# Hybride Mixed-Initiative Planungsassistenz für bemannt-unbemanntes Teaming in militärischen Luftoperationen

Siegfried Maier

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

Doktor-Ingenieurs (Dr.-Ing.)

angenommenen Dissertation.

Gutachter/Gutachterin:

1. Univ.-Prof. Dr.-Ing. Axel Schulte

2. Univ.-Prof. Dr. Wolfgang Koch

Die Dissertation wurde am 03.06.2025 bei der Universität der Bundeswehr München eingereicht und durch die Fakultät für Luft- und Raumfahrttechnik am 10.02.2026 angenommen. Die mündliche Prüfung fand am 18.03.2026 statt.

**Universität der Bundeswehr München**

Fakultät für Luft- und Raumfahrttechnik

Institut für Flugsysteme

# Hybride Mixed-Initiative-Planungsassistenz für bemannt-unbemanntes Teaming in militärischen Luftoperationen

M. Eng. Siegfried Maier

Vollständiger Abdruck der bei der

Fakultät für Luft- und Raumfahrttechnik

der Universität der Bundeswehr München

zur Erlangung des akademischen Grades eines

Doktor-Ingenieurs (Dr.-Ing.)

eingereichten Dissertation.

Vorsitzender: Herr Univ.-Prof. Dr.-Ing. habil. Michael Schmitt

1. Berichterstatter: Herr Univ.-Prof. Dr.-Ing. Axel Schulte
2. Berichterstatter: Herr Univ.-Prof. Dr. Wolfgang Koch

Diese Dissertation wurde am 03.06.2025 bei der Universität der Bundeswehr München, 85577 Neubiberg, eingereicht und durch die Fakultät für Luft- und Raumfahrttechnik am 10.02.2026 angenommen.

Tag der mündlichen Prüfung: 18.03.2026

## Kurzfassung

Diese Arbeit stellt das Konzept, die Implementierung und die Bewertung eines kognitiven Agenten vor, der einen Mixed-Initiative-Ansatz für die pilotengestützte Missionsplanung verwendet. Ziel des Agenten ist es, die Arbeitsbelastung der Piloten zu reduzieren, Planungsfehler zu minimieren und das Situationsbewusstsein zu verbessern, um letztendlich die Erfolgsrate von Missionen zu steigern.

Der Agent soll die Missionsvorplanung vereinfachen und die Piloten bei dynamischen (Um-)Planungsaufgaben unterstützen. Hierbei soll ein Übergang von traditionellen Planungsmethoden in der militärischen Luftfahrt hin zu einer effizienten, technologieunterstützten Lösung erfolgen.

Der Planungsassistenzagent fungiert als virtueller Assistent, der in Echtzeit Missionspläne erstellt und Anpassungsempfehlungen gibt. Diese Empfehlungen werden durch ein transparentes Mensch-Maschine-Cockpit-Design unter Verwendung kooperativer Mixed-Initiative-Techniken mit dem Piloten kommuniziert. Zwei Experimente wurden mit Piloten der deutschen Luftwaffe in einem Kampfflugzeugsimulator durchgeführt, um die Planungsfähigkeiten des Assistenzagenten zu überprüfen und die Interaktion der Piloten in komplexen militärischen Operationen zu validieren. Die Präferenzen der Piloten hinsichtlich der Benutzerfreundlichkeit und der Effektivität bei der Missionsdurchführung wurden auf drei Assistenzebenen untersucht: Management-by-Consent (mittlere Assistenzstufe), Management-by-Exception (hohe Assistenzstufe) und eine situationsangepasste Stufe, bei der die Aktionen des Agenten je nach Kritikalität variieren, indem er entweder Vorschläge macht oder direkt handelt.

Die Ergebnisse der Experimente zeigen, dass der Planungsassistenzagent effizient Missionspläne erstellt, die klar sind und nur minimale Fehler aufweisen. Die Piloten sprachen sich dafür aus, einen solchen Agenten in Zukunft für die Missionsvorplanung einzusetzen. Der Planungsassistenzagent verbessert den Missionserfolg und die Effizienz auf allen Assistenzstufen, insbesondere bei situationsangepasster Assistenz. Obwohl die Piloten subjektiv die hohe Assistenzstufe bevorzugten, erwies sich die mittlere Assistenzstufe im Hinblick auf die Missionsleistung als erfolgreicher.

Der Planungsassistenzagent kombiniert menschliche und maschinelle Intelligenz, um die Missions(neu)planung für militärische Luftoperationen deutlich zu verbessern, indem er das Situationsbewusstsein der Piloten und den Missionserfolg steigert. Trotz der positiven Gesamtbewertung gibt es noch Verbesserungsbedarf bei der Planerstellung und Darstellung der Assistenzmeldungen, wie z.B. mehr Bewegungsfreiheit im Zielgebiet und Anpassungen der Kommunikation.

Insgesamt wurde der Planungsassistenzagent sehr positiv aufgenommen und stellt einen bedeutenden Fortschritt in der dynamischen Missionsplanung mit kognitiven Agenten dar.

## Abstract

This thesis presents the concept, implementation and evaluation of a cognitive agent that utilizes a mixed-initiative approach for pilot-assisted mission planning. The goal of the agent is to reduce pilot workload, minimize planning errors, and improve situational awareness to ultimately increase mission success rates.

The agent is intended to simplify mission pre-planning and support pilots in dynamic (re-)planning tasks. The aim is to make the transition from traditional planning methods in military aviation to an efficient, technology-supported solution.

The planning assistance agent acts as a virtual assistant that creates mission plans in real time and makes adjustment recommendations. These proposals are communicated to the pilot through a transparent human-machine cockpit design using cooperative mixed-initiative techniques. Two experiments were conducted with German Air Force pilots in a fighter simulator to test the planning capabilities of the assistant agent and to validate the pilots' interaction in complex military operations. The pilots' preferences in terms of user-friendliness and effectiveness in mission execution were examined at three assistance levels: Management-by-Consent (medium assistance level), Management-by-Exception (high assistance level), and a situation-adapted level where the agent's actions vary according to criticality by either making suggestions or acting directly.

The results of the experiments show that the planning assistance agent efficiently creates mission plans that are clear and have minimal errors. The pilots were in favor of using such an agent for mission pre-planning in the future. The planning assistance agent improves mission success and efficiency at all assistance levels, especially with situation-specific assistance. Although the pilots subjectively preferred the high assistance level, the medium assistance level proved to be more successful in terms of mission performance.

The planning assistance agent combines human and machine intelligence to significantly improve mission (re)planning for military air operations by increasing pilots' situational awareness and mission success. Despite the positive overall assessment, there is still room for improvement in the creation of plans and presentation of assistance messages, such as more freedom of movement in the target area and adjustments to communication.

Overall, the planning assistance agent was very positively received and represents significant progress in dynamic mission planning with cognitive agents.

# Inhaltsverzeichnis

Inhaltsverzeichnis ..... IV

Abkürzungsverzeichnis ..... X

Abbildungsverzeichnis ..... XII

Tabellenverzeichnis ..... XVIII

1 Einleitung ..... 1

1.1 Motivation und Zielsetzung ..... 1

1.2 Anwendungsfall ..... 2

1.3 Zielsetzung und Überblick über die Struktur dieser Arbeit ..... 4

2 Theoretische Grundlagen ..... 6

2.1 Mensch-Maschine-Kooperation im Fokus von Human Factors Engineering ..... 6

2.1.1 Traditionelle Human Factors Engineering Ansätze ..... 6

2.1.2 Moderne Ansätze bei der Mensch-Maschine-Aufgabenteilung ..... 10

2.1.3 Vergleich und Zusammenführung ..... 11

2.1.4 Schlussfolgerung ..... 12

2.2 Grundlagen zu Methoden der Planung und Optimierung ..... 12

2.2.1 Planung ..... 12

2.2.2 Scheduling ..... 15

2.2.3 Optimierungsmethoden und Suchalgorithmen ..... 15

2.2.4 Dynamische Programmierung ..... 16

2.3 Militärischer Einsatzbereich und Hintergrund ..... 17

2.3.1 Planungsprozess militärischer Luftoperationen ..... 17

2.3.2 Führungsprozess militärischer Luftoperationen ..... 17

2.3.3 Erweiterung des Führungsprozesses um unbemannte Einheiten ..... 19

2.3.4 Operationelle Fähigkeiten ..... 21

2.4 MUM-T Kampfflugzeugsimulator ..... 22

2.4.1 Cockpit Konfigurationen und Hardwareaufbau ..... 22
2.4.2 Cockpit Interfaces ..... 25
2.4.3 Auftragsbasierte Führung zur Missionsplanerstellung ..... 30
3 Konzeptentwicklung ..... 33
3.1 Forschungsstand zu Mixed-Initiative Planung ..... 33
3.2 Arbeitsprozessanalyse und Arbeitssystemdesign zur Fähigkeitsbestimmung des Planungsassistenzagenten ..... 35
3.2.1 Grundlegende Arbeitsprozessanalyse ..... 35
3.2.2 Missionsaufgaben ..... 38
3.2.3 Missionsmanagement ..... 38
3.2.4 Arbeitssystemdesign ..... 39
3.2.5 Erforderliche Fähigkeiten des Planungsassistenz Agent ..... 42
3.3 Design und Architektur des Planungsassistenzagenten ..... 43
3.3.1 Planerstellungsmodul ..... 44
3.3.2 Assistenzmodul ..... 48
4 Technische Umsetzung ..... 52
4.1 Planungssystem des PAA ..... 52
4.1.1 Strategische Planung ..... 53
4.1.2 Taktische Planung ..... 61
4.1.3 Operative Planung ..... 64
4.2 Modelle und Taktikbewertungsmethoden zur Planerstellung und Planbewertung 65
4.2.1 Taktiken-Aufgaben Modell ..... 66
4.2.2 Taktiken Modell ..... 67
4.2.3 Ressourcen Modelle ..... 68
4.2.4 Taktikbewertungs- und Optimierungskriterien ..... 70
4.3 Assistenzsystem des PAA ..... 71
4.3.1 Assistenz auf Grundlage von Umgebungsänderung ..... 71

4.3.2 Assistenz auf Grundlage von Planänderungen und zyklischer Planüberprüfung 74

4.4 Implementierung des Scheduler ..... 78

4.4.1 Erstellung des Planungsproblems und Datenkonvertierung ..... 79

4.4.2 Task Collection ..... 79

4.4.3 Constraint Collection ..... 80

4.4.4 Zielfunktion und Nebenbedingungen ..... 81

4.4.5 Planungsmodell ..... 81

4.4.6 Solver ..... 81

5 Experimentelle Validierung der Planungsfähigkeiten des Planungsassistenzagenten ..... 83

5.1 Experimentalkampagne ..... 83

5.2 Versuchspersonen ..... 84

5.3 Experimentaufbau und Experimentalablauf ..... 84

5.4 Experimentalmissionen ..... 84

5.4.1 Statische Situation 1 ..... 85

5.4.2 Statische Situation 2 ..... 86

5.4.3 Statische Situation 3 ..... 86

5.4.4 Statische Situation 4 ..... 87

5.5 Erhobene Daten zur Planvalidierung ..... 87

5.6 Experimentalergebnisse ..... 89

5.6.1 Missionserfolg der Planergebnisse ..... 89

5.6.2 Evaluation der Planungsergebnisse ..... 95

5.6.3 Vertrauen in den des Planungsassistenzagenten bei der automatisierten Planerstellung ..... 97

5.6.4 Zusammenfassung und Empfehlung ..... 99

6 Experimentelle Validierung der Assistenzfähigkeiten des Planungsassistenzagenten ..... 101

6.1 Untersuchte Assistenzstufen des Planungsassistenzagenten ..... 101

6.2 Integration der Assistenzstufen und Kommunikation mit dem Piloten in den MUM-T Kampfflugzeugsimulator ..... 105
6.2.1 Allgemeine Meldungen und Anzeigen ..... 105
6.2.2 Dialoge und Handlungsoptionen bei Umgebungsänderung ..... 105
6.2.3 Dialoge und Handlungsoptionen auf Grundlage von Planänderungen und zyklischer Planüberprüfung ..... 107
6.3 Methodik und erhobene Daten zur Assistenzvalidierung ..... 111
6.3.1 Workload ..... 111
6.3.2 Situationsbewusstsein ..... 112
6.3.3 Benutzerfreundlichkeit ..... 113
6.3.4 Vertrauen in Automation ..... 114
6.3.5 Selbsterstellte Fragebögen ..... 114
6.3.6 Subjektive Daten ..... 114
6.3.7 Objektive Daten ..... 117
6.4 Experimentalablauf ..... 119
6.5 Experimentalmissionen ..... 120
6.6 Experimentalergebnisse ..... 124
6.6.1 Missionserfolg ..... 124
6.6.2 Performance-Indikatoren der Interaktion ..... 127
6.6.3 Benutzerfreundlichkeit des Planungsassistenzagenten ..... 130
6.6.4 Workload und Situationsbewusstsein ..... 136
6.6.5 Vertrauen, Akzeptanz und bevorzugte Assistenzstufe ..... 138
6.6.6 Subjektives Feedback und Freitextantworten ..... 140
6.6.7 Zusammenfassung ..... 141
7 Zusammenfassung und Ausblick ..... 143
Literaturverzeichnis ..... 145
Anhang ..... 157

A Taktiken-Aufgaben Modell ..... 157

B Ressourcen Modelle ..... 158

C Taktiken Modell ..... 159

D Fragebogen zur Missionsplanbewertung ..... 161

E Fragebogen zur Bewertung des PAA nach einer Mission ..... 163

F Debriefing Fragebogen ..... 168

G Fragebogen zur Bewertung aller Assistenzstufen ..... 172

H Fehlgeschlagener Missionsplan von P1 für S2 ..... 180

I Fehlgeschlagener Missionsplan von P4 für S1 ..... 181

J Fehlgeschlagener Missionsplan von P4 für S3 ..... 182

K Fehlgeschlagener Missionsplan P5 für S1 ..... 183

L Fehlgeschlagener Missionsplan von P7 für S1 ..... 184

M Darstellung der taktischen Karte zum fehlgeschlagenen Missionsplan von P7 für S1 .. 185

N Fehlgeschlagener Missionsplan von P7 für S2 ..... 186

O Fehlgeschlagener Missionsplan von P8 für S1 ..... 187

P Fehlgeschlagener Missionsplan von P8 für S2 ..... 188

Q Fehlgeschlagener Missionsplan von P10 für S1 ..... 189

R Fehlgeschlagener Missionsplan von P10 für S2 ..... 190

S Fehlgeschlagener Missionsplan von P10 für S3 ..... 191

T Auswertung CSUQ Teil 1 ..... 192

U Auswertung CSUQ Teil 2 ..... 193

V Auswertung CSUQ Teil 3 ..... 194

W Auswertung TiA-Fragebogen 1 ..... 195

X Auswertung TiA-Fragebogen 2 ..... 196

Y Auswertung TiA-Fragebogen 3 ..... 197

Z Auswertung TiA-Fragebogen 4 ..... 198

# Abkürzungsverzeichnis

AA ..... *Air-To-Air*
AG ..... *Air-To-Ground*
AOD ..... *Air Operation Directive*
ASP ..... *Anwser Set Programming*
ATO ..... *Air Task Order*
C2 ..... *Command and Control*
C2O ..... *Command & Control Operation*
CAOC ..... *Combined Air Operation Center*
CAP ..... *Combat Air Patrol*
COA ..... *Course of Action*
COMAO ..... *Composite Air Operation*
CP ..... *Constraint Programming*
CRC ..... *Command and Reporting Center*
CSP ..... *Constraint Satisfaction Problem*
CSUQ ..... *Computer System Usability Questionnaire*
*DCA* ..... *Defensive Counter Air*
DEAD ..... *Destruction of enemy air defenses*
FL ..... *Flight Lead*
FLOT ..... *Forward Line Own Troops*
GBU ..... *Guided Bomb Unit*
HARM ..... *High Speed Anti Radiation Missile*
HAT ..... *Human-Autonomy-Teaming*
HDDL ..... , Hierarchical Domain Definition Language
HFE ..... *Human Factors Engineering*
HTN ..... *Hierarchical Task Network*
HUD ..... *Head-Up-Display*
IFS ..... *Institut für Flugsysteme*
ISR ..... *Intelligence, Surveillance and Reconnaissance*
JCS ..... *Joint Cognitive Systems*
JPR ..... *Joint Personell Recovery*
JSON ..... *JavaScript Object Notation*
KI ..... *künstliche Intelligenz*
LOA ..... *Level of Automation*
MC ..... *Mission Commander*
MHDD ..... *Multi-Functional-Head-Down-Display*
MILP ..... *Mixed Integer Linear Programming*
MIP ..... *Mixed Initiative Planning*
MUM-T ..... *Manned-Unmanned-Teaming*
NATO ..... *North Atlantic Treaty Orginzation*
*OCA* ..... *Offensive Counter Air*
OpFoCo *Operative Forderung Cockpit-Konfigurationen für Multi-UCAV (Unmanned Combat Aerial Vehicles) Fighter Missionen*
OR ..... *Operations Research*
PAA ..... *Planungsassistenz Agent*

PDDL ..... *Planning Domain Definition Language*
POCL ..... *Partial Order Casual Link*
PSSUQ ..... *Post Study System Usability Questionnaire*
QRA ..... *Quick Reaction Alert*
RCM ..... *Radial Context Menu*
ROE ..... *Rules of Engagement*
ROS2 ..... *Robot Operating System 2*
SA ..... *Situational Awareness*
SAGAT ..... *Situation Awareness Global Assessment Technique*
SAM ..... *surface-to-air-missile*
SART ..... *Situation Awareness Rating Technique*
SEAD ..... *Suppression of enemy air defenses*
SHDD ..... *Side-Head-Down-Display*
SHOP2 ..... *Simple Hierarchical Ordered Planner 2*
SPAM ..... *Situation Present Assessment Method*
STRIPS ..... *Stanford Research Institute Problem Solver*
SUS ..... *System Usability Scale*
TBG ..... *Task-Based Guidance*
TiA ..... *Trust in Automation*
TLX ..... *Task Load Index*
TOT ..... *Time-over-Target*
TRIPS .... *The Rochester Interactive Planner System*, *The Rochester Interactive Planning System*
UAV ..... *Unmanned Aerial Vehicle*
UEQ ..... *User Experience Questionnaire*
UniBwM ..... *Universität der Bundeswehr München*
WEnv ..... *Work Environment*
WL ..... *Workload*
WObj ..... *Work Objective*
WPOut ..... *Work Process Output*
WProc ..... *Work Process*
WSys ..... *Work System*
XML ..... *Extensible Markup Language*

# Abbildungsverzeichnis

Abbildung 1-1 Symbolbild der Planung einer Mission vor Durchführung (links) (Bundeswehr, 2024b) und Durchführung einer Trainingsmission (rechts) (Johnson, 2008) mit traditionellen Planungstools ..... 3
Abbildung 1-2 Cockpit einer F-35 der US Air Force (Keller, 2022) ..... 3
Abbildung 2-1 Planungsprozess innerhalb der Luftwaffe nach (Lindner & Schulte, 2024) (der blaue Kasten zeigt die Systemgrenze dieser Arbeit) ..... 17
Abbildung 2-2 Beispielaufbau einer COMAO nach Fredriksen, 2018 (Maier et al., 2024) ..... 18
Abbildung 2-3 Führungsprozess über alle Ebenen einer COMAO und die jeweiligen Hauptaufgaben (Maier et al., 2024) ..... 18
Abbildung 2-4 Vereinfachte Darstellung der Struktur einer COMAO (Maier et al., 2024) ..... 19
Abbildung 2-5 Erweiterung der Ausführungsebene um unbemannte Plattformen (der blaue Kasten zeigt die Systemgrenze des MUM-T Kampfflugzeugsimulators (siehe 2.4), welcher zur Durchführung der Experimente dieser Arbeit verwendet wurde) (Maier et al., 2024) ..... 20
Abbildung 2-6 Darstellung einer COMAO in einem MUM-T Umfeld (Maier et al., 2024) ..... 20
Abbildung 2-7 Kampfflugzeugsimulator am IFS ..... 23
Abbildung 2-8 Hardwareaufbau der Simulator Umgebung ..... 24
Abbildung 2-9 Aufbau eines Frontcockpits ..... 25
Abbildung 2-10 Überblick über die visuellen Anzeige- und Interaktionssysteme im Cockpit . 26
Abbildung 2-11 Anzeige der taktischen Karte mit verschiedenen Szenarien-Elementen wie feindliche Stellungen, Gebäuden, UAVs und das eigene Kampfflugzeug ..... 27
Abbildung 2-12 Darstellung des Planungsinterfaces zum Missionsmanagement im Aktiv-Modus ..... 28
Abbildung 2-13 Darstellung des Planungsinterfaces zum Missionsmanagement im Modifizier-Modus ..... 29
Abbildung 2-14 Exemplarischer Ablauf Timeline Tasking ..... 31
Abbildung 3-1 Arbeitsprozess für MUM-T Missionen ..... 36
Abbildung 3-2 Detaillierter Modellarbeitsprozess einer militärischen Luftoperation (Lindner, 2022) ..... 36
Abbildung 3-3 Schematischer Ablauf einer offensiven Luftkriegs-Mission nach (Maier et al., 2024; Schulte & Donath, 2024) ..... 37
Abbildung 3-4 Arbeitssystem für den definierten Arbeitsprozess und Kräfteansatz ..... 39

