type="radio"/> <input type="radio"/> <input type="radio"/> <input type="radio"/> <input type="radio"/> <input type="radio"/>	ließ ich mich von meinem Gefühl leiten
war ich orientierungslos	<input type="radio"/> <input type="radio"/> <input type="radio"/> <input type="radio"/> <input type="radio"/> <input type="radio"/> <input type="radio"/>	konnte ich mich gut zurechtfinden
handelte ich ohne dabei nachzudenken	<input type="radio"/> <input type="radio"/> <input type="radio"/> <input type="radio"/> <input type="radio"/> <input type="radio"/> <input type="radio"/>	konnte ich jeden Schritt genau begründen
erforderte viel Aufmerksamkeit	<input type="radio"/> <input type="radio"/> <input type="radio"/> <input type="radio"/> <input type="radio"/> <input type="radio"/> <input type="radio"/>	ging wie von selbst
war einfach	<input type="radio"/> <input type="radio"/> <input type="radio"/> <input type="radio"/> <input type="radio"/> <input type="radio"/> <input type="radio"/>	war schwierig
sehr intuitiv	<input type="radio"/> <input type="radio"/> <input type="radio"/> <input type="radio"/> <input type="radio"/> <input type="radio"/> <input type="radio"/>	gar nicht intuitiv
fiel mir leicht	<input type="radio"/> <input type="radio"/> <input type="radio"/> <input type="radio"/> <input type="radio"/> <input type="radio"/> <input type="radio"/>	fiel mir schwer

Wie haben Sie sich bei der Nutzung gefühlt?

Bei der Nutzung des Systems ...

war begeistert	<input type="radio"/> <input type="radio"/> <input type="radio"/> <input type="radio"/> <input type="radio"/> <input type="radio"/> <input type="radio"/>	war unbedeutend
war nichts besonderes	<input type="radio"/> <input type="radio"/> <input type="radio"/> <input type="radio"/> <input type="radio"/> <input type="radio"/> <input type="radio"/>	war ein magisches Erlebnis
war belanglos	<input type="radio"/> <input type="radio"/> <input type="radio"/> <input type="radio"/> <input type="radio"/> <input type="radio"/> <input type="radio"/>	war mitreißend
war faszinierend	<input type="radio"/> <input type="radio"/> <input type="radio"/> <input type="radio"/> <input type="radio"/> <input type="radio"/> <input type="radio"/>	war trist
habe ich mich unsicher gefühlt	<input type="radio"/> <input type="radio"/> <input type="radio"/> <input type="radio"/> <input type="radio"/> <input type="radio"/> <input type="radio"/>	habe ich mich sicher gefühlt
habe ich die Benutzerschnittstelle gerne bedient	<input type="radio"/> <input type="radio"/> <input type="radio"/> <input type="radio"/> <input type="radio"/> <input type="radio"/> <input type="radio"/>	habe ich die Benutzerschnittstelle ungerne bedient
hat sich meine Produktivität erhöht	<input type="radio"/> <input type="radio"/> <input type="radio"/> <input type="radio"/> <input type="radio"/> <input type="radio"/> <input type="radio"/>	hat sich meine Produktivität verringert
hat sich meine Effizienz erhöht	<input type="radio"/> <input type="radio"/> <input type="radio"/> <input type="radio"/> <input type="radio"/> <input type="radio"/> <input type="radio"/>	hat sich meine Effizienz verringert
war ich zufrieden	<input type="radio"/> <input type="radio"/> <input type="radio"/> <input type="radio"/> <input type="radio"/> <input type="radio"/> <input type="radio"/>	war ich frustriert

Im Nachhinein ...



C.6 INTUI-AUSWERTUNG

Die transparenten Linien deuten die einzelnen Antworten der jeweiligen Probanden an, während die blaue Linie die Durchschnittswerte darstellt. Betrachtet man sich die zu den Komponenten gehörenden Antwortpaare, lassen sich die Ausprägungen dieser interpretieren.