Abbildung 3-5 Erweiterung des ursprünglichen WSys durch einen Scheduler..... 40
Abbildung 3-6 Um ein Planungstool erweitertes WSys ..... 41
Abbildung 3-7 WSys mit Planungsassistenzagenten als Worker, welcher mit dem Bediener kooperiert..... 42
Abbildung 3-8 Grundlegende Architektur des PAA..... 43
Abbildung 3-9 Grundlegender Ablauf zur strategischen Plangenerierung..... 45
Abbildung 3-10 Schematisches Missionsbeispiel..... 45
Abbildung 3-11 Grundlegender Ablauf zur taktischen Plangenerierung..... 46
Abbildung 3-12 Grundlegender Ablauf zur Erstellung des operativen Plans..... 47
Abbildung 3-13 Grundlegender Ablauf zur Assistenzgenerierung des Soforthilfe Assistenzmoduls..... 48
Abbildung 3-14 Beispielbild zur Bestimmung der Kritikalität der Situation ..... 48
Abbildung 3-15 Grundlegender Ablauf zur Planoptimierung ..... 49
Abbildung 3-16 Grundlegender Ablauf zur Missionszielvalidierung..... 50
Abbildung 4-1 Aufbau strategisches Planungsmodul ..... 54
Abbildung 4-2 Ausschnitt einer PDDL Domänen Definition..... 56
Abbildung 4-3 Implementierte Aktionen der PDDL Domäne..... 57
Abbildung 4-4 Beispiel eines PDDL Problems ..... 58
Abbildung 4-5 Beispielszenario zur strategischen Planung ..... 59
Abbildung 4-6 Beispielszenario und resultierender strategischer Plan..... 60
Abbildung 4-7 Aufbau taktisches Planungsmodul ..... 61
Abbildung 4-8 Gefilterter und invertierter strategischer Plan und resultierender Baum aus SAM-Stellungen und Taktiken..... 62
Abbildung 4-9 Zyklischer Ablauf zur Taktikauswahl..... 63
Abbildung 4-10 Aufbau operatives Planungsmodul ..... 64
Abbildung 4-11 Taktiken-Aufgaben Modell ..... 67
Abbildung 4-12 Ausschnitt der JSON-Datei des Taktiken Modells ..... 68
Abbildung 4-13 Ausschnitt eines der Ressourcen Modelle ..... 69
Abbildung 4-14 Ressourcen- und Risikolevelkosten Modell..... 69
Abbildung 4-15 Überprüfungen zur Assistenzgenerierung durch den PAA basierend auf Umgebungsupdates ..... 72
Abbildung 4-16 Beispielbild zur Bestimmung der Kritikalität der Situation ..... 73

Abbildung 4-17 Überprüfungen zur Assistenzgenerierung durch den PAA aufgrund von Missionsplanänderungen und zyklischen Missionsplanüberprüfung ..... 74
Abbildung 4-18 Ablaufdiagramm zur Aufgabenerweiterung bei nicht optimaler Aufgabenauswahl ..... 75
Abbildung 4-19 Ablaufdiagramm zur Planerweiterung zur Missionszielerreichung ..... 76
Abbildung 4-20 Beispiel strategischer Plan ..... 76
Abbildung 4-21 Ablaufdiagramm zur Kostenoptimierung des Plans des Bedieners ..... 77
Abbildung 4-22 Ablaufdiagramm zur Planoptimierung des Plans des Bedieners zur Missionszielerreichung ..... 77
Abbildung 4-23 Aufbau Scheduler ..... 78
Abbildung 4-24 Erstellung und Aufbau der Task Collection ..... 79
Abbildung 5-1 Zeitplan einer Experimentalwoche im Rahmen der Experimentalkampagne . 83
Abbildung 5-2 Blockschaltbild der Experimentalumgebung ..... 84
Abbildung 5-3 Beispiel Ressourcen ..... 85
Abbildung 5-4 Taktische Lage statische Situation 1 und verfügbare Ressourcen ..... 85
Abbildung 5-5 Taktische Lage statische Situation 2 und verfügbare Ressourcen ..... 86
Abbildung 5-6 Taktische Lage statische Situation 3 und verfügbare Ressourcen ..... 86
Abbildung 5-7 Taktische Lage statische Situation 4 und verfügbare Ressourcen ..... 87
Abbildung 5-8 Fragebogenteil zur Bewertung des Missionsplans des PAA ..... 88
Abbildung 5-9 Fragebogenteil zur Angabe der Planpräferenz ..... 88
Abbildung 5-10 PAA Missionsplan für S1 ..... 90
Abbildung 5-11 PAA Missionsplan für S2 ..... 91
Abbildung 5-12 PAA Missionsplan für S3 ..... 92
Abbildung 5-13 PAA Missionsplan für S4 ..... 93
Abbildung 5-14 Bewertung der Planergebnisse, gemittelt über alle Situationen und Piloten Teil 1 ..... 95
Abbildung 5-15 Bewertung der Planergebnisse, gemittelt über alle Situationen und Piloten Teil 2 ..... 95
Abbildung 5-16 Detaildarstellung der Ergebnisse zur Frage: "Der automatisiert erstellte Plan traf angemessene Entscheidungen" ..... 96
Abbildung 5-17 Detaildarstellung der Ergebnisse zur Frage: "Der automatisierte Plan beinhaltete Fehler bzw. ungünstige Entscheidungen" ..... 96

Abbildung 5-18 Bewertung der Planbevorzugung ..... 96
Abbildung 5-19 Ergebnisse des TiA-Fragebogens über alle Situationen und Piloten gemittelt ..... 98
Abbildung 5-20 Detailauswertung zum Punkt "Das System könnte Stellenweise einen Fehler machen" über alle Experimentalsituationen ..... 99
Abbildung 6-1 Ablauf der Assistenzgenerierung und Bearbeitung bei mittlerer Assistenzstufe ..... 102
Abbildung 6-2 Ablauf der Assistenzgenerierung und Bearbeitung bei hoher Assistenzstufe 103
Abbildung 6-3 Ablauf der Assistenzgenerierung und Bearbeitung bei situationsangepasster Assistenzstufe ..... 104
Abbildung 6-4 Vorschlag des nächsten Missionsschritts ..... 105
Abbildung 6-5 Risiko-/Waffenstufe des aktuellen Plans des Piloten ..... 105
Abbildung 6-6 Assistenzmeldung des PAA bei unmittelbarer Gefahr. Links bei mittlerer Assistenzstufe und rechts bei hoher Assistenzstufe ..... 106
Abbildung 6-7 Assistenzmeldung des PAA bei Verlust eines Teammitglieds. Links bei mittlerer Assistenzstufe und rechts bei hoher Assistenzstufe ..... 106
Abbildung 6-8 Assistenzmeldung des PAA bei nicht mehr notwendigen Aufgaben. Links bei mittlerer Assistenzstufe und rechts bei hoher Assistenzstufe ..... 107
Abbildung 6-9 Assistenzmeldung des PAA bei nicht notwendigen Aufgaben. Links bei mittlerer Assistenzstufe und rechts bei hoher Assistenzstufe ..... 107
Abbildung 6-10 Bestätigen eines sehr risikobehafteten Plans ..... 108
Abbildung 6-11 Vorschlag zur Taktikadaption bei mittleren Assistenzstufe ..... 108
Abbildung 6-12 Anzeige des risikooptimierten Plans ..... 109
Abbildung 6-13 Automatische Aufgabenerweiterung bei hoher Assistenzstufe ..... 109
Abbildung 6-14 Assistenzmeldung des PAA zur Planerweiterung zur Missionszielerreichung. Links bei mittlerer Assistenzstufe und rechts bei hoher Assistenzstufe ..... 110
Abbildung 6-15 Assistenzmeldung des PAA zur Planoptimierung. Links bei mittlerer Assistenzstufe und rechts bei hoher Assistenzstufe ..... 111
Abbildung 6-16 Allgemeine Fragen zum PAA ..... 115
Abbildung 6-17 Debriefing Fragebogenteil zur Erfassung des Ereignisses ..... 116
Abbildung 6-18 Debriefing Fragebogenteil mit speziellen Fragen zu der aktuellen Situation ..... 116

Abbildung 6-19 Ausschnitt des Abschlussfragebogens zur Bewertung aller drei Assistenzstufen ..... 117
Abbildung 6-20 Ausschnitt Analyse Datei der Blickbewegungs- und Interaktionsdaten. Hier Markierung erstes "gesehen" der Meldung für einen Piloten ..... 118
Abbildung 6-21 Ausschnitt Analyse Datei der Blickbewegungs- und Interaktionsdaten. Hier Markierung "bearbeitet" der Meldung für einen Piloten ..... 118
Abbildung 6-22 Ausschnitt der Analysedatei der Assistenzmeldungen ..... 118
Abbildung 6-23 Ausschnitt Auswertung der Analyse Datei. Zeitstempel in [µs] der Simulationszeit und Zeitdifferenzberechnungen in [s] ..... 118
Abbildung 6-24 Ausschnitt der Auswertung der Analyse der Wiedergabe der Missionsaufnahme für einen Piloten ..... 119
Abbildung 6-25 Übersicht der Experimentalmissionen und deren Reihenfolge der Durchführung ..... 119
Abbildung 6-26 Verfügbare Wirkmittel in allen Experimentalmissionen ..... 120
Abbildung 6-27 Ausgangslage der Experimentalmission ohne Assistenz. Links Ansicht des Szenario-Editors und rechts Ansicht innerhalb des Cockpits ..... 122
Abbildung 6-28 Ausgangslage der Experimentalmission mit mittlerer Assistenz. Links Ansicht des Szenario-Editors und rechts Ansicht innerhalb des Cockpits ..... 123
Abbildung 6-29 Ausgangslage der Experimentalmission mit hoher Assistenz. Links Ansicht des Szenario-Editors und rechts Ansicht innerhalb des Cockpits ..... 123
Abbildung 6-30 Ausgangslage der Experimentalmission mit situationsangepasster Assistenz. Links Ansicht des Szenario-Editors und rechts Ansicht innerhalb des Cockpits ..... 124
Abbildung 6-31 Heat Map zur Darstellung des Missionserfolgs für alle Piloten und Assistenzstufen (0 = kein Erfolg, 1 = Erfolg) ..... 125
Abbildung 6-32 Heat Map zur Darstellung der eingehaltenen Distanzen für alle Piloten und Assistenzstufen (0 = Distanzen nicht eingehalten, 1 = Distanzen eingehalten) ..... 125
Abbildung 6-33 Boxplot zur Dauer der nicht eingehaltenen Distanz zu den UAVs in [s] ..... 126
Abbildung 6-34 Boxplot zum Ende der Ingress Phase in [s] ..... 127
Abbildung 6-35 Balkengrafik für die Anzahl der Meldungen, der Anzahl der bearbeiteten und Anzahl der angenommenen Meldungen bzgl. Lageänderung oder Plananpassungen ..... 128
Abbildung 6-36 Auswertung UEQ: Effizienz ..... 131
Abbildung 6-37 Auswertung UEQ: Klarheit ..... 131

Abbildung 6-38 Auswertung UEQ: Zuverlässigkeit ..... 132
Abbildung 6-39 Auswertung UEQ: Nützlichkeit ..... 132
Abbildung 6-40 Auswertung SUS Teil 1 ..... 134
Abbildung 6-41 Auswertung SUS Teil 2 ..... 134
Abbildung 6-42 Auswertung allgemeiner Fragebogen zur Benutzerfreundlichkeit und Planverständnis ..... 135
Abbildung 6-43 Auswertung allgemeine Benutzerfreundlichkeit ..... 136
Abbildung 6-44 Auswertung des NASA-TLX (links) und SART Fragebogens (rechts) ..... 137
Abbildung 6-45 Auswertung der Fragebögen zur wahrgenommenen Workload und der Fähigkeit die SA aufrechtzuerhalten ..... 137
Abbildung 6-46 Auswertung allgemeiner Fragebogen zur Akzeptanz des PAA Teil 1 ..... 139
Abbildung 6-47 Auswertung allgemeiner Fragebogen zur Akzeptanz des PAA Teil 2 ..... 139
Abbildung 6-48 Auswertung der Fragebögen zum Vertrauen in den PAA (links) und der Akzeptanz des PAA (rechts) ..... 140
Abbildung 6-49 Auswertung zur bevorzugten Assistenzstufe ..... 140

# Tabellenverzeichnis

Tabelle 2-1 Hierarchie der LOA's nach (Sheridan & Verplank, 1978) ..... 7
Tabelle 2-2 LOA Klassifizierung für Mensch-Computer Leistung in dynamischen, Multi Task Szenarien nach (Endsley & Kaber, 1999)..... 8
Tabelle 2-3 Übersicht der in der Simulation verfügbaren SAM-Stellungen..... 22
Tabelle 2-4 Relevante Szenario Elemente mit unterschiedlichen Klassifikationen im Simulator ..... 27
Tabelle 2-5 Für die Arbeit relevante Aufgabentypen und ihre Beschreibung ..... 30
Tabelle 4-1 Kritikalitätsstufen in Abhängigkeit der Distanz eines Teammitglieds (d) zu der Erkennungs-/Schussreichweite einer SAM-Stellung (r) ..... 72
Tabelle 5-1 Vergleich Missionserfolg – PAA vs. Piloten ..... 94
Tabelle 5-2 Beispiele fehlgeschlagener Piloten-Pläne ..... 94
Tabelle 5-3 Zusammenfassung der Freitextantworten zur Bewertung der Planungsergebnisse ..... 96
Tabelle 5-4 Subskalen im Detail ..... 99
Tabelle 6-1 Zeitdifferenzen gesendet/gesehen/bearbeitet für Meldungen aufgrund von Lageänderung..... 129
Tabelle 6-2 Zeitdifferenzen gesendet/gesehen/bearbeitet für Meldungen aufgrund von Plananpassungen..... 130

# 1 Einleitung

Die Zusammenarbeit von Mensch und Maschine ist ein dynamisches und komplexes Forschungsfeld. Mensch-Maschine-Teams ermöglichen Handlungsspielräume, die weder Menschen noch künstliche Intelligenz (KI) allein erreichen können. Ihre Leistungsfähigkeit ergibt sich nicht aus der Summe individueller Beiträge, sondern aus der Qualität der Kooperation. Die Integration von KI erfordert daher ein Zusammenspiel mathematischer, verhaltensbasierter und physikalischer Modelle (Quandt, 2023). Um das Potenzial solcher Teams auszuschöpfen, sind neue Arbeitsweisen, geeignete Schnittstellen und Kommunikationsmechanismen notwendig, die einen effektiven Aufgabentransfer und eine transparente Interaktion ermöglichen.

Gut ausgebildete Operateure sowie erklärbare KI-Systeme sind essenziell (Maymí & Thomson, 2018). Eine umfassende Analyse zur Integration von KI in menschliche Teams liefert (Chiou et al., 2020) mit Beispielen aus Luftmobilität, Militär, Bildung und Industrie. Die Studie betont die Notwendigkeit von Transparenz, Erklärbarkeit und Verantwortlichkeit in KI-Systemen. Ziel ist es, Technologien zu entwickeln, die die Rolle des Menschen stärken und nicht untergraben. Ein multidisziplinärer Ansatz wird empfohlen, um die Zusammenarbeit zwischen Mensch, KI und automatisierten Systemen effektiv zu gestalten.

Ein zentrales Thema Mensch-Maschine-Systemen oder Human-Autonomy Teaming (HAT)-Systemen ist die **Aufgabenverteilung**. Hochautomatisierte Planer können komplexe Probleme effizient lösen, bergen jedoch Risiken wie den Verlust des Situationsbewusstseins (*engl. Situational Awareness* (SA)) oder übermäßiges Vertrauen in die Automation, der Wohlgefälligkeit oder Gleichgültigkeit (Wiener & Curry, 1980). Mixed-Initiative-Planning (MIP)-Systeme bieten hier einen Ausweg: Sie unterstützen und kooperieren mit dem Bediener bei der Planung, statt fertige Lösungen vorzugeben. Die Wirksamkeit solcher Systeme wurde u. a. von (Roth et al., 2004) nachgewiesen. Auch (Lindner, 2022; Sierhuis et al., 2003) betonen die Bedeutung eines menschenzentrierten Entwicklungsansatzes.

## 1.1 Motivation und Zielsetzung

Mit dem zunehmenden Einsatz automatisierter Systeme in Alltag und Beruf wächst der Bedarf an neuen Formen der Aufgabenverteilung zwischen Mensch und Maschine. Studien wie (Cummings & Bauchwitz, 2024) zeigen, dass solche Systeme primär unterstützend wirken sollten. Der Mensch muss in Entscheidungsprozesse eingebunden bleiben, um kritische Fehler zu vermeiden (Robb et al., 2018). Ziel ist daher die Entwicklung **unterstützender Systeme**, nicht vollständiger Automatisierung. Ein effektives Assistenzsystem sollte laut (Hoschka, 2021) folgende Eigenschaften aufweisen: Fachkompetenz, Kenntnis eigener Grenzen, Anpassungsfähigkeit an ungenaue Anweisungen, Lernfähigkeit, Erklärbarkeit des eigenen Verhaltens sowie Unterstützung bei Kommunikation und Zusammenarbeit.

Ein solches System muss das Ziel des Nutzers verstehen, eigeninitiativ handeln, Umgebungsinformationen erfassen, den aktuellen Plan kennen und Planungsregeln anwenden können. Ebenso wichtig ist eine **klare und transparente Kommunikation**, insbesondere bei Planänderungen (Chen et al., 2016).

Im Rahmen dieser Arbeit wurde ein **kognitiver Planungsassistent** entwickelt und evaluiert – der **Planungsassistenz Agent** (PAA). Als MIP-Agent unterstützt er Piloten bei der Missionsvorbereitung und -durchführung. Ziel ist es, Planung und Umplanung effizienter, robuster und transparenter zu gestalten. Der PAA analysiert Missionsziele, Aufgabenabhängigkeiten und Ressourcen, erstellt eigenständig Pläne und passt diese bei Bedarf dynamisch an (George Ferguson et al., 1996; Schmitt, 2021). Je nach Situation schlägt er Änderungen vor oder führt sie direkt aus – stets in enger Abstimmung mit dem Piloten über ein kooperatives Cockpit-Interface.

## 1.2 Anwendungsfall

Der Planungsassistenz Agent (PAA) wurde für den Einsatz in einer **Composite Air Operation** (COMAO) entwickelt – einer koordinierten militärischen Luftoperation, bei der verschiedene Luftfahrzeugtypen gemeinsam komplexe Missionsziele verfolgen, die ein einzelner Flugzeugtyp nicht bewältigen könnte (Fredriksen, 2018). COMAO-Missionen bestehen aus mehreren sogenannten **Packages** (2–4 Mitglieder), die jeweils eigene Teilziele im Rahmen eines übergeordneten Missionsziels verfolgen.

Die Planung und Koordination vor Missionsbeginn sowie die Umplanung während des Einsatzes – insbesondere im Cockpit – sind entscheidend für den Erfolg. Trotz moderner Cockpitsysteme, wie etwa in der F-35 (vgl. Abbildung 1-2), erfolgt ein Großteil der Planung weiterhin manuell und verbal ähnlich wie in Abbildung 1-1 dargestellt.




**Abbildung 1-1 Symbolbild der Planung einer Mission vor Durchführung (links) (Bundeswehr, 2024b) und Durchführung einer Trainingsmission (rechts) (Johnson, 2008) mit traditionellen Planungstools**



**Abbildung 1-2 Cockpit einer F-35 der US Air Force (Keller, 2022)**

In zukünftigen Szenarien werden **autonome unbemannte Luftfahrzeuge** (*engl. Unmanned Aerial Vehicle* (UAV)) zunehmend Teammitglieder ersetzen. Ein menschlicher Pilot übernimmt dabei die Führung und delegiert Aufgaben an die UAVs – ein Konzept, das als **Manned-Unmanned Teaming** (MUM-T) bezeichnet wird (Strenzke & Schulte, 2011; Uhrmann et al., 2009).

Der Fokus dieser Arbeit liegt auf einem einzelnen MUM-T Package, bestehend aus einem bemannten Kampfflugzeug und drei UAVs. Die Führung erfolgt aus dem Cockpit des bemannten Flugzeugs. Laut (Schulte et al., 2020) ist das Kernelement von MUM-T die Zusammenarbeit bemannter und unbemannter Systeme im gleichen räumlichen, zeitlichen und zielgerichteten Kontext.