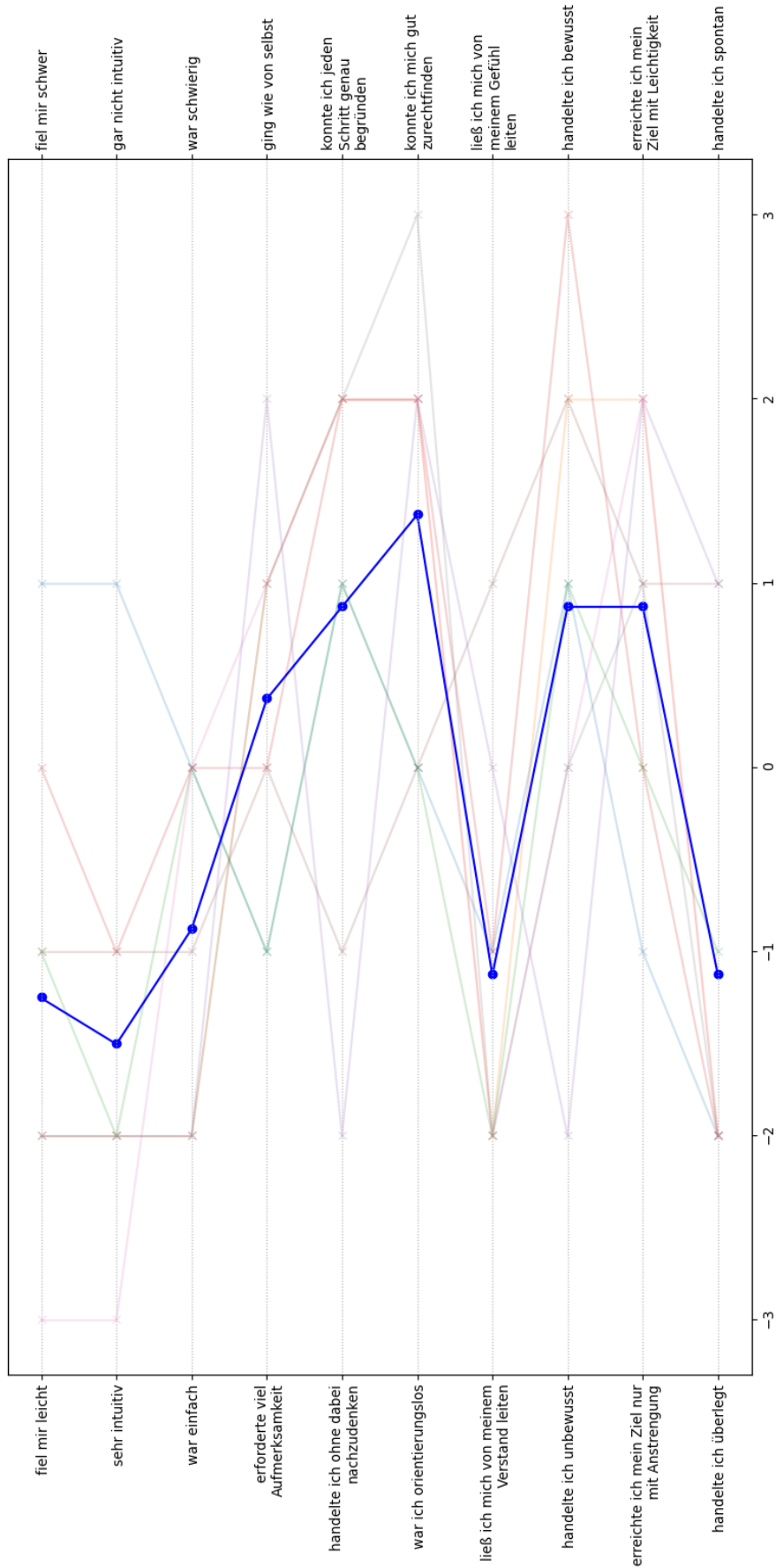


Abbildung B-6-2: Auswertung des modifizierten Fragebogens zur intuitiven Interaktion, Teil 1