Menschen bringen in MUM-T-Missionen ihre kognitiven Fähigkeiten wie Problemlösung, Planung und Erfahrung ein (Schulte & Donath, 2019). Zudem liegt die Entscheidungsgewalt über den Waffeneinsatz beim Menschen. UAVs hingegen erhöhen die Sicherheit, indem sie Risiken vom bemannten Führungsfahrzeug fernhalten.

Die **Planung und Umplanung mehrerer UAVs durch einen einzelnen Operator** in dynamischen Szenarien ist ein zentrales Forschungsthema (Behymer et al., 2017; Chen & Barnes, 2014). Unter Zeitdruck kann dies zu hoher mentaler Belastung führen. Bestehende automatische Planer sind zwar leistungsfähig, jedoch oft nicht für **inkrementelle,**

**nutzerzentrierte Planung** geeignet (Allen & Ferguson, 2002). Zudem bergen sie Risiken wie Kompetenzverlust, Intransparenz und den Verlust des Situationsbewusstseins (Wiener & Curry, 1980). Ein **kooperativer Planungsansatz** zwischen Mensch und kognitivem Agenten – wie dem PAA – kann diesen Herausforderungen begegnen und eine effektive, adaptive Missionsplanung ermöglichen (George Ferguson et al., 1996).

### 1.3 Zielsetzung und Überblick über die Struktur dieser Arbeit

Ziel dieser Arbeit war die **Konzeption, Implementierung und Evaluation** des PAA in einem Kampfflugzeugsimulator, um folgende Fragestellung zu beantworten:

- Mit welchen technischen Methoden lässt sich ein MIP-Agent für komplexe und hochdynamische MUM-T Luftkampf-Szenarien entwickeln und umsetzen?
- Welche Auswirkungen hat die Integration eines MIP-Agenten sowie der Automatisierungs-/Assistenzgrad auf Entscheidungsfindung, SA, mentale Arbeitsbelastung (*engl. Workload* (WL)), Vertrauen in das System und den Missionserfolg?

Zur Beantwortung dieser Fragen ist die Arbeit wie folgt aufgebaut:

**Kapitel 2** behandelt die theoretischen Grundlagen und Methoden zur Entwicklung des PAA. Es beginnt mit einer Einführung in die Mensch-Maschine-Kooperation und Human Factors Engineering (HFE), gefolgt von einem Überblick über klassische und moderne Planungs- und Optimierungsstrategien (z. B. KI-Planung, Scheduling, dynamische Programmierung). Zudem wird der militärische Einsatzkontext erläutert, einschließlich des Planungs- und Führungsprozesses in der Luftfahrt. Abschließend wird der MUM-T-Simulator vorgestellt, in dem der PAA integriert wurde.

**Kapitel 3** widmet sich der Konzeptentwicklung des PAA. Es beginnt mit einer Arbeitsprozessanalyse und einem Arbeitssystemdesign nach Schulte & Donath. Darauf aufbauend werden die Rolle des Piloten und die daraus abgeleiteten Fähigkeiten des PAA beschrieben. Anschließend folgen das Systemdesign und die Architektur des PAA mit seinen Haupt- und Teilmodulen.

**Kapitel 4** beschreibt die technische Umsetzung des PAA im Simulator. Zunächst wird das Planungssystem des PAA mit seiner strategischen, taktischen und operativen Planung erläutert. Anschließend folgen die zur Planerstellung und Planbewertung verwendeten Modelle und Taktikbewertungsmethoden sowie das Assistenzsystem des PAA. Abschließend wird die Implementierung des Schedulers zur zeitlichen Optimierung und Ressourcenzuweisung dargestellt.

**Kapitel 5** behandelt die experimentelle Validierung der Planungsfähigkeiten des PAA. Es beschreibt die Versuchskampagne, den Aufbau und Ablauf der Experimente, die Missionsszenarien sowie die erhobenen Daten und Ergebnisse zur Planqualität.

**Kapitel 6** fokussiert auf die Validierung der Assistenzfunktionen. Es stellt die untersuchten Assistenzstufen vor, beschreibt deren Integration ins Cockpit, die Voruntersuchungen, Methodik, Missionsszenarien und die Auswertung der Ergebnisse.

**Kapitel 7** fasst die Arbeit zusammen und gibt einen Ausblick auf mögliche Weiterentwicklungen des PAA sowie auf dessen Übertragbarkeit in andere Anwendungsbereiche.

# 2 Theoretische Grundlagen

Dieses Kapitel stellt die theoretischen Grundlagen und Methoden vor, die der Konzeption und Implementierung des PAA zugrunde liegen. Zunächst wird die Mensch-Maschine-Kooperation mit Fokus auf HFE behandelt. Dabei werden traditionelle und moderne Ansätze der Aufgabenteilung beschrieben, verglichen und zusammengeführt.

Anschließend folgen die für diese Arbeit relevanten Planungs- und Optimierungsstrategien, darunter klassische KI-Planung, hybride Verfahren, Scheduling, Optimierungs- und Suchalgorithmen sowie dynamische Programmierung. Es schließt sich eine Darstellung des militärischen Einsatzkontexts an, einschließlich Planungs- und Führungsprozessen sowie operationeller Fähigkeiten, um ein fundiertes Verständnis des Anwendungsrahmens zu schaffen.

Darauf aufbauend wird der MUM-T Kampfflugzeugsimulator beschrieben, in dem der PAA integriert und getestet wurde. Neben der technischen Umgebung werden auch die relevanten Cockpitanzeigen erläutert. Abschließend gibt das Kapitel einen Überblick über bestehende Forschungsarbeiten zur Multi-Vehikel Mixed-Initiative-Planung.

## 2.1 Mensch-Maschine-Kooperation im Fokus von Human Factors Engineering

HFE ist zentral für die Gestaltung effektiver Mensch-Maschine-Interaktionen, da es Systeme an menschliche Fähigkeiten und Grenzen anpasst. Ziel ist es, Technologien so zu entwickeln, dass sie den Operator unterstützen, nicht überfordern (Anderson, 2013). Dies erfordert ein tiefes Verständnis kognitiver, physischer und ergonomischer Aspekte sowie benutzerfreundliche und leistungsoptimierende Systemgestaltung.

Dieses Kapitel vergleicht traditionelle und moderne Ansätze des HAT. Während klassische Systeme Automation auf klar definierte Aufgaben beschränken, übernehmen moderne Systeme zunehmend komplexe Funktionen wie Planung und Entscheidungsfindung. Dieser Wandel macht eine Neugestaltung von Schnittstellen und Interaktionsprotokollen erforderlich (Sheridan, 2016).

### 2.1.1 Traditionelle Human Factors Engineering Ansätze

*Grundprinzipien des traditionellen Human Factors Engineering*

Traditionelle HFE-Ansätze zielen darauf ab, Mensch-Maschine-Schnittstellen so zu gestalten, dass sie den natürlichen Fähigkeiten und Grenzen des Menschen entsprechen. Ziel ist es, Effizienz zu steigern, Fehler zu reduzieren und die Sicherheit zu erhöhen (Salvendy, 2012). Dies wird durch intuitive Bedienkonzepte und die Minimierung kognitiver Belastung erreicht.

Ein zentrales Merkmal ist die Betonung menschlicher Kontrolle: Der Mensch trifft kritische Entscheidungen, während Maschinen wohldefinierte Aufgaben übernehmen. Diese Rollenverteilung basiert auf der Annahme, dass menschliche Urteilsfähigkeit in unvorhersehbaren Situationen unverzichtbar ist (Bainbridge, 1983).

*Hierarchische Rollenverteilung in der Mensch-Maschine-Interaktion*

In klassischen Systemen agiert der Mensch als übergeordneter Entscheider, Maschinen führen Aufgaben unter Aufsicht aus. Dieses Modell geht davon aus, dass Menschen komplexe, dynamische Situationen besser bewältigen können, während Maschinen repetitive oder präzisionsintensive Aufgaben übernehmen.

Beispiele finden sich in der Luftfahrt, wo Piloten über Flugrouten und Notfallreaktionen entscheiden, während Systeme Routineaufgaben wie Flugbahnkorrekturen übernehmen (Woods, 1988). Ähnliches gilt für Industrieanlagen, Kernkraftwerke und Verkehrszentralen, wo automatisierte Systeme Daten liefern, aber der Mensch bei kritischen Ereignissen eingreift (Endsley & Garland, 2000; Sheridan, 2002).

*Strategien und Hierarchien der Automation in der Mensch-Maschine-Kooperation*

Ein zentrales Thema ist die sinnvolle Aufgabenverteilung zwischen Mensch und Maschine. Dabei stellt sich die Frage, wie Autonomie und Verantwortung verteilt werden sollen. Zur Strukturierung wurden verschiedene Levels of Automation (LOA) entwickelt, die die Rollenverteilung präzisieren. Die grundlegende Hierarchie nach (Sheridan & Verplank, 1978) beschreibt zehn Stufen, von vollständiger manueller Kontrolle bis hin zur vollständigen Automatisierung. Diese LOAs sind bis heute ein wichtiges Instrument zur Gestaltung effektiver Mensch-Maschine-Kooperationen, welche in Tabelle 2-1 veranschaulicht werden.

**Tabelle 2-1 Hierarchie der LOA's nach (Sheridan & Verplank, 1978)**

| | |
|---|---|
| (1) | Der Mensch erledigt die gesamte Aufgabe bis zu dem Punkt, an dem er sie dem Computer zur Ausführung übergibt |
| (2) | Der Computer hilft bei der Bestimmung der Optionen |
| (3) | Der Computer hilft bei der Bestimmung der Optionen und schlägt eine vor, der der Mensch nicht zu folgen braucht |
| (4) | Der Computer wählt eine Aktion aus, und der Mensch kann sie ausführen oder auch nicht |
| (5) | Der Computer wählt eine Aktion aus und führt sie aus, wenn der Mensch damit einverstanden ist |
| (6) | Der Computer wählt eine Aktion aus und informiert den Menschen rechtzeitig, um sie zu stoppen |
| (7) | Der Computer führt die gesamte Aufgabe aus und teilt dem Menschen notwendigerweise mit, was er getan hat |

| | |
|---|---|
| (8) | Der Computer führt die gesamte Aufgabe aus und teilt dem Menschen nur mit, was er getan hat, wenn der Mensch ausdrücklich darum bittet |
| (9) | Der Computer führt die gesamte Aufgabe aus und entscheidet, was dem Menschen mitgeteilt werden soll |
| (10) | Der Computer führt die gesamte Aufgabe aus, wenn er entscheidet, dass sie ausgeführt werden soll, und teilt dies dem Menschen mit, wenn er entscheidet, dass der Mensch informiert werden soll |

Diese Hierarchie differenziert zwischen der Generierung und Auswahl von Handlungsoptionen und legt den Fokus darauf, wer im System die Kontrolle hat und welche Informationen dem Menschen übermittelt werden. Sie beschreibt jedoch nicht, wie Mensch und System zentrale Steuerungsfunktionen gemeinsam ausführen können. Aufbauend auf Sheridan und Verplank entwickelten (Endsley & Kaber, 1999) eine erweiterte, zehnstufige LOA-Klassifikation, die sich besser für kognitive und psychomotorische Aufgaben eignet. Tabelle 2-2 zeigt diese Einteilung.

**Tabelle 2-2 LOA Klassifizierung für Mensch-Computer Leistung in dynamischen, Multi Task Szenarien nach (Endsley & Kaber, 1999)**

| LOA | Überwachung | Erzeugen | Auswählen | Umsetzen |
|---|---|---|---|---|
| **(1) Manuelle Steuerung** | Mensch | Mensch | Mensch | Mensch |
| **(2) Handlungsunterstützung** | Mensch/ Computer | Mensch | Mensch | Mensch/ Computer |
| **(3) Stapelverarbeitung** | Mensch/ Computer | Mensch | Mensch | Computer |
| **(4) Gemeinsame Steuerung** | Mensch/ Computer | Mensch/ Computer | Mensch | Mensch/ Computer |
| **(5) Entscheidungsunterstützung** | Mensch/ Computer | Mensch/ Computer | Mensch | Computer |
| **(6) Gemeinsame Entscheidungsfindung** | Mensch/ Computer | Mensch/ Computer | Mensch/ Computer | Computer |
| **(7) Starres System** | Mensch/ Computer | Computer | Mensch | Computer |
| **(8) Automatisierte Entscheidungsfindung** | Mensch/ Computer | Mensch/ Computer | Computer | Computer |
| **(9) Überwachende Steuerung** | Mensch/ Computer | Computer | Computer | Computer |
| **(10) Vollautomatisierung** | Computer | Computer | Computer | Computer |

**(1) Manuelle Steuerung:** Der Mensch führt sämtliche Aufgaben aus, einschließlich der Überwachung des Systemzustands, der Erstellung von Leistungsoptionen, der Auswahl der auszuführenden Option (Entscheidungsfindung) und der physischen Umsetzung.

**(2) Handlungsunterstützung:** Auf dieser Ebene unterstützt das System den Bediener bei der Ausführung der ausgewählten Handlung, wobei einige manuelle Steuerungsaktionen erforderlich sind.

(3) **Stapelverarbeitung:** Der Mensch erstellt und wählt die Optionen aus, die anschließend vom System automatisch umgesetzt werden. Die Automatisierung konzentriert sich somit primär auf die physische Durchführung der Aufgaben.
(4) **Gemeinsame Steuerung:** Mensch und Computer erzeugen beide potenzielle Entscheidungsoptionen. Obwohl der Mensch die endgültige Kontrolle über die Auswahl behält, wird die Ausführung der Aktionen zwischen Mensch und System geteilt.
(5) **Entscheidungsunterstützung:** Der Computer erstellt eine Liste mit Entscheidungsoptionen, aus der der Mensch wählen kann; alternativ kann der Bediener eigene Optionen entwickeln. Nach der Auswahl durch den Menschen übernimmt der Computer die Umsetzung.
(6) **Gemeinsame Entscheidungsfindung:** Der Computer generiert eine Auswahl an Entscheidungsoptionen, trifft eine Auswahl und führt diese aus, sofern der Mensch zustimmt. Der Mensch kann entweder der vom Computer getroffenen Wahl zustimmen oder eine vom Computer oder ihm selbst erstellte Option wählen, die dann vom Computer ausgeführt wird.
(7) **Starres System:** Diese Stufe kennzeichnet ein System, das dem Bediener lediglich eine begrenzte Auswahl an Aktionen bietet, aus denen er wählen muss. Der Bediener hat keine Möglichkeit, andere Optionen zu generieren. Dadurch ist das System relativ unflexibel und bietet dem Bediener nur einen geringen Spielraum bei der Auswahl. Die ausgewählten Maßnahmen werden jedoch vollständig realisiert.
(8) **Automatisierte Entscheidungsfindung:** Hier wählt das System eigenständig die beste Option aus und setzt diese auf Grundlage einer selbst erstellten Liste von Alternativen um (ergänzt durch Vorschläge des menschlichen Bedieners). Dieses System automatisiert somit nicht nur die Entscheidungsfindung, sondern auch die Generierung von Optionen.
(9) **Überwachende Steuerung:** Auf dieser Ebene generiert das System Optionen, trifft eine Auswahl und führt die Aktion durch. Der Mensch übernimmt hauptsächlich die Überwachung des Systems und greift bei Bedarf ein. Ein solches Eingreifen versetzt den Menschen in die Lage, eine andere Auswahl zu treffen, wodurch er faktisch zu einem Entscheidungsunterstützungslevel wechselt. Diese Stufe steht für ein typisches übergeordnetes Kontrollsystem, das in Verbindung mit einem hochautomatisierten System menschliche Überwachung und Eingriffe bei Bedarf vorsieht.
(10) **Vollautomatisierung:** Das System übernimmt alle Aktionen vollständig. Der Mensch ist aus dem Regelkreis ausgeschlossen und kann nicht eingreifen. Diese Stufe repräsentiert ein vollautomatisiertes System, bei dem menschliches Eingreifen als unnötig erachtet wird.

In modernen Flugsystemen sind **Management by Consent** und **Management by Exception** zwei weit verbreitete Strategien zur Mensch-Maschine-Aufgabenteilung (Billings, 1997).

- **Management by Consent:**
  Bei diesem Ansatz muss das automatisierte System vor jeder Aktion die ausdrückliche Zustimmung des Bedieners einholen (Billings, 1997). Dies stärkt das Situationsbewusstsein (SA) und die Kontrolle des Nutzers, erhöht jedoch den Kommunikationsaufwand Dieser Ansatz entspricht einem LOA zwischen 3 und 5 (Sheridan & Verplank, 1978). In stressreichen oder ermüdenden Situationen kann die Zustimmung des Bedieners jedoch oberflächlich erfolgen (Billings, 1997).

- **Management by Exception**
  Dieses Prinzip geht auf zurück, der empfahl, dass Manager nur zusammengefasste Berichte mit hervorgehobenen Abweichungen erhalten sollten. Übertragen auf automatisierte Systeme bedeutet dies, dass diese eigenständig handeln dürfen, solange keine außergewöhnlichen Situationen auftreten. Der Mensch greift nur bei Abweichungen ein oder kann Entscheidungen des Systems rückgängig machen (Billings, 1997). Dieser Führungsstil entspricht einem LOA zwischen 5 und 7.

*Grenzen und Herausforderungen traditioneller Ansätze*

Traditionelle HFE-Ansätze stoßen insbesondere in komplexen, dynamischen Umgebungen an ihre Grenzen. Eine zentrale Herausforderung ist die **kognitive Überlastung**, wenn Bediener mit mehr Informationen oder Entscheidungen konfrontiert sind, als sie verarbeiten können – etwa in der Luftverkehrssteuerung, bei militärischen Operationen oder in Notfallsituationen (Wickens et al., 2021). Ein klassisches Beispiel ist die Überforderung von Fluglotsen, die mehrere Flugzeuge gleichzeitig überwachen müssen.

Zudem fehlt es traditionellen Systemen oft an **Flexibilität**, um auf unvorhergesehene oder seltene Szenarien zu reagieren. Sie arbeiten meist regelbasiert und können nicht wie Menschen kreativ oder adaptiv handeln. In solchen Fällen kann die starre Automatisierung hinderlich sein, wenn schnelle, unkonventionelle Lösungen gefragt sind (Parasuraman & Riley, 1997).

### 2.1.2 Moderne Ansätze bei der Mensch-Maschine-Aufgabenteilung

*Erweiterung der Systemfähigkeiten: Kognition und Autonomie*

Moderne Systeme integrieren zunehmend **kognitive Funktionen**, die es ihnen ermöglichen, komplexe Aufgaben wie Situationsanalyse, Entscheidungsunterstützung und Planung eigenständig zu übernehmen. Durch KI und maschinelles Lernen können sie aus Daten lernen, Muster erkennen und in Echtzeit reagieren – etwa beim autonomen Fahren, wo Fahrzeuge nicht nur ihre Umgebung erfassen, sondern auch Verkehrssituationen analysieren und Handlungsstrategien ableiten (Cummings, 2017).

Einige Systeme schließen sogar den **kognitiven Loop** selbstständig: Sie erfassen, analysieren und verarbeiten Informationen bis zur Handlungsausführung – etwa in der industriellen Robotik oder in medizinischer Diagnostiksoftware, die auf Basis von Patientendaten Therapieempfehlungen gibt (Lee & See, 2004).

*Von hierarchisch zu kooperativ: Die moderne Dynamik in der Mensch-Maschine-Beziehung*

Der Wandel von hierarchischen zu **kooperativen Mensch-Maschine-Beziehungen** verändert die Interaktion grundlegend. Moderne Systeme agieren nicht mehr nur als Werkzeuge, sondern als **Teammitglieder**, die ihre Stärken in Entscheidungsprozesse einbringen. KI-gestützte Systeme ermöglichen eine tiefere Integration menschlicher und maschineller Fähigkeiten, was zu natürlicherer und effektiverer Zusammenarbeit führt (Bradshaw et al., 2004).

Vorteile sind u. a. eine höhere Effizienz durch Aufgabenverlagerung auf Maschinen sowie eine **adaptive Entscheidungsfindung**, die sich an veränderte Bedingungen anpassen kann(Johnson et al., 2014). Ein Beispiel ist der **Playbook-Ansatz** (Miller et al., 2005) , bei dem dynamische Handlungsvorschläge auf Basis früherer Erfahrungen und aktueller Daten zur Entscheidungsunterstützung in Echtzeit angeboten werden – etwa in der Notfallreaktion oder militärischen Taktikplanung.

*Integration und Innovation: Human-Agent Teaming und Joint Cognitive Systems*

Die Konzepte von HAT und Joint Cognitive Systems (JCS) stehen im Zentrum moderner Ansätze zur Mensch-Maschine Interaktion, insbesondere in sicherheitskritischen Bereichen wie der Luft- und Raumfahrt (Chen et al., 2025). Beide Konzepte zielen auf eine **gleichberechtigte Zusammenarbeit** zwischen Mensch und System, bei der Stärken kombiniert und Schwächen kompensiert werden.

Laut (Woods & Hollnagel, 2006). sollten Mensch und Maschine als Partner in einem gemeinsamen kognitiven System agieren, wobei Verantwortung geteilt wird – was die Zuverlässigkeit erhöht und Fehler reduziert. In der Praxis zeigt sich dies z. B. in der Luftfahrt, wo Piloten und autonome Systeme gemeinsam Navigation, Überwachung und Systemmanagement übernehmen (Clarke, 2020). Projekte wie das Skyborg-Programm der U.S. Air Force oder autonome Airbus-Testflüge verdeutlichen, wie **Vertrauen und Teamfähigkeit** zentrale Erfolgsfaktoren für solche Systeme sind.

Diese kooperative Interaktion ermöglicht eine gezielte Nutzung der jeweiligen Stärken von Mensch und Maschine und gleicht deren Schwächen aus. Bereits (Kaber & Endsley, 2004) betonten, dass effektives HAT eine klare Aufgabenverteilung sowie die Fähigkeit zur gegenseitigen Anpassung erfordert, um die Gesamtleistung zu steigern.

Aktuelle Studien wie (Chen et al., 2025) zeigen, dass HAT insbesondere in sicherheitskritischen Bereichen wie Verteidigung und Gesundheitswesen an Bedeutung gewinnt. Dabei wird die Notwendigkeit interdisziplinärer Ansätze betont, die sowohl technische als auch ethische Aspekte berücksichtigen müssen.

### 2.1.3 Vergleich und Zusammenführung

*Gegenüberstellung: Traditionelle versus moderne Ansätze*

Der Vergleich zeigt deutliche Unterschiede in Effektivität, Sicherheit und Benutzerfreundlichkeit. Während traditionelle Systeme auf klarer Rollentrennung basieren – der Mensch entscheidet, die Maschine führt aus – setzen moderne Systeme auf dynamische Kooperation und höhere Autonomie. Dies verbessert die Leistung in komplexen, sich schnell ändernden Umgebungen (Sheridan, 2016).

Traditionelle Ansätze verlassen sich stark auf menschliche Überwachung, was zu Überlastung und Fehlern führen kann. Moderne Systeme erkennen Risiken proaktiv und reagieren in Echtzeit, wodurch die Sicherheit steigt (Parasuraman & Riley, 1997). Zudem verbessern moderne, intuitiv gestaltete Schnittstellen die Benutzerfreundlichkeit (Lee & See, 2004). Die

Rolle des Menschen wandelt sich vom Überwacher zum interaktiven Entscheidungspartner, was neue Anforderungen an Ausbildung und Flexibilität stellt (Endsley, 2017b).

*Aussicht zu Entwicklungen und Herausforderungen*

Die Mensch-Maschine-Kooperation wird zunehmend durch KI und maschinelles Lernen geprägt. Lernfähige Systeme, die sich an neue Situationen anpassen, finden in vielen Branchen Anwendung – etwa in der Luftfahrt, wo die Zusammenarbeit zwischen Piloten und autonomen Systemen stetig optimiert wird (Kaber & Endsley, 2004).

Eine zentrale Herausforderung bleibt die **Verlässlichkeit** dieser Systeme und das **Vertrauen** der Nutzer. Zudem erfordert die steigende Komplexität kontinuierliche Anpassung von Ausbildung und Interface-Design, um Überlastung und Fehlinterpretationen zu vermeiden (Lee & See, 2004). Gleichzeitig bietet die Weiterentwicklung von HFE die Chance, Arbeitsplätze sicherer und menschengerechter zu gestalten. KI kann dabei helfen, monotone oder gefährliche Aufgaben zu übernehmen und den Menschen bei kognitiv anspruchsvollen Tätigkeiten zu unterstützen (Parasuraman & Riley, 1997).

### 2.1.4 Schlussfolgerung

Die Analyse zeigt, dass moderne Mensch-Maschine-Systeme durch KI und autonome Funktionen eine effektivere, sicherere und benutzerfreundlichere Interaktion ermöglichen. Sie verändern nicht nur die Rollenverteilung, sondern auch die Art, wie Planung und Unterstützung in komplexen Umgebungen umgesetzt werden. Intuitive Schnittstellen und proaktive Assistenzfunktionen machen moderne Systeme zu leistungsfähigen Partnern im Team mit dem Menschen.

## 2.2 Grundlagen zu Methoden der Planung und Optimierung

Dieser Abschnitt gibt einen Überblick über zentrale Planungs- und Optimierungsstrategien. Planung und Optimierung ermöglichen es, Handlungsoptionen zur Zielerreichung zu entwickeln und Aufgaben effizient zu verteilen – ein wesentlicher Beitrag zur Leistungssteigerung in Mensch-Maschine-Systemen. Wie in Kapitel 2.1.2 beschrieben, gewinnen diese Methoden mit zunehmender Autonomie und Kognition technischer Systeme weiter an Bedeutung, da sie eine effektivere Aufgabenteilung und Systemleistung ermöglichen.

### 2.2.1 Planung

Planung ist ein vielschichtiger Prozess, der Entscheidungen unter Berücksichtigung zukünftiger Konsequenzen trifft, deren Umsetzung organisiert und die Ergebnisse bewertet (Briston & Liversidge, 1979). Sie erfolgt inkrementell und adaptiv (Hayes-Roth, 1979) und kann entwicklungsorientiert, adaptiv, allokativ oder innovativ sein (Friedmann, 1967). (Miller et al., 1960) definieren Planung als:

*"[...] any hierarchical process in the organism that can control the order in which a sequence of operations is to be performed"*

– also als hierarchischen Prozess zur Strukturierung von Handlungssequenzen zur Zielerreichung.

In der KI ist Planung ein zentrales Forschungsfeld, das sich mit der Erstellung komplexer Handlungsabläufe befasst. Es geht über einfache Problemlösung hinaus und nutzt strukturierte Repräsentationen und Algorithmen zur effizienten Plangenerierung (Russel et al., 2016). Die Forschung hat sich stark weiterentwickelt: (Hendler et al., 1990) bieten einen Überblick über zentrale Konzepte, (Wilkins, 2014) erweitert klassische Planungsparadigmen um Aspekte wie Ressourcen und Plan-Kritik, (Nareyek et al., 2005) untersuchen die Integration von Constraints, und. (Weld, 1999) hebt Fortschritte bei propositionalen Methoden hervor, etwa in der Raumfahrtplanung. Der Fokus dieser Arbeit liegt auf der Anwendung dieser Methoden im **menschenzentrierten Kontext** (Lindner, 2022).

*Klassische Planung in der KI*

Die klassische KI-Planung ist **modellbasiert**: Ein Planungssystem erhält eine Beschreibung des Ausgangszustands, eine Menge verfügbarer Aktionen zur Veränderung dieses Zustands sowie eine Zieldefinition. Ziel ist es, einen Plan zu generieren, der das gewünschte Ziel effizient erreicht. Planung wird dabei als die Erstellung, Analyse und Ausführung von Handlungsfolgen verstanden, die auf formalen Repräsentationen und Problemlösungsmethoden beruhen (Russel et al., 2016).

Im Zentrum steht die Verwendung einer **Problembeschreibungssprache**, meist logikbasiert, um Zustandstransformationsprobleme zu modellieren. Planungssysteme – sogenannte Planer – nutzen diese Modelle und wenden Verfahren wie **heuristische Suche** oder **propositionale Erfüllbarkeit** an, um Lösungen zu finden. Eine Herausforderung besteht darin, den Zustandsraum effizient durchsuchbar zu machen und geeignete Heuristiken zu entwickeln.

Ein wesentliches Merkmal klassischer Planer ist ihre **Domänenunabhängigkeit**: Sie können theoretisch auf beliebige Probleme angewendet werden, sofern diese in der jeweiligen Modellierungssprache beschrieben sind. In der Praxis variiert jedoch ihre Effektivität je nach Problemstruktur (Haslum et al., 2019).

Ein bedeutender Fortschritt in der KI-Planung war die Entwicklung der Planning Domain Definition Language (PDDL). Sie hat sich als Standard etabliert und erlaubt die formale Beschreibung von Planungsproblemen. PDDL trennt die Modellierung in zwei Teile:

- **PDDL-Domäne**: Definiert das grundlegende Modell aller relevanten Aspekte in der Planungsumgebung, einschließlich Statusvariablen, die wahr oder falsch sein können, und der Aktionen.
- **PDDL-Problem**: Definiert eine spezifische Problemstellung innerhalb der Domäne, einschließlich des Ausgangszustands und des zu erreichenden Zielzustands.

PDDL basiert auf der Definition von Operatoren, die beschreiben, wie sich der Zustand durch eine Aktion verändert. Dabei wird nicht der gesamte Weltzustand modelliert, sondern nur die durch die Aktion bewirkten Änderungen.

Trotz ihrer weiten Verbreitung ist PDDL kein universeller Standard – verschiedene Versionen unterstützen unterschiedliche Features, und nicht alle Planer sind mit allen Versionen kompatibel (Haslum et al., 2019).

*Hierarchical Task Network*

Die Hierarchical Task Network (HTN) ist eine KI-Planungsmethode, die sich deutlich von der klassischen Planung unterscheidet Sie basiert auf einem hierarchischen Netzwerk aus Aufgaben, das aus **primitiven Tasks** (direkt ausführbar) und **zusammengesetzten Tasks** (weiter zerlegbar) besteht. Ausgangspunkt ist ein initiales Task-Netzwerk, das schrittweise in Subtasks zerlegt wird, bis nur noch primitive Aufgaben übrigbleiben. Diese bilden dann den ausführbaren Plan.

HTN-Planung wird häufig in **praktischen, statischen Anwendungen** eingesetzt (Bercher et al., 2016). Sie ist besonders effizient, wenn umfangreiches und gut strukturiertes **Domänenwissen** vorhanden ist, das konkrete Lösungswege vorgibt (Georgievski & Aiello, 2014). Allerdings stößt HTN an Grenzen bei der Modellierung **komplexer zeitlicher Abhängigkeiten** (Qi et al., 2017; Xiao et al., 2017) und bei der Skalierung auf **dynamische, realweltliche Szenarien**, da sie komplexitätstheoretisch anspruchsvoll ist (Brand et al., 2024).

*Hybride Planung*

Obwohl KI-Planungssysteme sehr leistungsfähig sind, stoßen sie bei der Anwendung auf reale, dynamische Probleme oft an ihre Grenzen (Cesta et al., 2004). Ein vielversprechender Ansatz zur Überwindung dieser Einschränkungen ist die **hybride Planung**, bei der verschiedene Planungs-, Scheduling- und Optimierungsmethoden kombiniert werden (Schattenberg et al., 2005). Ziel ist es, die Stärken unterschiedlicher Verfahren zu vereinen, um komplexe Aufgaben effizienter und flexibler zu lösen.

Ein Beispiel ist die Kombination von **HTN-Planung** mit **Partial Order Casual Link** (POCL)-Planung, wie sie (Bercher & Biundo, 2012) vorschlagen. Dabei werden auch sogenannte „soft goals“ berücksichtigt – also wünschenswerte, aber nicht zwingend notwendige Zielzustände. Allerdings zeigen (Chen & Bercher, 2022), dass HTN-basierte Systeme bei dynamischen Umgebungen an ihre Grenzen stoßen, insbesondere wenn schnelle Reaktionen auf unvorhergesehene Ereignisse erforderlich sind.

Ein weiterer hybrider Ansatz stammt von (Hooker, 2004), der **Mixed Integer Linear Programming**(MILP)[1] mit **Constraint Programming** (CP)[2] kombiniert. Diese Methode wurde erfolgreich in Bereichen wie Produktion und Supply Chain Management eingesetzt, wo sie die Rechenzeit signifikant reduzieren konnte. Allerdings sind diese Anwendungsdomänen meist statisch, mit wenig variierenden Aufgaben und eindimensionalen Zieldefinitionen wie der Minimierung von Kosten oder Durchlaufzeiten.

[1] Mathematische Optimierungstechnik, welche lineare Beziehungen zwischen Variablen modelliert, wobei einige der Variablen ganzzahlige Werte annehmen müssen, um ein optimales Ergebnis zu finden.

[2] Methode zur Problemlösung, Variablen mit einem Satz von Einschränkungen (Constraints) zu belegen und dann Lösungen zu finden, die alle Einschränkungen erfüllen.

Neben methodischen Kombinationen gewinnen auch MIP zunehmend an Bedeutung (Allen et al., 1999; Burstein & McDermott, 1996; Schmitt, 2021) . Sie setzen auf eine **kooperative Interaktion** zwischen Mensch und Planungssystem. Der Mensch bringt Erfahrung, Intuition und Kontextwissen ein, während das System den Suchraum systematisch analysiert. Der Schlüssel zum Erfolg liegt in der **opportunistischen Übergabe der Kontrolle** an den jeweils kompetenteren Partner – je nach Situation und Entscheidungskontext.

### 2.2.2 Scheduling

Scheduling bezeichnet die **zeitliche und ressourcenbezogene Zuordnung von Vorgängen** unter bestimmten Randbedingungen, mit dem Ziel, Fristen einzuhalten und Ressourcen optimal zu nutzen. Im Unterschied zur Planung, die festlegt, **was** getan werden soll, beschäftigt sich Scheduling mit dem **Wie** und **Wann** – etwa durch Minimierung der Gesamtdauer oder Maximierung der Ressourcenauslastung (Brucker, 2004; Pinedo, 2002).

Das klassische Scheduling stammt aus dem **Operations Research** (OR)[3] und nutzt mathematische Modelle zur Optimierung. Besonders verbreitet ist **MILP**, bei dem Variablenwerte zur Optimierung einer Zielfunktion unter linearen Nebenbedingungen berechnet werden(Jain & Grossmann, 2001). OR-Methoden sind zwar etabliert, setzen aber voraus, dass alle Aktionen im Voraus bekannt sind und führen meist zu einer einzigen Lösung – ohne alternative Optionen zu berücksichtigen (Schattenberg, 2009).

Im Gegensatz dazu bietet **KI-basiertes Scheduling** flexiblere Modellierungsmöglichkeiten. Es nutzt Suchheuristiken und Inferenzmechanismen, um auch unter Unsicherheit oder in dynamischen Umgebungen Lösungen zu finden. Eine zentrale Technik ist das **Constraint Satisfaction Problem** (CSP), bei dem Werte für Variablen so gewählt werden, dass alle Einschränkungen erfüllt sind (Brailsford et al., 1999). CSPs kombinieren Suchalgorithmen mit Propagationsmechanismen und berücksichtigen dabei z. B. Ressourcenverfügbarkeit oder Aufgabenprioritäten.

### 2.2.3 Optimierungsmethoden und Suchalgorithmen

Optimierungsmethoden und Suchalgorithmen sind grundlegende Werkzeuge in Informatik, Mathematik und OR, um aus vielen möglichen Alternativen die **beste Lösung** zu identifizieren. Sie lassen sich grob in **lokale** und **globale** Strategien unterteilen.

**Lokale Suchstrategien** verbessern eine bestehende Lösung schrittweise, indem sie deren Nachbarschaft durchsuchen. Ein klassisches Beispiel ist das **Gradientenverfahren** *(Gradient Descent),* das Parameter iterativ in Richtung des steilsten Abstiegs verändert. (Ruder, 2016) beschreibt Varianten wie Stochastic Gradient Descent, Momentum, Adagrad und Adam und vergleicht deren Stärken und Schwächen.

**Globale Suchstrategien** durchsuchen den gesamten Lösungsraum, um ein globales Optimum zu finden. Ein prominentes Beispiel ist der **A*-Algorithmus**, der reale Kosten mit heuristischen

[3] Interdisziplinäres Gebiet, welches mathematische Modelle, Statistiken und Algorithmen verwendet, um komplexe Entscheidungsprobleme zu analysieren und optimale oder verbesserte Lösungen zu finden.

Schätzungen kombiniert, um den effizientesten Pfad zu berechnen – etwa in Robotik, Spielen oder Netzwerk-Routing (Hart et al., 1968; Yang & Cho, 2019).

**Greedy-Algorithmen** treffen in jedem Schritt die lokal beste Entscheidung in der Hoffnung, dass diese zu einer global optimalen Lösung führt. Sie sind einfach und schnell, garantieren aber nicht immer optimale Ergebnisse. Ihre Wirksamkeit hängt stark von der Problemstruktur ab (Cormen et al., 2022).

Ein weiteres Verfahren ist **Simulated Annealing**, das von der Metallurgie inspiriert ist. Es erlaubt gelegentlich schlechtere Lösungen, um lokale Minima zu überwinden. Es wurde z. B. erfolgreich zur Optimierung von Windpark-Layouts eingesetzt (Yang & Cho, 2019).

Auch **Ant Colony Optimization** ist ein bio-inspiriertes Verfahren, das das Verhalten von Ameisen beim Finden kürzester Wege nachahmt. Es wurde u. a. für das **Job-Shop-Scheduling** eingesetzt, wie (Flórez et al., 2013) zeigen.

Die Wahl der geeigneten Methode hängt von der Problemstellung, den verfügbaren Ressourcen und den Zielkriterien ab. Oft ist eine Kombination mehrerer Verfahren sinnvoll, um robuste und effiziente Lösungen zu erzielen.

### 2.2.4 Dynamische Programmierung

Dynamische Programmierung ist eine Methode zur Lösung komplexer Probleme, indem diese in einfachere Teilprobleme zerlegt werden. Diese Technik vermeidet die Berechnung redundanter Teilprobleme, indem sie die Ergebnisse dieser Teilprobleme in einer Tabelle speichert. Das Verfahren ist besonders effektiv bei Problemen, die zwei Schlüsseleigenschaften aufweisen: eine optimale Teilstruktur und sich überschneidende Teilprobleme. Eine optimale Substruktur bedeutet, dass sich die Lösung eines Optimierungsproblems aus den optimalen Lösungen seiner Teilprobleme zusammensetzt. Sich überschneidende Teilprobleme bedeuten, dass der Raum der Teilprobleme begrenzt ist, d.h., jeder rekursive Algorithmus, der zur Problemlösung dient, wiederholt die Lösung derselben Teilprobleme, statt ständig neue zu generieren (Bellman, 1966). Dynamische Programmierung kann entweder mittels eines Top-Down-Ansatzes mit Memoisierung[4] oder durch einen Bottom-Up-Ansatz implementiert werden. Beim Top-Down-Ansatz wird ein rekursiver Algorithmus verwendet, bei dem die Ergebnisse jedes Teilproblems gespeichert werden, um Mehrfachberechnungen zu vermeiden. Der Bottom-Up-Ansatz hingegen löst zuerst alle kleineren Teilprobleme und kombiniert deren Lösungen anschließend, um die Lösungen für größere Probleme zu konstruieren.

Dynamische Programmierung wird zur Lösung von Optimierungsproblemen eingesetzt, bei denen eine Reihe von Entscheidungen zu einer optimalen Lösung führen muss. Ihr Einsatzgebiet ist vielfältig und umfasst unter anderem die folgenden Bereiche (Cormen et al., 2022; Neumann, 1993):

- Algorithmen zur Berechnung der kürzesten Pfade in der Graphentheorie.

[4] Memoisierung ist eine Technik zur Beschleunigung von Computerprogrammen, indem Rückgabewerte von Funktionen zwischengespeichert werden, anstatt neu zu berechnen.

- Probleme in der Kombinatorik, etwa die Berechnung der Anzahl der Wege zu einer bestimmten Position oder der Gesamtzahl der einzigartigen Wege in einem Gitter.
- Sequenzabgleich in der Bioinformatik.
- Optimale Suchbäume in der Datenbankoptimierung.

## 2.3 Militärischer Einsatzbereich und Hintergrund

Dieses Kapitel beschreibt den Kontext und Anwendungsfall der Arbeit. Es umfasst den Planungs- und Führungsprozess militärischer Luftoperationen, die Integration unbemannter Systeme in einen MUM-T-Verbund sowie die operationellen Anforderungen und den für diese Arbeit relevanten Missionstyp.

### 2.3.1 Planungsprozess militärischer Luftoperationen

Militärische Luftoperationen basieren auf einem mehrstufigen Planungsprozess (siehe Abbildung 2-1).