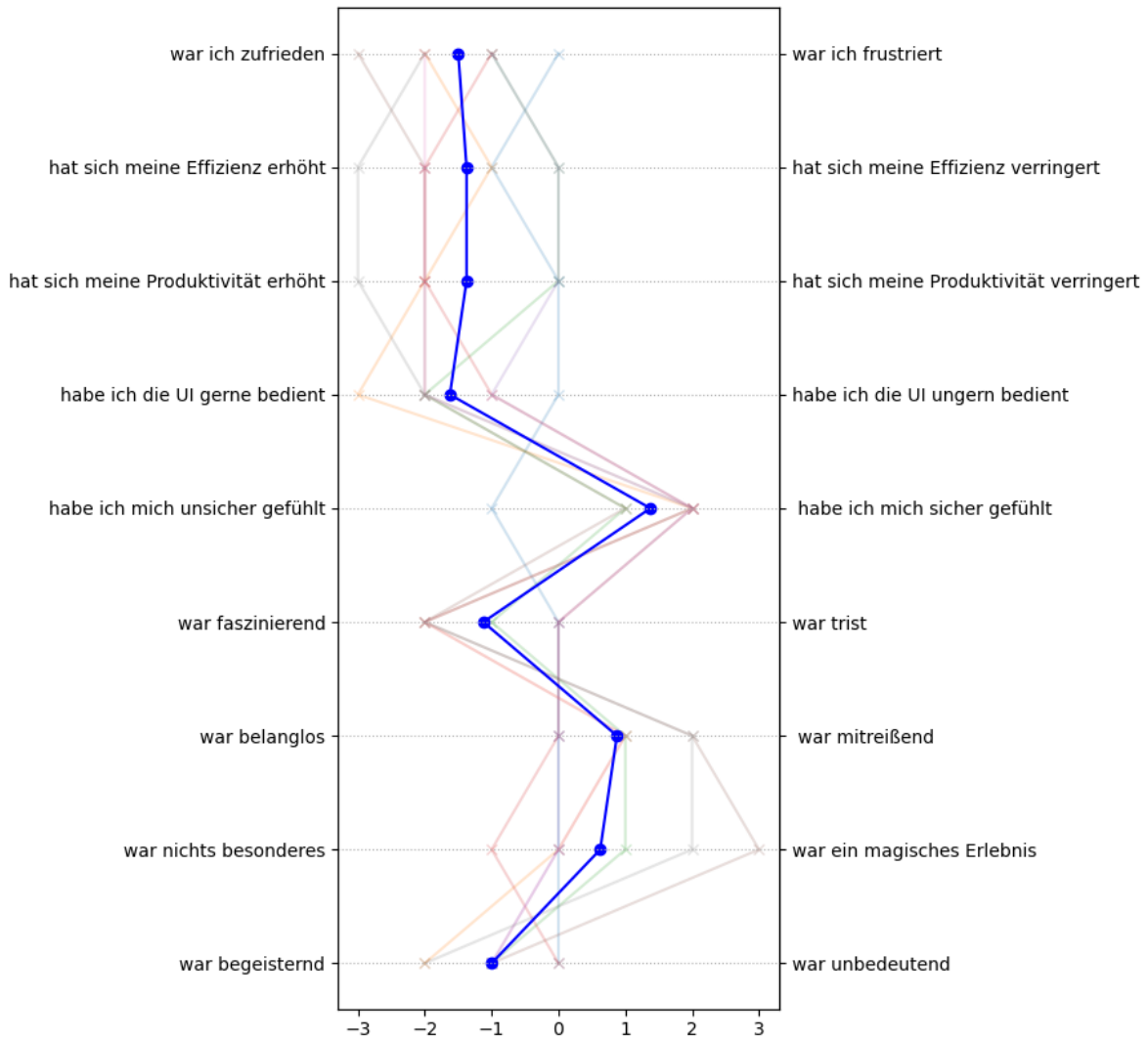


Abbildung C-6-3: Auswertung des modifizierten Fragebogens zur intuitiven Interaktion, Teil 2

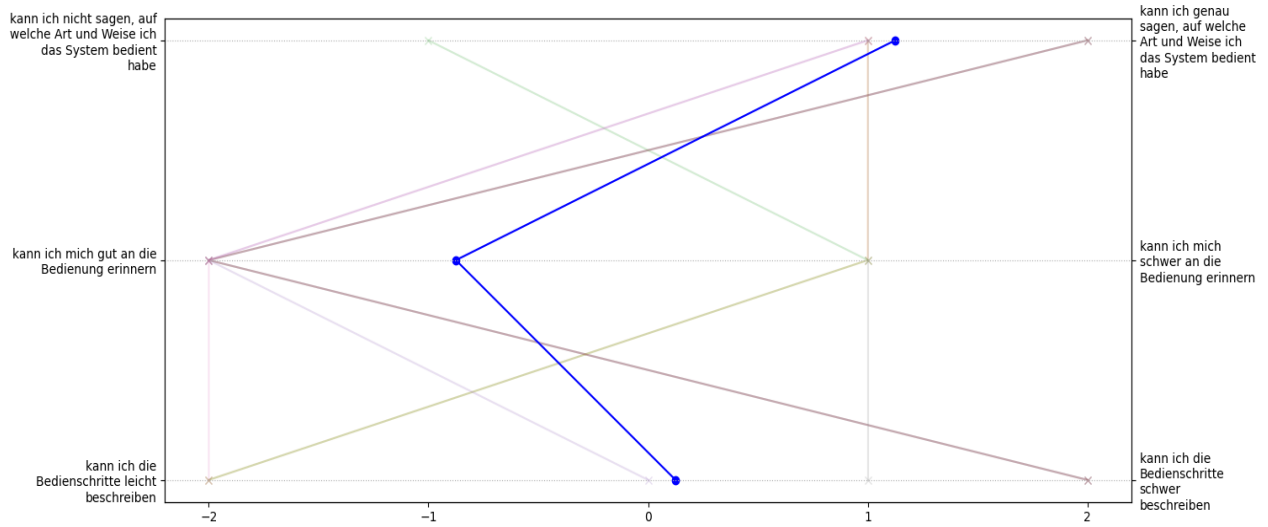


Abbildung C-6-4: Auswertung des modifizierten Fragebogens zur intuitiven Interaktion, Teil 3