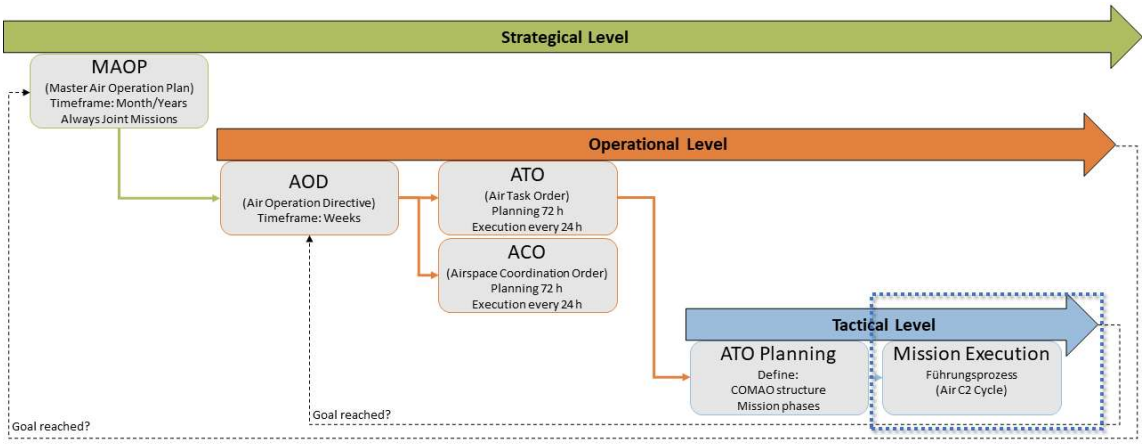



**Abbildung 2-1 Planungsprozess innerhalb der Luftwaffe nach (Lindner & Schulte, 2024) (der blaue Kasten zeigt die Systemgrenze dieser Arbeit)**

Auf der **strategischen Ebene** werden langfristige Ziele auf Basis politischer Vorgaben definiert. Die **operative Ebene** konkretisiert diese Ziele in Form einer **Air Operation Directive** (AOD), die u. a. Prioritäten, Zielvorgaben und Ressourcenzuweisungen enthält

Darauf aufbauend wird eine **Air Task Order** (ATO) erstellt, die konkrete Aufgaben für einen kurzen Zeitraum (wenige Tage) festlegt. Die ATO definiert den Ablauf und die Koordination der eingesetzten Luftfahrzeuge. Bei komplexen Einsätzen mit verschiedenen Flugzeugtypen spricht man von einer **COMAO**. Die vorliegende Arbeit untersucht, wie ein MUM-T-Ansatz diesen Planungsprozess während der Missionsdurchführung unterstützen kann.

### 2.3.2 Führungsprozess militärischer Luftoperationen

Die Durchführung militärischer Luftoperationen erfolgt über eine hierarchische Führungsstruktur, typischerweise im Rahmen einer COMAO. Diese umfasst den koordinierten Einsatz unterschiedlicher Luftfahrzeugtypen zur Erreichung gemeinsamer Ziele. Eine COMAO

kann 20 bis 100 Flugzeuge umfassen und folgt dem Prinzip der **zentralen Steuerung bei dezentraler Durchführung** (Fredriksen, 2018).

Das **Combined Air Operation Center** (CAOC) übernimmt die strategische Leitung (siehe Abbildung 2-2).

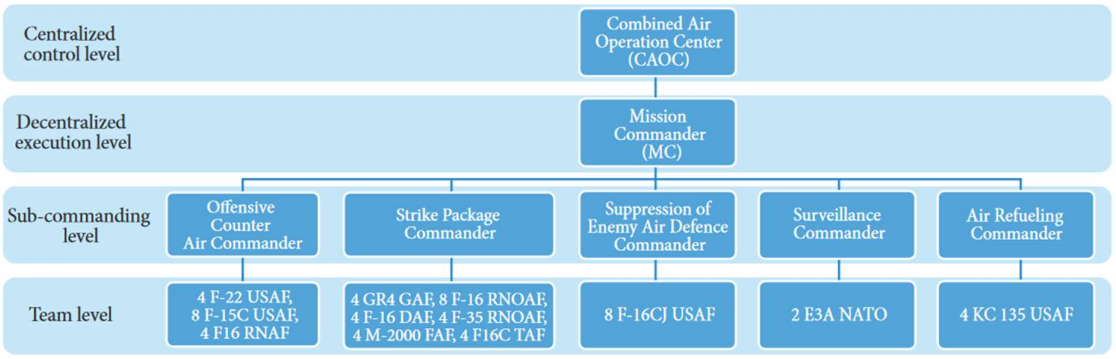



**Abbildung 2-2 Beispielaufbau einer COMAO nach Fredriksen, 2018 (Maier et al., 2024)**

Unterhalb des CAOC agiert der **Mission Commander** (MC), dem mehrere **Flight Leads** (FL) unterstellt sind. Jeder FL führt ein sogenanntes Package – ein Team aus mehreren Plattformen mit einem gemeinsamen Teilziel. Die FLs koordinieren die Durchführung auf taktischer Ebene.

Der Führungsprozess (siehe Abbildung 2-3) gliedert sich in mehrere Ebenen.

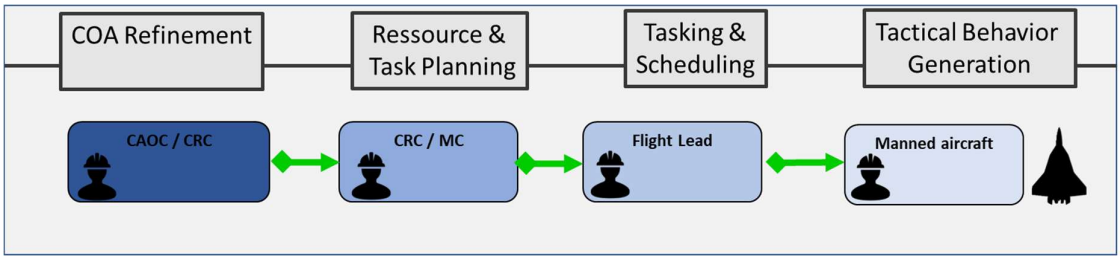



**Abbildung 2-3 Führungsprozess über alle Ebenen einer COMAO und die jeweiligen Hauptaufgaben (Maier et al., 2024)**

- **CAOC** *und* **Command and Reporting Center** (CRC) geben die strategische Richtung vor vor (Course of Action (COA) und passen Ressourcen dynamisch an.
- Der **MC** plant die Ressourcenzuweisung und koordiniert die FLs.
- Die **FLs** übernehmen das Tasking & Scheduling für ihre Teams.
- Auf der untersten Ebene erfolgt die **Tactical Behaviour Generation**, bei der Entscheidungen in Echtzeit getroffen und umgesetzt werden.

Abbildung 2-4 zeigt eine beispielhafte COMAO mit drei Packages, wobei der MC gleichzeitig FL des STRIKE-Packages ist, das für das Primärziel verantwortlich ist.

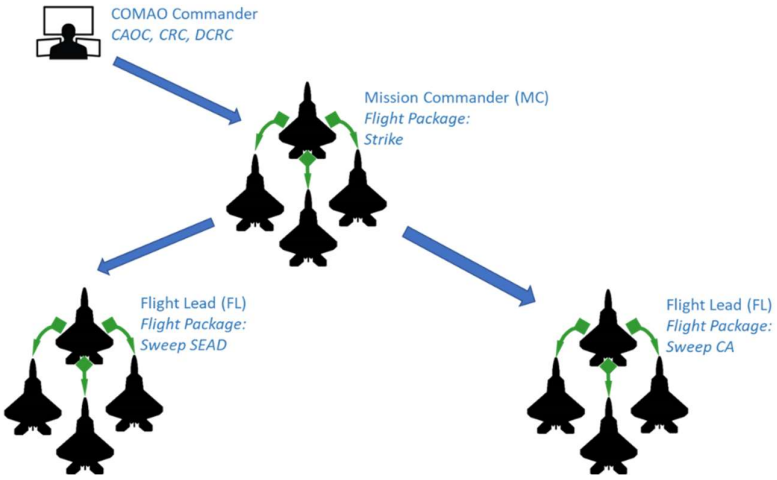



**Abbildung 2-4 Vereinfachte Darstellung der Struktur einer COMAO (Maier et al., 2024)**

### 2.3.3 Erweiterung des Führungsprozesses um unbemannte Einheiten

Zukünftige Luftoperationen werden zunehmend im **Verbund bemannter und unbemannter Plattformen** durchgeführt (Rieks, 2023). Ziel ist es, die Einsatzfähigkeit zu erhöhen und gleichzeitig den Personaleinsatz zu reduzieren. (Schulte, 2019) definiert MUM-T als:

*"Interoperabilität von bemannten und unbemannten Plattformen (Luft, Land, See) zur Verfolgung eines gemeinsamen Missionsziels. Bemannte und unbemannte Systeme werden dabei in demselben intentionalen, räumlichen und zeitlich begrenzten Kontext eingesetzt."*

Im Gegensatz zur bisherigen UAV-Steuerung durch Bodenstationen sollen in MUM-T *Piloten im Cockpit* die Führung der UAVs übernehmen. Dies bringt mehrere Vorteile (Schulte, 2019):

1. **Direkte Lagebeurteilung**: Piloten im Einsatz können schneller und zielgerichteter entscheiden, da sie unmittelbar am Geschehen beteiligt sind.
2. **Effektivere Entscheidungsfindung**: Der Mensch bleibt zentrale Instanz, auch bei automatisierten Systemen. Die Kommunikation zwischen Mensch und Maschine wird dadurch optimiert.
3. **Robustere Kommunikation**: Die Führung aus der Luft reduziert die Anfälligkeit für elektronische Störungen, da keine Langstreckenverbindung zur Bodenstation nötig ist.
4. **Rollenverschiebung**: Die Aufgaben des Piloten erweitern sich, externe UAV-Operateure werden überflüssig – das reduziert die Zahl der beteiligten Personen im Gefecht, ohne die Effektivität zu mindern.

Diese Struktur stärkt die **Reaktionsfähigkeit, Effizienz und Robustheit** zukünftiger Luftoperationen und bildet die Grundlage für die in dieser Arbeit untersuchte MUM-T-Integration.

Die Einführung unbemannter Plattformen im Rahmen des MUM-T-Konzepts beginnt mit der Erweiterung der untersten Führungsebene um UAVs, die **auftragsbasiert** geführt werden (siehe 2.4.3). Abbildung 2-5 zeigt, wie ein FL sowohl bemannte als auch unbemannte Plattformen gleichwertig führt. Dies verdeutlicht, dass UAVs in die bestehende

Führungsstruktur integriert werden sollen – mit vergleichbarem Führungsgrad wie bemannte Systeme.

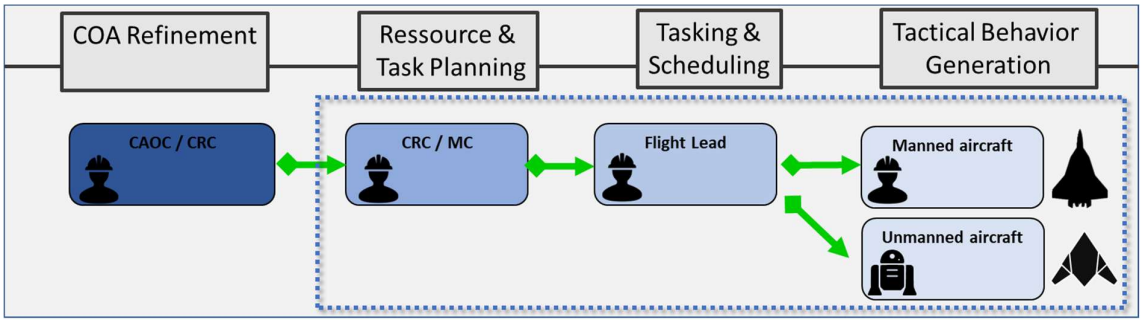



**Abbildung 2-5 Erweiterung der Ausführungsebene um unbemannte Plattformen (der blaue Kasten zeigt die Systemgrenze des MUM-T Kampfflugzeugsimulators (siehe 2.4), welcher zur Durchführung der Experimente dieser Arbeit verwendet wurde) (Maier et al., 2024)**

In einer abstrahierten Darstellung (Abbildung 2-6 ) werden alle bemannten Teammitglieder auf der taktischen Ebene durch UAVs ersetzt. Jedem Package steht weiterhin ein bemannter FL vor, der dem MC unterstellt ist.

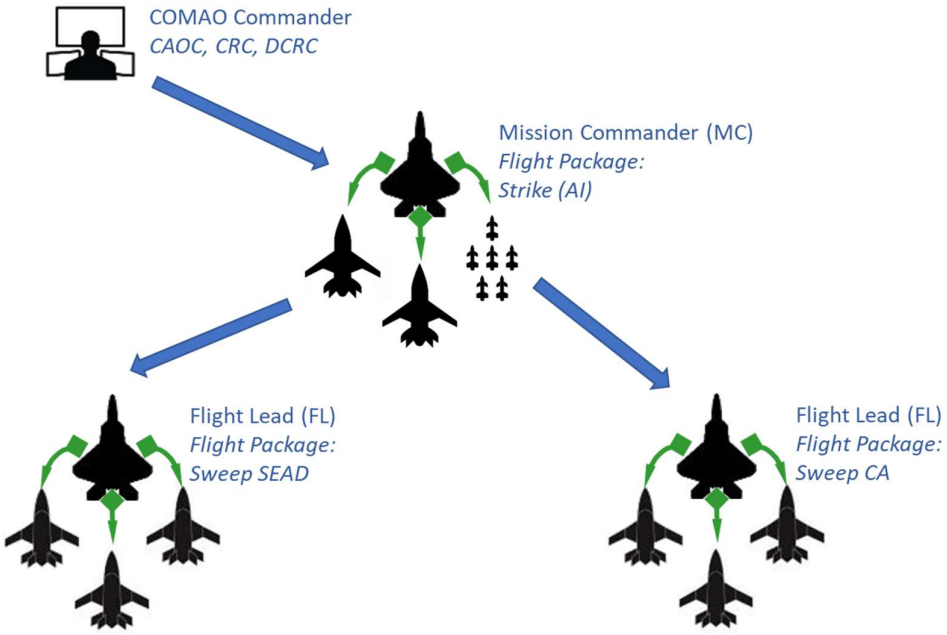



**Abbildung 2-6 Darstellung einer COMAO in einem MUM-T Umfeld (Maier et al., 2024)**

MUM-T bietet zahlreiche Vorteile für Luftoperationen:

- **Schnellere Entscheidungsfindung** durch direkte Lagebeurteilung im Einsatzraum.
- **Effizientere Führung** durch die Integration des Menschen in den Entscheidungsprozess.
- **Robustere Kommunikation**, da keine störanfällige Langstreckenverbindung zur Bodenstation nötig ist.
- **Reduzierter Personalbedarf**, da UAVs direkt aus dem Cockpit geführt werden können.

Gleichzeitig führt MUM-T zu einer **signifikanten Erweiterung des Aufgabenbereichs** des Piloten. Dies erhöht die kognitive Belastung und stellt neue Anforderungen an Missionsplanung, Plattformdesign und Cockpitgestaltung(Schulte, 2019).

### 2.3.4 Operationelle Fähigkeiten

Die North Atlantic Treaty Organization (NATO) definiert in ihrem AJP-3.3 Standard (North Atlantic Treaty Organization, 2016) fünf zentrale Typen für Luftoperationen:

1. **Counter Air:** Sicherung der Luftüberlegenheit
   a) *Offensive Counter Air (OCA)*
      - Operationen zur Zerstörung, Störung oder Beeinträchtigung gegnerischer Luft- und Raketenfähigkeiten.
        - Bodenangriffsoperationen (Air-To-Ground (AG))
        - Luft-Luft-Einsätze (Air-To-Air (AA))
        - Ausschaltung gegnerischer Luftabwehr (Suppression of enemy air defenses (SEAD), Destruction of enemy air defenses (DEAD))
   b) *Defensive Counter Air (DCA)*
      - Operationen zum Schutz befreundeter Streitkräfte und lebenswichtiger Interessen vor gegnerischen Luft- und Raketenangriffen
        - Alarmrotte zur Flugsicherung und Gefahrenabwehr (Quick Reaction Alert (QRA))
        - Defensiver Einsatz zur Verteidigung gegen gegnerische Luftstreitkräfte eines bestimmten Bereichs (Combat Air Patrol (CAP))
2. **Attack:** Erzielen taktischer, operativer und strategischer Effekte.
   a) *Strategische Angriffe*
      - Anvisieren von Gegnern durch strategische Angriffe, um taktische, operative und strategische Effekte zu erzielen.
   b) *Operationen zur Abwehr von Bodentruppen*
      - Operationen zur Land- und Seeabwehr
      - Beitrag der Luftwaffe in feindlichen Gebieten
      - Beitrag der Luftwaffe zu maritimen Operationen
   c) *Luftgestützte Informationsmaßnahmen*
      - Fokussierung auf nicht-tödliche Effekte, um Willen, Verständnis und Verhalten des Gegners zu beeinflussen.
3. **Intelligence, Surveillance and Reconnaissance (ISR):** Aufklärung und Überwachung.
4. **Air Mobility:** Lufttransport und -betankung.
5. **Support to Joint Personell Recovery (JPR):** Rettung isolierten Personals.

Der Fokus dieser Arbeit liegt auf **SEAD-Missionen** (vgl. 1.a) im Rahmen von OCA. Das US-Verteidigungsministerium definiert SEAD als:

*„Activity that neutralizes, destroys, or temporarily degrades surface-based enemy air defenses by destructive and/or disruptive means."* (Joint Chiefs of Staff, 2004).

Ziel ist die Bekämpfung feindlicher **Boden-Luft-Raketenstellungen** (*engl. surface-to-air-missile* (SAM)), die stationär oder mobil sein können und durch Radar- oder Infrarotsysteme unterstützt werden (Zaluga, 2000).

Im MUM-T Kampfflugzeugsimulator (siehe 2.4), wurden verschiedene SEAD-Methoden implementiert, angelehnt an (Bolkcom, 2005).

- **High Speed Anti Radiation Missiles** (HARM): Zerstört feindliche Radare. Beim Anflug schalten SAMs ihre Radare ab, was sie temporär kampfunfähig macht.
- **Electronic Attack (EA):** UAVs stören die Radarreichweite von SAMs, wodurch die Erkennungswahrscheinlichkeit sinkt.
- **SWARM_EA:** Ein UAV bringt einen Schwarm von Kleinstdrohnen aus, der über der SAM-Stellung kreist und deren Radar deaktiviert (Lindner, 2022).

Die in der Simulation verwendeten SAM-Systeme sind in Tabelle 2-3 dargestellt. Ihre Parameter (Reichweite, Munitionsanzahl, Zielverfolgungskapazität) wurden an die Anforderungen der Simulationsumgebung angepasst und entsprechen nicht den realen Werten.

**Tabelle 2-3 Übersicht der in der Simulation verfügbaren SAM-Stellungen**

| Name | Max. Reichweite [NM] | Munitionsanzahl | # gleichzeitig erfassbare Ziele |
|---|---|---|---|
| SA 10B | 40 | 12 | 2 |
| SA 10A | 25 | 6 | 2 |
| SA 17 | 25 | 24 | 4 |
| SA 11 | 19 | 24 | 2 |
| SA 26 | 15 | 4 | 1 |
| SA 15 | 6.5 | 64 | 3 |
| SA 14 | 2 | 1 | 1 |

In der Simulationsumgebung genügt es, SAM-Stellungen des Typs SA-14 und SA-15 mit einer einzelnen HARM zu bekämpfen, da die Reichweite der UAVs für das Ausbringen einer HARM größer ist als die der SAM-Stellungen.

## 2.4 MUM-T Kampfflugzeugsimulator

Zur Unterstützung der Forschung im Bereich militärischer MUM-T-Operationen entwickelt das Institut für Flugsysteme (IFS), Professur für Flugmechanik und Flugführung (FMFF) der Universität der Bundeswehr München (UniBwM) seit 2008 einen modularen Kampfflugzeugsimulator. Dieser besteht aus einem vernetzten System aus Software, Hardware, Touchscreens, Sensoren und Sichtsystemen, das die Durchführung von MUM-T-Missionen in verschiedenen Cockpitkonfigurationen und COMAO-Kräfteansätzen realitätsnah simuliert.

### 2.4.1 Cockpit Konfigurationen und Hardwareaufbau

Abbildung 2-7 zeigt den Kampfflugzeugsimulator am IFS-FMFF.



**Abbildung 2-7 Kampfflugzeugsimulator am IFS**

Der Simulator unterstützt verschiedene Konfigurationen:

- Single-Cockpit
- Dual-Cockpit
- 2x Single-Cockpit
- 2x Dual-Cockpit
- Single-Cockpit + Dual-Cockpit

*Hardwareaufbau*

Der Hardwareaufbau (siehe Abbildung 2-8 ) basiert auf einem verteilten Rechnernetzwerk mit folgenden Komponenten:

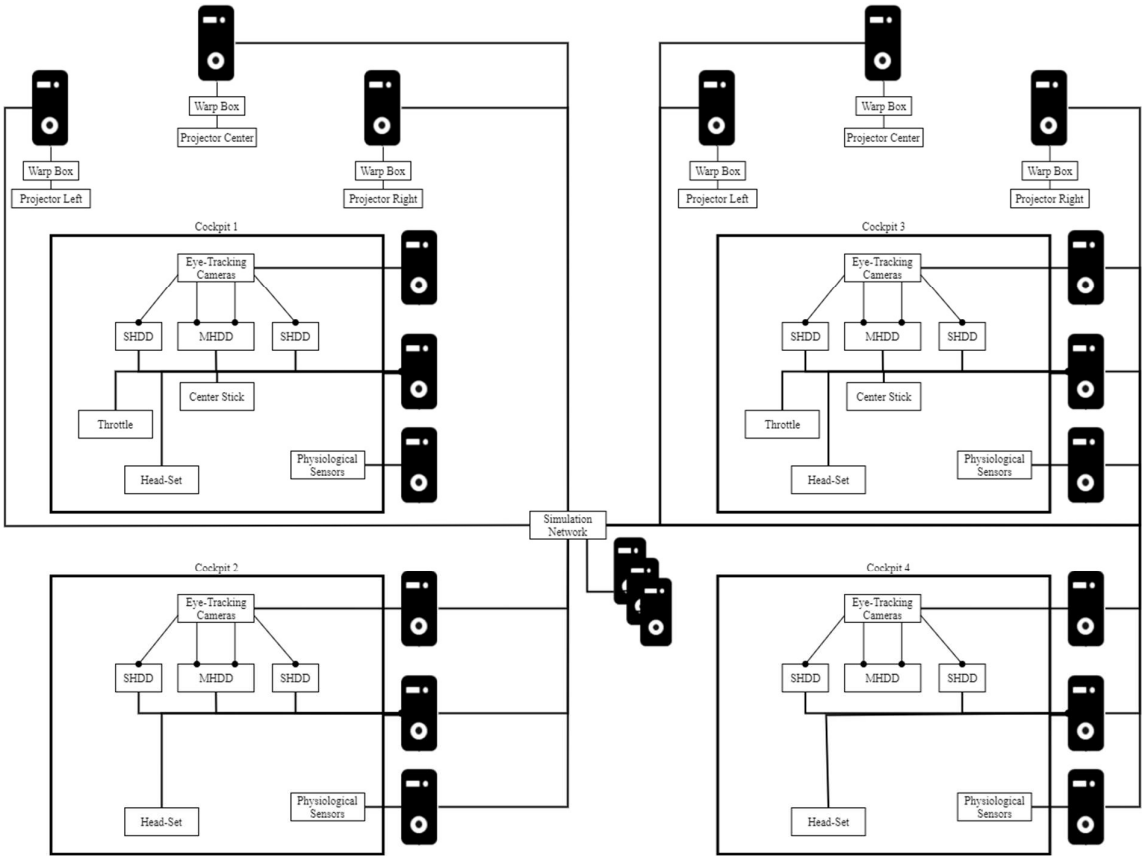



**Abbildung 2-8 Hardwareaufbau der Simulator Umgebung**

- **Zentrales Rechnersystem:** Verwaltung des Simulationsnetzwerks.
- **Szenarien Rechner:** Missions- und Lagedaten, Routenplanung.
- **Projektionsrechner:** Darstellung der Außenwelt.
- **Cockpit Rechner:** Anzeige der Interfaces, Verarbeitung von Eingaben.
- **Messtechnik Rechner:** Erfassung von Eye-Tracking- und Biosignalen.

Abbildung 2-9 zeigt den Cockpitaufbau eines Frontcockpits.




**Abbildung 2-9 Aufbau eines Frontcockpits**

Das Frontcockpit besteht aus einem **Multi-Functional Head-Down Display** (MHDD) und zwei **Side-Head-Down-Displays** (SHDD). Es ist mit Center Stick und Throttle für die manuelle Steuerung ausgestattet. Vier Eye-Tracking-Kameras erfassen Blickbewegungen und Fixationszeiten. Die hinteren Cockpits sind identisch aufgebaut, jedoch ohne Steuerungselemente.

*Kommunikationsschnittstelle*

Zur Systemintegration wird das **Robot Operating System 2** (ROS2) verwendet (Macenski et al., 2022). Es bietet hohe Skalierbarkeit, Sicherheitsfunktionen und Analysewerkzeuge zur Fehlerdiagnose und Missionswiedergabe (Chen et al., 2023).

### 2.4.2 Cockpit Interfaces

Die visuelle Gestaltung des Cockpits (Abbildung 2-10) umfasst drei Touchscreens und ein **Head-Up-Display** (HUD).

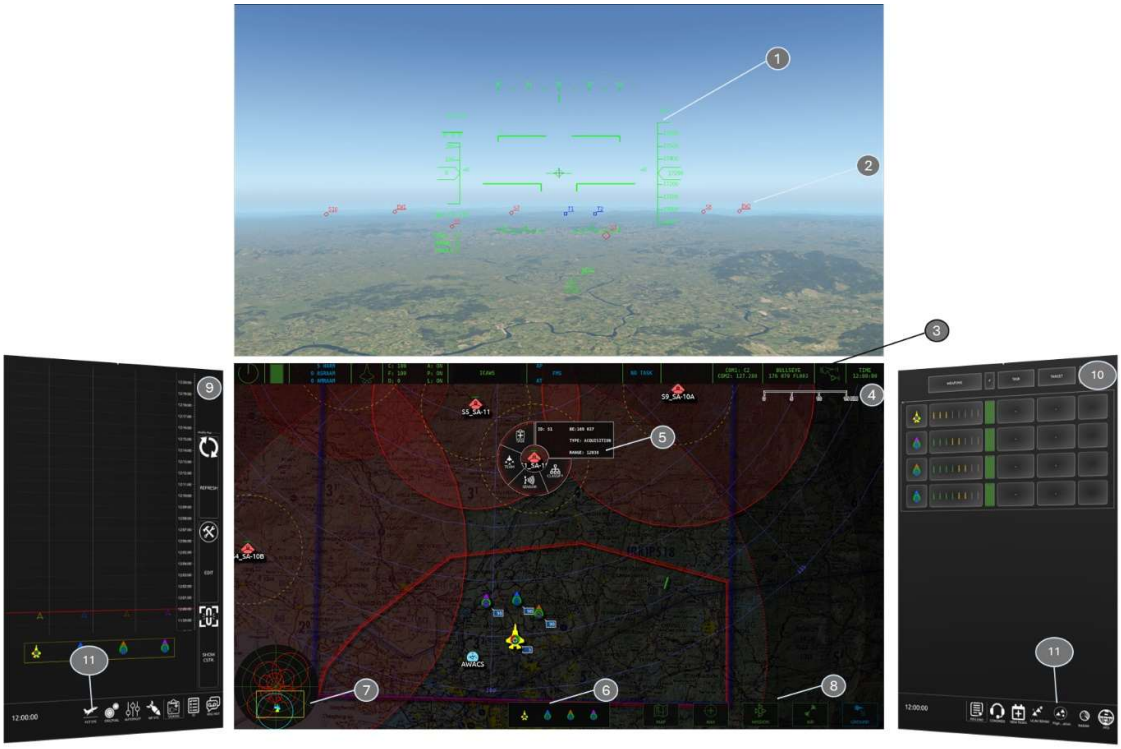



**Abbildung 2-10 Überblick über die visuellen Anzeige- und Interaktionssysteme im Cockpit**

Das HUD (1) zeigt sowohl statische als auch kontaktanaloge Informationen über das eigene Luftfahrzeug und relevante Missionsdaten. Statische Informationen wie Geschwindigkeit oder Höhe bleiben konstant sichtbar, während kontaktanaloge Elemente – etwa die Markierung taktischer Bodenziele (2) – direkt in die Umgebung eingeblendet werden.

Zentrales Interaktionselement ist die **taktische Karte** (4 MHDD), die das Lagebild integriert. Eine **Statusleiste** (3) oberhalb der Karte informiert über die wichtigsten Flugdaten. Die Karte enthält zusätzlich eine **Minimap** (7), ein **Radial Context Menu** (RCM), 5 zur Interaktion mit taktischen Elementen (5), eine **Schnellwahlliste für UAVs** (6) sowie *Einstellungen zur Kartendarstellung* (Map Configuration, 8).

Die **seitlichen Anzeigen** (9 & 10 SHDD) dienen der Interaktion mit verschiedenen Subsystemen (11). Im Folgenden werden die für diese Arbeit relevanten Displayoberflächen näher beschrieben.

- **Taktische Karte** (Abbildung 2-11)
  Sie ist das zentrale Interaktionselement für Missionsmanagement und Planung. Feindliche SAM-Stellungen werden als rote Rauten mit Wirkungsradien dargestellt, Missionsziele als gelbe Symbole.

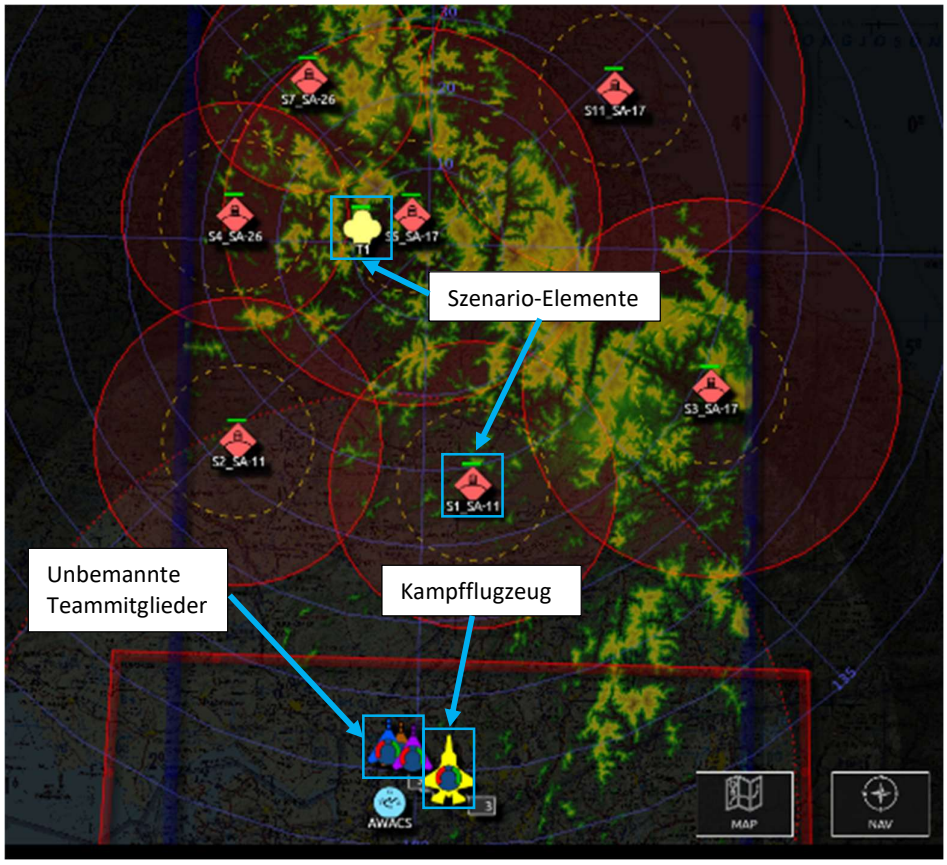
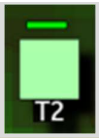
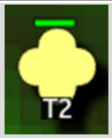



**Abbildung 2-11 Anzeige der taktischen Karte mit verschiedenen Szenarien-Elementen wie feindliche Stellungen, Gebäuden, UAVs und das eigene Kampfflugzeug**

Tabelle 2-4 listet die im Simulator verwendeten Szenarioelemente und deren Status.

**Tabelle 2-4 Relevante Szenario Elemente mit unterschiedlichen Klassifikationen im Simulator**

| Typ | Freundlich | Feindlich | Unbestätigter Abschuss | Bestätigter Abschuss | Unbekannt |
|---|---|---|---|---|---|
| Gebäude |   |   |   |   |   |
| Luftabwehr-stellung |   |   |   |   | |

- **Missionsmanagement (**Abbildung 2-12 & Abbildung 2-13)
  Das Planungsinterface zeigt die Aufgaben aller Plattformen in einer Zeitleiste. Es gibt zwei Modi:

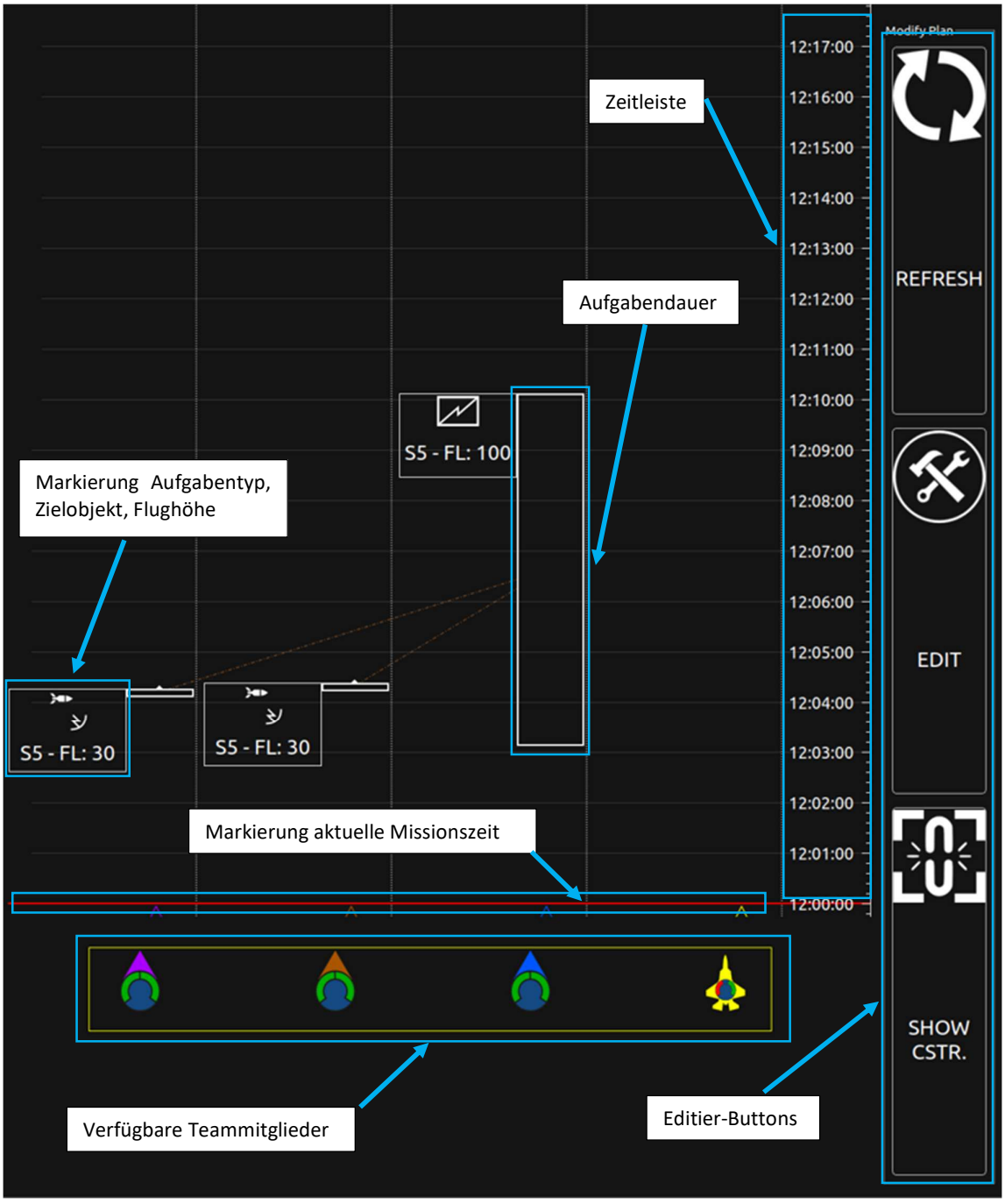



**Abbildung 2-12 Darstellung des Planungsinterfaces zum Missionsmanagement im Aktiv-Modus**

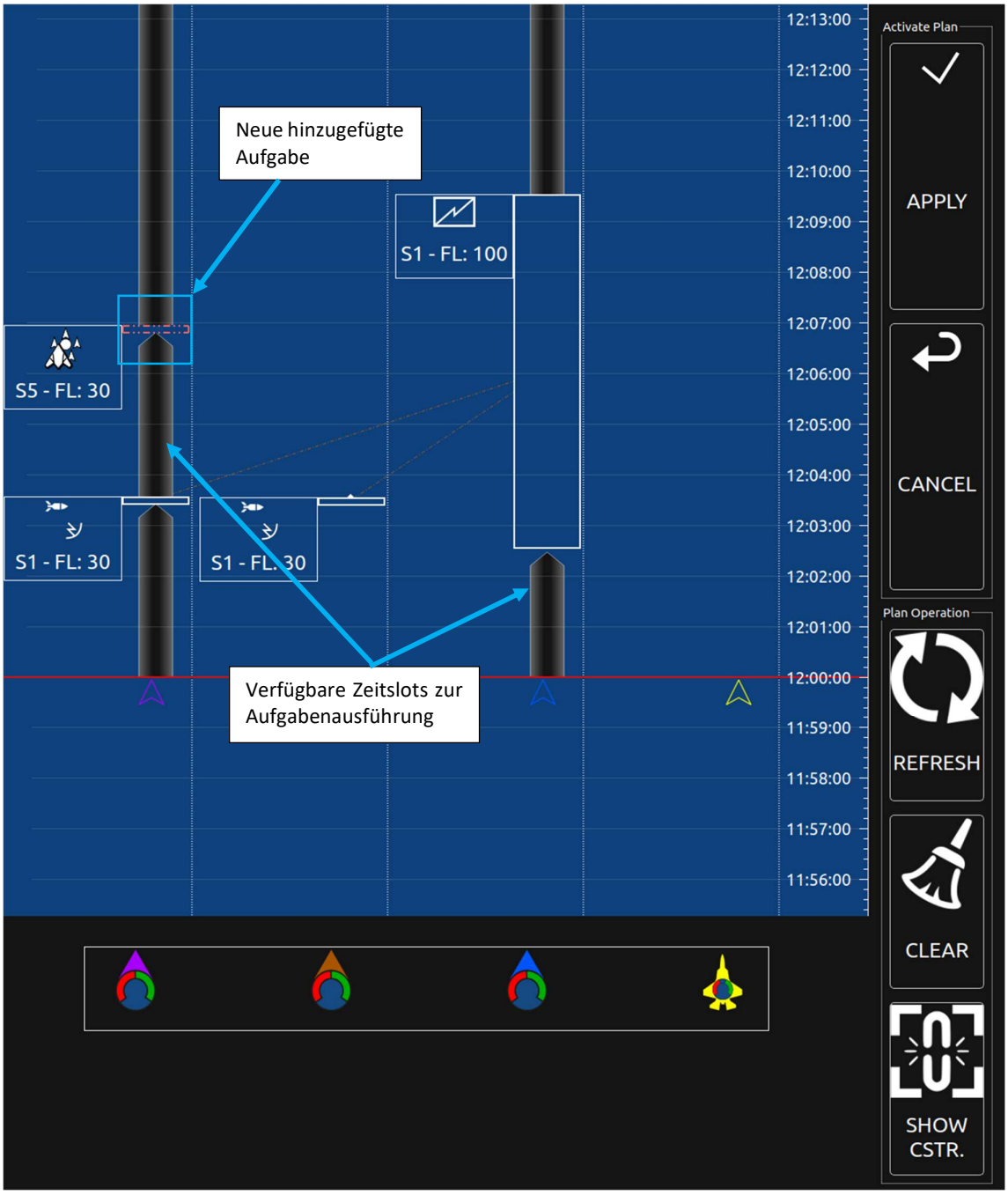



**Abbildung 2-13 Darstellung des Planungsinterfaces zum Missionsmanagement im Modifizier-Modus**

- **Aktiv-Modus** (schwarzer Hintergrund): Der aktuelle Plan wird ausgeführt.
- **Modifizier-Modus** (blauer Hintergrund): Neue Aufgaben können eingefügt und bearbeitet werden. Erst nach Bestätigung über „APPLY“ werden sie aktiv. Zeitslots zeigen, wann ein Teammitglied eine Aufgabe ausführen kann. Fehlen Ressourcen, wird kein Slot angezeigt.

Tabelle 2-5 beschreibt die relevanten Aufgabentypen, ihre Symbole und Funktionen.

**Tabelle 2-5 Für die Arbeit relevante Aufgabentypen und ihre Beschreibung**

| Aufgabentyp | Symbol | Aufgabenname | Beschreibung |
|---|---|---|---|
| Offensiv |  | EA | Elektronische Unterdrückung feindlicher SAM-Stellungen |
| |  | HARM | Ausbringen einer HARM |
| |  | SWARM_EA | Aussenden eines Schwarms zur elektronischen Unterdrückung |
| |  | ENGAGE | Abwurf einer Bombe |
| Aufklärung |  | INVESTIGATE | Aufklärung eines Ziels |
| |  | BHA | Nachaufklärung nach Zielbekämpfung (Battle Hit Assessment, BHA) |
| Navigation |  | FLY_OVER | Überfliegen eines Navigationspunkts |
| |  | MARSHALL | Kreisen über einem Navigationspunkt |

### 2.4.3 Auftragsbasierte Führung zur Missionsplanerstellung

Für die Steuerung unbemannter Systeme existieren verschiedene Ansätze – von Zielvorgaben bis zur Zuweisung konkreter Wegpunkte und Aktionen. Um die Effektivität zu erhöhen, sollte die Steuerung **formalisiert** erfolgen, d. h. auf einer klar definierten Ebene. Dies unterstützt den Nutzer beim Aufbau eines mentalen Modells des Systemverhaltens und ermöglicht es den UAVs, über definierte Schnittstellen erwartungskonform zu agieren (Miller et al., 2005).

*Auftragsbasierte Führung*

Die auftragsbasierte Führung, bekannt aus der militärischen „Auftragstaktik“, wird im MUM-T-Kontext durch die Übergabe formeller Aufträge vom Piloten an kognitive Agenten auf den UAVs umgesetzt. Diese analysieren die Aufträge und steuern die Plattformen entsprechend (Uhrmann & Schulte, 2011).

*Auftragsdefinition*

Am IFS-FMFF wurde eine spezifische Struktur für UAV-Aufträge entwickelt (Dudek & Schulte, 2022) bestehend aus:

- **Aufgabe:** Was sollen die unbemannten Systeme tun.
- **Objekt:** Das Zielobjekt des Auftrags
- **Erfolgskriterien:** Bedingungen für Erfolg von Aufträgen
- **Randbedingungen:** Wie soll der Auftrag durchgeführt werden

*Auftragsdelegation zur Missionsplanerstellung*

Für die Missionsplanung müssen Aufträge an UAVs delegiert werden. Neben den Auftragsinhalten sind auch das zuständige Teammitglied und der Ausführungszeitpunkt zu definieren. Diese Informationen können vom Piloten explizit oder implizit festgelegt oder vom System automatisch ergänzt werden – z. B. durch einen **Scheduler**, der Plattform und Zeitpunkt bestimmt (Heilemann & Schulte, 2020) bestimmt werden.

Im Simulator entscheidet die gewählte Delegationsmethode, ob Mensch oder System welche Informationen beiträgt. Der Pilot legt stets das Zielobjekt fest, während der Scheduler die zeitliche und personelle Zuweisung übernimmt. Es stehen drei **Delegationsmodi** zur Verfügung:

- **Team Modus:** System bestimmt Teammitglied und Zeitpunkt.
- **UAV Modus:** Pilot wählt Teammitglied, System bestimmt Zeitpunkt.
- **Timeslot Modus:** Pilot legt Reihenfolge fest, System bestimmt exakten Zeitpunkt.

*Delegationsmethoden*

Zwei Methoden wurden im Rahmen dieser Arbeit zur Auftragsdelegation verwendet:

1. **Timeline Tasking:**
   Die Auftragszuweisung erfolgt über Touch-Interaktion mit der taktischen Karte (MHDD) und dem Planungsinterface (SHDD). Der Ablauf ist in Abbildung 2-14 dargestellt:

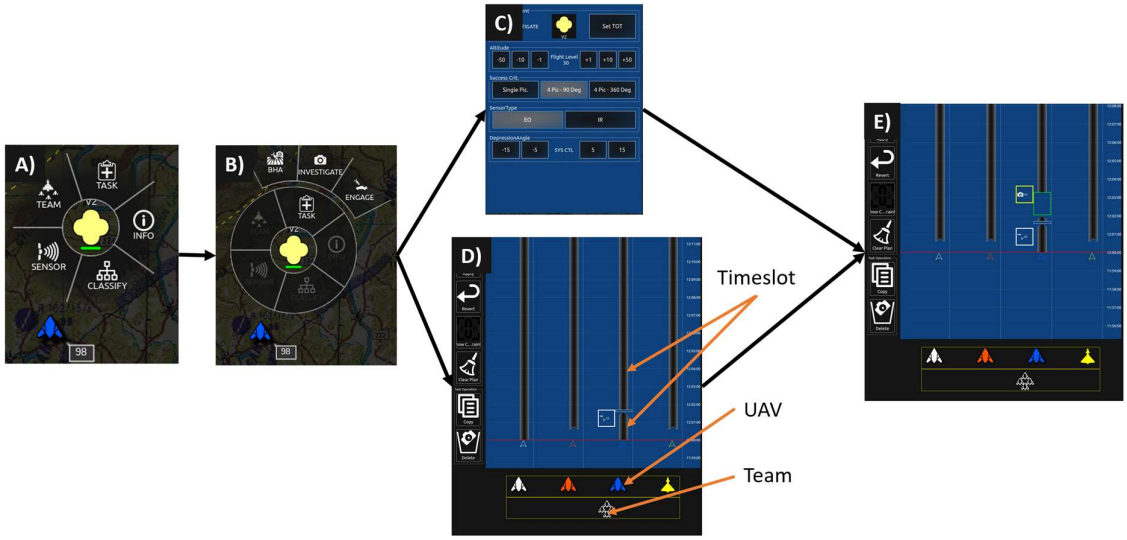



**Abbildung 2-14 Exemplarischer Ablauf Timeline Tasking**

- **(A)** Auswahl eines Objekts auf der Karte öffnet ein Radial-Context-Menü.
- **(B)** Auswahl eines verfügbaren Auftrags für das Objekt.
- **(C)** Anzeige von Erfolgskriterien und Parametern im MHDD.
- **(D)** Auswahl des Delegationsmodus im Planungsinterface.

- **(E)** Aktivierung oder Rücknahme des bearbeiteten Plans.

  Der Pilot kann Aufträge hinzufügen oder ändern, ohne den aktiven Plan direkt zu beeinflussen. Erst nach Bestätigung über „APPLY“ werden Änderungen übernommen.

2. **Quick-Tasking:**
   Diese Methode erlaubt besonders schnelle Auftragsvergabe. Ein **Longpress** auf ein Objekt erzeugt automatisch einen passenden Auftrag, der sofort an erster Stelle im aktiven Plan erscheint. Alternativ kann ein **Double-Tap** auf eine beliebige Stelle einen Navigationsauftrag erzeugen. Die Zuweisung kann an ein beliebiges oder ein spezifisches UAV erfolgen.

Die auftragsbasierte Führung bildet damit die methodische Grundlage für die strukturierte Interaktion zwischen Mensch und unbemanntem System im MUM-T-Kontext. Aufbauend auf diesen theoretischen und technischen Grundlagen wird im folgenden Kapitel das Konzept des PAA entwickelt. Dabei werden die Anforderungen an das System, seine Architektur sowie die Integration in das bestehende Arbeitssystem detailliert beschrieben.

# 3 Konzeptentwicklung

Dieses Kapitel entwickelt das Konzept des PAA zur Beantwortung der in Kapitel 1.3 formulierten Forschungsfragen. Zunächst wird der **aktuelle Forschungsstand zur Mixed-Initiative-Planung** dargestellt. Darauf folgt eine **Arbeitsprozessanalyse**, auf deren Basis die Missionsaufgaben von Piloten im MUM-T-Kontext abgeleitet werden.

Anschließend wird das **Missionsmanagement** vertieft betrachtet, um daraus ein **Arbeitssystemdesign** abzuleiten und die **erforderlichen Fähigkeiten** des PAA zu bestimmen. Abschließend werden das **Systemdesign und die Architektur** des PAA beschrieben, einschließlich seiner Haupt- und Teilmodule sowie deren funktionaler Zusammenhänge.

## 3.1 Forschungsstand zu Mixed-Initiative Planung

Automatisierte Planungs- und Assistenzsysteme werden seit vielen Jahren von großem Interesse für Forschung und Industrie untersucht. (Ferguson & Allen, 1998) beschreibt ein integriertes Framework für Planungs- und Argumentationsfunktionen und liefert eine knappe Auswertung. Sie beschreiben die Entwicklung und Fähigkeiten von The Rochester Interactive Planner System (TRIPS), einem KI-System zur Unterstützung von Dialogen in gesprochener Sprache für kollaborative Planung und Problemlösung, insbesondere im Transport- und Logistiksektor. Die Autoren betonen die Wichtigkeit der Entwicklung integrierter KI-Systeme, die verschiedene Komponenten und Technologien kombinieren, um komplexe Aufgaben ganzheitlich zu bewältigen. Sie unterstreichen, dass solche Systeme eine praktische Anwendung theoretischer Konzepte ermöglichen und eine Leistungsbewertung auf Basis der Aufgabenerfüllung bieten. TRIPS integriert Spracherkennung, Verständnis natürlicher Sprache, Diskursverarbeitung und Planungstechnologien, um einen interaktiven, intelligenten Problemlösungsassistenten bereitzustellen. Das System kooperiert mit einem menschlichen Bediener, um in Krisensituationen, wie der Evakuierung einer Inselbevölkerung vor einem Sturm, Pläne zu entwickeln. Es erleichtert den Dialog zwischen Nutzer und KI, indem es die schrittweise Erstellung und Anpassung von Plänen auf Basis gesprochener Eingaben ermöglicht und über eine grafische Benutzeroberfläche Rückmeldungen und Aktualisierungen bietet. (Ferguson & Allen, 1998) heben die Vorteile integrierter Systeme hervor, einschließlich der Möglichkeit, die KI-Leistung durch die praktische Aufgabenerledigung zu bewerten, die Verbesserung der Systemrobustheit durch die Integration spezialisierter Komponenten und das Potenzial für eine natürlichere und effektivere Mensch-Computer-Interaktion. TRIPS veranschaulicht einen umfassenden Ansatz zur kollaborativen Problemlösung, indem es Benutzerbefehle und -intentionen interpretiert, den Problemlösungsprozess steuert und sich mit spezialisierten Argumentationsmodulen koordiniert, um Pläne zu entwickeln und bei Bedarf anzupassen.

(Roth et al., 2004) evaluierten einen Prototyp eines Mixed-Initiative-Systems, das für die Überwachung mehrerer UAVs durch einen einzelnen Bediener konzipiert wurde. An der Evaluation nahmen sechs ehemalige Kampfpiloten teil, um zu beurteilen, inwiefern menschliche Bediener die automatisierten Pläne verstehen und mit ihnen interagieren konnten und um den Bedarf an zusätzlicher Unterstützung bei der Systementwicklung zu identifizieren. Die Studie offenbarte, dass die Teilnehmenden die automatisierten Pläne grundsätzlich verstehen konnten, das System jedoch die Gründe für seine vorgeschlagenen

Aktionen besser erläutern muss. Ferner illustrierte die Untersuchung die Bedeutung der Möglichkeit für Nutzer, Pläne zu modifizieren, und betonte die Notwendigkeit von Mixed-Initiative-Systemen, die eine effektive Partnerschaft zwischen menschlichen Operateuren und automatisierten Systemen ermöglichen. Dies umfasst die Fähigkeit der Bediener, Plananpassungen vorzuschlagen, die vom System evaluiert werden. Zudem hob die Studie die Bedeutung von Systemen hervor, die "Was-wäre-wenn"-Szenarien unterstützen und es den Bedienern ermöglichen, die Planrobustheit gegenüber Unwägbarkeiten oder Änderungen zu bewerten. Insgesamt unterstreicht die Untersuchung die Herausforderungen bei der Entwicklung von Mixed-Initiative-Systemen, die ein ausgewogenes Verhältnis zwischen automatischer Planung und menschlicher Kontrolle anstreben, und hebt die Bedeutung einer transparenten Kommunikation und flexibler Interaktionsmechanismen hervor.

(Chen et al., 2013) untersuchten die Integration des intelligenten Agenten RoboLeader in das Management unbemannter Fahrzeuge innerhalb eines militärischen Multitasking-Kontexts. In einem simulierten Experiment, das eine Multitasking-Umgebung darstellte, waren menschliche Bediener für die Verwaltung von Plänen und Routen für drei Fahrzeuge verantwortlich: ein bemanntes Bodenfahrzeug, ein unbemanntes Luftfahrzeug und ein unbemanntes Bodenfahrzeug, während sie gleichzeitig ihre unmittelbare Umgebung überwachten, einschließlich der Erkennung von Bedrohungen. Der Autonomiegrad, den RoboLeader bot, hatte signifikanten Einfluss auf die Leistung der Teilnehmenden bei Zielerfassungsaufgaben. Mit Unterstützung von RoboLeader identifizierten die Teilnehmenden mehr Ziele, was darauf hinweist, dass die Aufgabendelegation an den intelligenten Agenten ihnen erlaubte, sich stärker auf die aktuelle Situation und Bedrohungserkennung zu konzentrieren. Die Teilnehmenden berichteten von einer signifikant höheren Arbeitsbelastung unter manuellen Bedingungen im Vergleich zu den Bedingungen mit Unterstützung durch RoboLeader, sei es im halbautomatischen oder vollautomatischen Modus. Das zeigt das Potenzial intelligenter Agenten auf, die kognitive Belastung des Menschen in komplexen Multitasking-Umgebungen zu reduzieren. Auch die räumlichen Fähigkeiten der Bedienenden spielten eine wichtige Rolle bei der Aufgabenerfüllung, indem sie sowohl die Zielerfassung als auch das SA beeinflussten. Personen mit ausgeprägteren räumlichen Fähigkeiten profitierten stärker von der Unterstützung durch RoboLeader, insbesondere im vollautomatischen Modus, was die Bedeutung individueller Unterschiede bei der Entwicklung von Mensch-Agent-Systemen unterstreicht. Die Studie zeigte zudem signifikante Wechselwirkungen zwischen dem Autonomiegrad und den räumlichen Fähigkeiten der Teilnehmenden hinsichtlich SA und Aufgabenleistung. Dies lässt darauf schließen, dass die Vorteile der Automatisierung in Multitasking-Umgebungen durch individuelle Fähigkeiten beeinflusst werden können. Diese Forschung verdeutlicht die potenziellen Vorteile der Integration intelligenter Agenten wie RoboLeader zur Unterstützung menschlicher Bediener bei der Kontrolle mehrerer unbemannter Fahrzeuge, während die SA in komplexen Umgebungen aufrechterhalten wird. Sie betont die Wichtigkeit, den Grad der Autonomie und individuelle Unterschiede in den räumlichen Fähigkeiten bei der Entwicklung solcher Systeme zu berücksichtigen, um Aufgabenerfüllung und kognitive Belastung zu optimieren.

Ein möglicher Ansatz für die praktische Umsetzung einer Mixed-Initiative Missionsplanungsanwendung ist in (Schmitt, 2021) beschrieben. Hier wird:

*"[…] ein adaptiver Ansatz gewählt, um situativ den am besten geeigneten Automatisierungsgrad unter Berücksichtigung des Missionskontextes, der Komplexität der Planungsaufgabe und der Arbeitsbelastung des Operators auszuwählen".*

Diese Arbeit widmete sich den Herausforderungen im Kontext von Mensch-Maschine-Interaktionen, die bei der Anwendung sowohl traditioneller als auch hochgradig automatisierter Planungssysteme auftreten, insbesondere während kritischer Phasen der Umplanung. Ein adaptives Konzept für die Mixed-Initiative-Missionsplanung wurde entwickelt, um eine kooperative Planung zwischen Mensch und Maschine zu fördern. Dieses Konzept stützt sich auf drei fundamentale Säulen: Mixed-Initiative-Verhalten, adaptive Automatisierung und die Planungskompetenz der Maschine. Es erlaubt die dynamische Anpassung des Automatisierungsgrades, um die Missionsplanung und deren Anpassung zu optimieren, Überlastungen vorzubeugen und ein kontinuierliches Bewusstsein für den Planungsprozess zu gewährleisten. Zur Überprüfung des Konzepts kam ein Hubschrauber-Missionssimulator zum Einsatz, in dem verschiedene Automatisierungsstufen evaluiert wurden. Die Ergebnisse verdeutlichen, dass systemische unterstützende Eingriffe die Belastung der Piloten reduzieren und in kritischen Momenten besonders vorteilhaft sind, obgleich eine zunehmende Automatisierung tendenziell das Bewusstsein für den Missionsverlauf verringert. Insgesamt erfährt der adaptive Mixed-Initiative-Ansatz eine positive Bewertung und gilt als effektive Methode für die Planung und Anpassung von Missionen.

Schmitt konzentrierte sich auf die Planung von Interventionen, während (Heilemann, 2022) die erste Stufe eines inkrementellen Planungsagenten implementierte. Dabei lag der Schwerpunkt auf dem Vergleich zwischen einer rein manuellen Missionsplanung durch Piloten während der Missionsdurchführung und der unterstützten Aufgabendelegation durch einen Planungsagenten, der bei der zeitlichen Organisation der Aufgaben und deren Verteilung auf Teammitglieder assistiert. Ferner wurden erste Ansätze unterstützender Funktionen in zeitkritischen Situationen erprobt.

Auf Basis der Ergebnisse von Schmitt und Heilemann unternimmt diese Arbeit den nächsten Schritt in der Entwicklung von MIP-Assistenzsystemen. Neben der Interventionsplanung und der Unterstützung bei der Aufgabendelegation bietet der PAA den Bedienern Planalternativen und -optimierungen an. Zudem werden Vorschläge für die nächsten Schritte zur Erreichung der Missionsziele und deren Umsetzung präsentiert.

## 3.2 Arbeitsprozessanalyse und Arbeitssystemdesign zur Fähigkeitsbestimmung des Planungsassistenzagenten

Ausgangspunkt für die Fähigkeitsbestimmung des PAA ist der Planungs- und Führungsprozess aus Kapitel 2.3.

### 3.2.1 Grundlegende Arbeitsprozessanalyse

Die Arbeitsprozessanalyse, ein Werkzeug der kognitiven Ergonomie, untersucht zielgerichtete menschliche Tätigkeiten zur Zielerreichung (vgl. Die Arbeitssystemnotation dient dabei als grafische und semantische Beschreibungssprache für komplexe HAT-Systeme. Ein typischer Arbeitsprozess für MUM-T-Missionen ist in Abbildung 3-1 dargestellt.

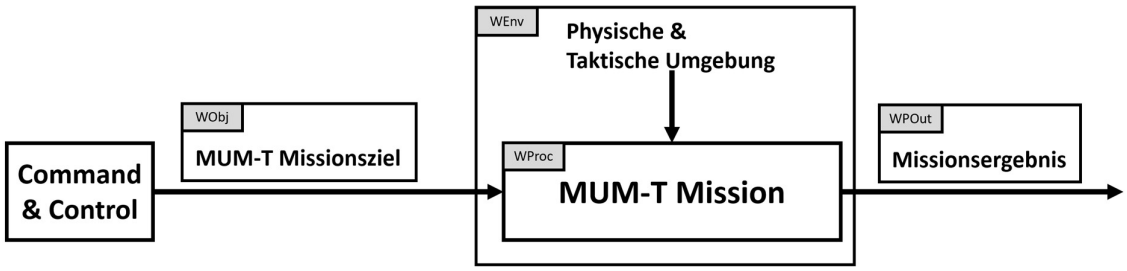



**Abbildung 3-1 Arbeitsprozess für MUM-T Missionen**

Der Arbeitsprozess (*engl. Work Process* (WProc)) repräsentiert die MUM-T-Mission und erhält sein Ziel (*engl. Work Objective* (WObj)) von der Führungs- und Lagezentrale (*engl. Command and Control* (C2)). Eingebettet in eine Arbeitsumgebung(*engl. Work Environment* (WEnv)), verarbeitet der WProc Informationen aus der physischen und taktischen Umgebung. Das Missionsergebnis (*engl. Work Process Output* (WPOut)) sind erzeugte Informationen oder physische Effekte.

Eine detaillierte Analyse einer Luftoperation, basierend auf (Lindner, 2022), zeigt Abbildung 3-2.

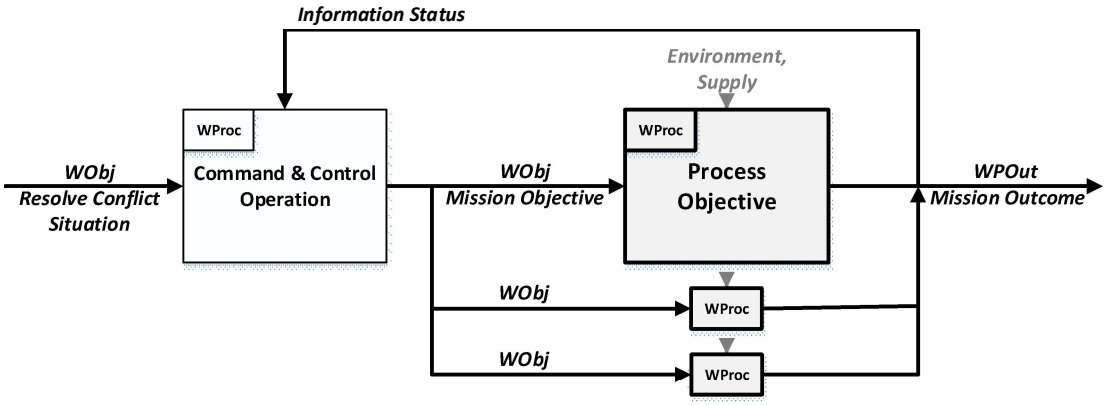



**Abbildung 3-2 Detaillierter Modellarbeitsprozess einer militärischen Luftoperation (Lindner, 2022)**

Luftoperationen bestehen aus mehreren ineinandergreifenden Prozessen mit klarer Zielsetzung. Die C2-Instanz (Command & Control Operation (C2O) koordiniert die Mission, definiert WObjs und leitet daraus die erforderlichen WProcs ab. Diese beinhalten Subprozesse wie Luftkämpfe, elektronische Kriegsführung oder SEAD. In der Praxis erfolgt die Umsetzung durch eine COMAO. Abbildung 3-3 zeigt den schematischen Ablauf einer offensiven Luftkriegs-Mission (Maier et al., 2024; Schulte & Donath, 2024).

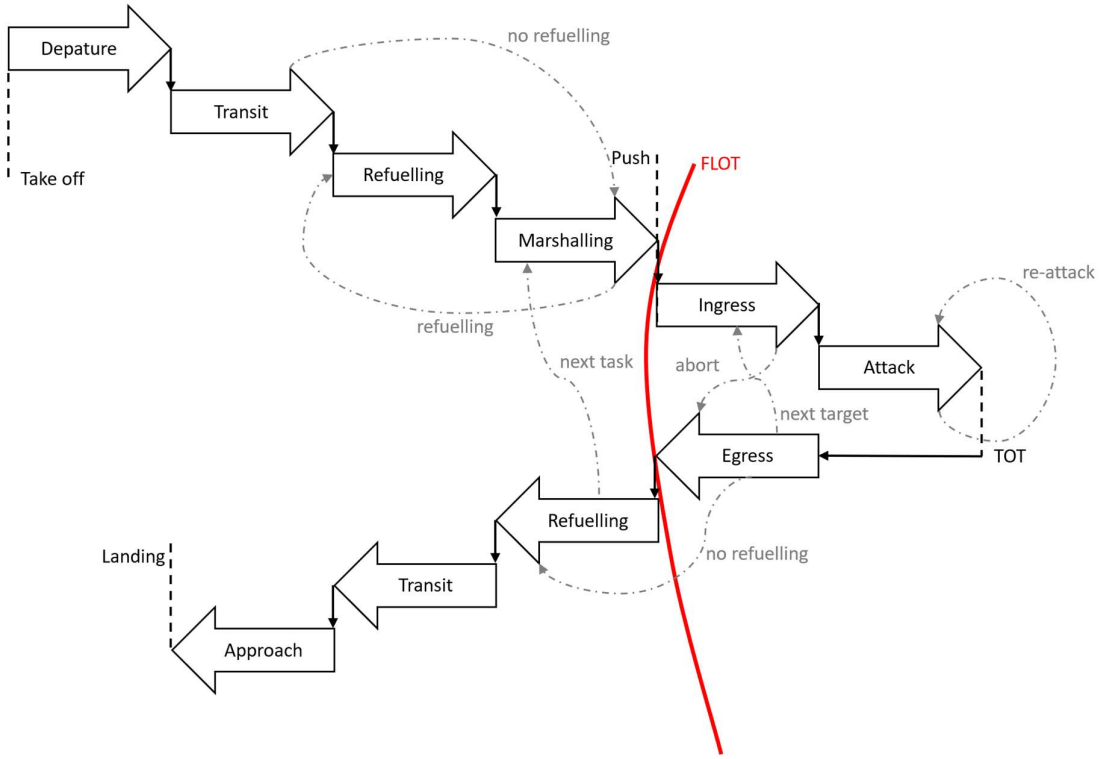



**Abbildung 3-3 Schematischer Ablauf einer offensiven Luftkriegs-Mission nach (Maier et al., 2024; Schulte & Donath, 2024)**

Die Missionsphasen umfassen:

- **Departure:**Startphase.
- **Transit:** Verlegung über eigenes Gebiet.
- **Refuelling:** Luftbetankung.
- **Marshalling:** Warteflug vor Eindringen ins Feindgebiet, endend mit dem Überschreiten der Forward Line Own Troops (FLOT).
- **Ingress:** Vorrücken unter Bedrohung.
- **Attack:** Zielangriff zu einem definierten Zeitpunkt (Time-over-Target (TOT)).
- **Egress:** Rückzug.
- **Approach:** Rückkehr zur Basis.

Rücksprünge (z. B. erneutes Auftanken) oder Phasenüberspringungen (z. B. Missionsabbruch) sind möglich. Die Zeitpunkte Take-off, Push und TOT sind für die Koordination mit anderen Packages entscheidend.

Das Primärziel im Beispiel ist die Zerstörung eines Kommandopostens, geschützt durch starke Luftabwehr. Die Mission wird in drei Teilziele untergliedert:

1. Sicherung der Ingress-Route und Eindringen in das Zielgebiet
2. Schutz im Zielgebiet und Zerstörung des Primärziels
3. Sicherung der Egress-Route und Verlassen des Zielgebiets

### 3.2.2 Missionsaufgaben

Aufgabenanalysen liefern die Aufgaben der Besatzung. Nach (Alter & Regal, 1992) werden diese traditionell wie folgt priorisiert:

- **Aviate:** Flugzeug steuern und stabilisieren.
- **Navigate:** Zielführung entlang der Route.
- **Communicate:** Informationsaustausch intern und extern.
- **Manage Systems:** Betrieb und Funktion der Bordsysteme.

(Abbott, 1993) entwickelte diese Struktur weiter zu einem funktionsorientierten Modell, das in (Schulte & Donath, 2024) für militärische Kontexte erweitert wurde:

- **Flight Management:** Flugplanung, Steuerung, Navigation.
- **Communications Management:** Informationsfluss zwischen Systemen.
- **Systems Management:** Überwachung der Bordsysteme.
- **Task Management:** Koordination von Aufgaben und Ressourcen.

Militärische Missionen sind deutlich komplexer als zivile Flüge. Sie beinhalten zusätzlich:

- **Taktisches Fliegen:** Luftkampf, Tiefflug, Luftbetankung etc.
- **Taktisches Navigieren:** Selbstortung, taktische Routenplanung.
- **Taktische Kommunikation:** Funk- und Datenkommunikation.
- **Taktischer Sensoreinsatz:** Zielerkennung mittels Radar/Sensorik.
- **Waffeneinsatz:** Zielzuweisung, Waffenwahl, Einsatzregeln.
- **Selbstschutzmaßnahmen:** Täuschung, Störung, Abwehrmaßnahmen.

### 3.2.3 Missionsmanagement

Eine genauere Analyse zeigt, dass alle Missionsaufgaben aus einer Abfolge folgender Teilaufgaben bestehen (nach (Schulte & Donath, 2024)):

1. **Erfassen** der relevanten **Situationselemente**.
2. **Wahrnehmen** und Verstehen der **Situation**.
3. **Treffen** von situationsangepassten **Entscheidungen**.
4. **Planen** eines Vorgehens zur **Zielerreichung**.
5. **Ausführen** der geplanten **Handlungsschritte**.

Während (1) und (5) meist technisch unterstützt werden, liegen (2) – (4) traditionell beim Menschen. Mit zunehmender Automatisierung entstehen jedoch hybride Mensch-Maschine-Systeme.

Ein Missionsmanagementsystem integriert sämtliche Ausrüstung und Funktionen zur Unterstützung dieser Aufgaben. Zentrale Eigenschaften sind **Integration** und **Skalierbarkeit**, um verschiedenen Rollen und Missionen gerecht zu werden. Missionsmanagement umfasst alle informationsverarbeitenden Aufgaben zur erfolgreichen Missionsdurchführung. Die eingesetzten technischen Komponenten – sogenannte Missionssysteme – bestehen aus

Missionsgeräten (z. B. Sensoren, Waffen, Selbstschutzsysteme) und Softwarefunktionen auf Bordrechnern.

Die Aufgaben des Missionsmanagements lassen sich wie folgt zusammenfassen::

1. Missionsplanung
2. Ressourcenzuweisung
3. Informationsmanagement
4. Bedrohungs-/Risikomanagement
5. Missionsüberwachung
6. Kommunikationsmanagement
7. Automatisierungsfunktionen

Ein zentrales Merkmal ist die enge Interaktion mit Mensch und Umwelt, was eine hohe Systemkomplexität erzeugt. Diese muss beherrscht werden, um Technik, Mensch und Umwelt sinnvoll zu verknüpfen (Schulte & Donath, 2024).

### 3.2.4 Arbeitssystemdesign

Das Arbeitssystem umfasst alle Elemente, die den Arbeitsprozess ausführen – Menschen, automatisierte Systeme und physikalische Komponenten wie Luftfahrzeuge. Für Details zur Modellierungssprache siehe (Schulte & Donath, 2019). Ziel ist es, die funktionalen Beziehungen zwischen Mensch, Technik und Umwelt zu beschreiben und die Aufgabenverteilung im MUM-T-Team zu verstehen.

Das initiale Arbeitssystem (*engl. Work System* (WSys)) wird gemäß dem WProc gestaltet (vgl. Abbildung 3-1) und basiert auf dem Kräfteansatz aus Abschnitt 1.2: ein bemannter Command Fighter und drei UAVs (siehe Abbildung 3-4).

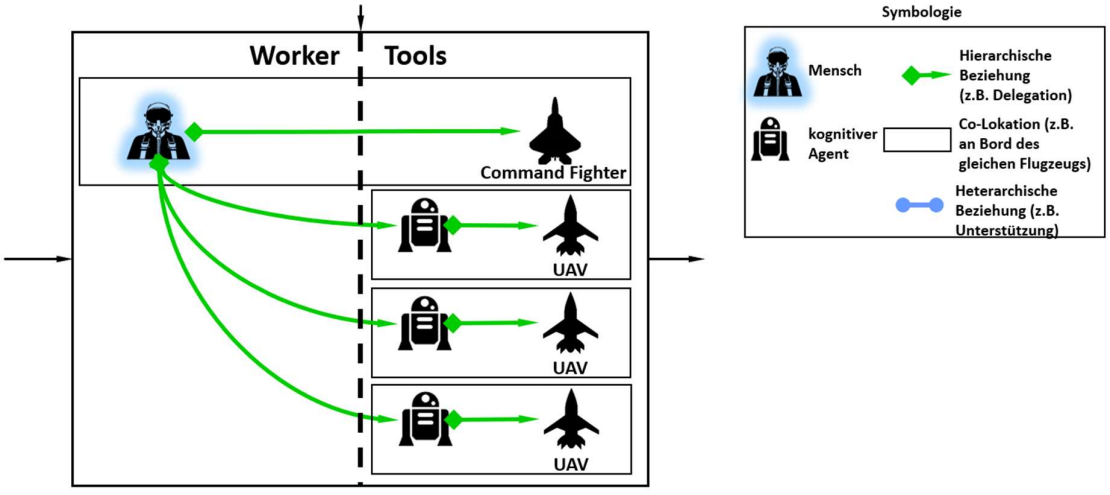



**Abbildung 3-4 Arbeitssystem für den definierten Arbeitsprozess und Kräfteansatz**

Ein WSys unterscheidet zwei Rollen:

- **Worker**: kennt und verfolgt das WObj eigenständig
- **Tools**: führen Aufgaben auf Anweisung des Workers aus

Tools sind meist automatisierte Systeme wie UAVs mit Autopilot. Zusätzlich gibt es kognitive Agenten, die Aufgaben verstehen und mit eigenen Tools umsetzen können. Der Mensch delegiert Aufgaben an UAVs, überwacht den Missionserfolg und führt sein eigenes Flugzeug.

Zur Unterstützung dient das Konzept der **auftragsbasierten Führung** (*engl. Task-Based Guidance* (TBG)) (Uhrmann, 2013). Der Bediener definiert Aufgaben und überträgt sie über spezielle Cockpit-Interfaces an die UAV-Agenten, wodurch ein Missionsplan entsteht (Heilemann & Schulte, 2019). Dies funktioniert gut bei einem UAV, führt aber bei mehreren zu hoher mentaler Belastung (vgl. Abbildung 3-4).

Zur Entlastung wird das WSys um ein kognitives Agenten-Tool, den **Scheduler**, erweitert. Dieser unterstützt die zeitliche Planung und Ressourcenallokation der UAVs (siehe Abbildung 3-5).

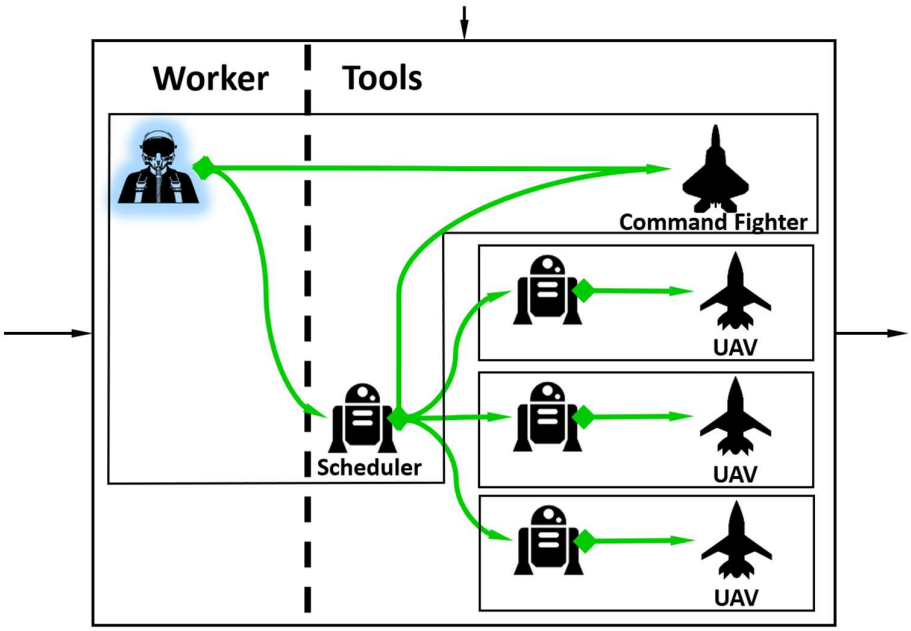



**Abbildung 3-5 Erweiterung des ursprünglichen WSys durch einen Scheduler**

Der Bediener kann iterativ Aufgaben mithilfe der in Abschnitt 2.4.3 beschriebenen Delegationsmethoden erstellen und an den Scheduler übergeben. Der Scheduler empfängt die vom Menschen erstellten Aufträge und verteilt diese, optimiert nach verschiedenen Kriterien, an alle verfügbaren Teammitglieder. Da dem Team auch die Ressourcen des bemannten Flugzeugs zur Verfügung stehen, kann der Scheduler auch diesem Aufgaben zuweisen, die ein aktives Einsetzen von Ressourcen erfordern. Obwohl der Scheduler über ein gewisses Maß an Wissen und Fähigkeiten verfügt, arbeitet er dennoch strikt nach den klassischen HFE-Ansätzen der Mensch-Maschine-Aufgabenteilung (siehe Kapitel 2.1.1). Die nächste Erweiterungsstufe dieses Systems könnte einen Planer auf der Seite der Tools vorsehen (siehe Abbildung 3-6).

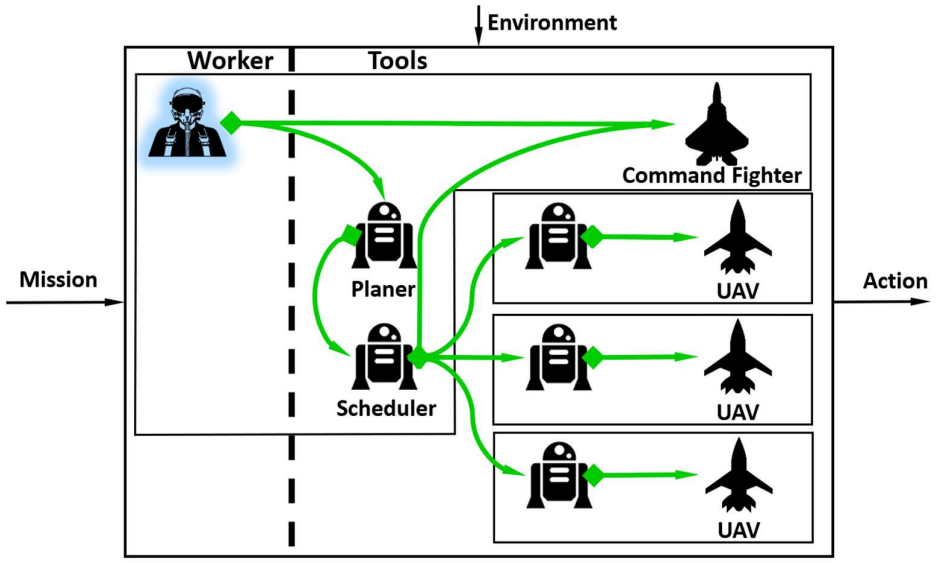



**Abbildung 3-6 Um ein Planungstool erweitertes WSys**

Der Planer empfängt Start- und Zielvorgaben, generiert automatisch passende Aufgaben und übergibt diese zur Verteilung an den Scheduler. Dabei kann er auf die aktuelle taktische Lage zugreifen und Aufgaben sowie Routen entsprechend anpassen. In dieser Konfiguration bleibt die Mensch-Maschine-Aufgabenteilung jedoch klassisch: Der Bediener definiert lediglich Rahmenbedingungen, hat aber wenig Einfluss auf das Planungsergebnis.

Um moderne KI-Methoden effektiv zu nutzen und die Kooperation zwischen Planungssystem und Bediener gemäß aktueller HFE-Ansätze zu gestalten, muss der Planer als **Worker** in das Arbeitssystem integriert werden (vgl. Abbildung 3-7).

Diese Integration ist entscheidend für eine zeitgemäße Mensch-Maschine-Kollaboration. Während klassische Systeme den Planer als passives Tool betrachten, reichen solche Strukturen in dynamischen, komplexen Szenarien – wie bemannt-unbemannten Luftoperationen – nicht mehr aus. Ein als Worker agierender Planer besitzt kognitive Fähigkeiten, berücksichtigt Kontextinformationen und trägt aktiv zur Zielerreichung bei. Dies entlastet den Bediener erheblich, insbesondere bei der Koordination mehrerer UAVs (Heilemann et al., 2019).

Moderne HFE-Konzepte fordern eine **kooperative Entscheidungsarchitektur**, in der Mensch und System gleichberechtigt im JCS agieren(Woods & Hollnagel, 2006). Dabei entwickeln beide Partner ein gemeinsames Situationsbewusstsein und passen sich gegenseitig an. Effektives Human-Agent Teaming erfordert laut (Kaber & Endsley, 2004; Woods, 1985) ein gegenseitiges Verständnis von Fähigkeiten, Zielen und Grenzen.

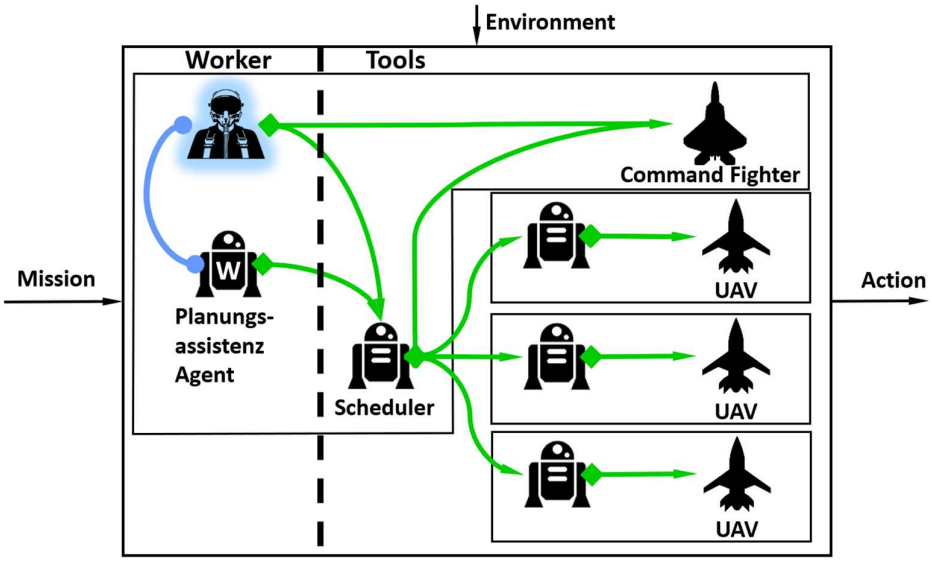



**Abbildung 3-7 WSys mit Planungsassistenzagenten als Worker, welcher mit dem Bediener kooperiert**

Nur als Worker kann der Planer Aufgaben priorisieren, dynamisch auf Veränderungen reagieren und flexibel mit dem Bediener interagieren. Laut Definition (Schulte & Donath, 2019) muss er dazu das Arbeitsziel verstehen und eigeninitiativ verfolgen. Er greift auf Umgebungsdaten und Bedienerinformationen (z. B. Missionsplan) zu und schließt so den kognitiven Loop (vgl. Kapitel 2.1.2). Als **Planungsassistenzagent (PAA)** kann er nun kooperativ mit dem Bediener agieren.

Basierend auf den Eigenschaften effektiver Assistenten nach ergeben sich folgende PAA-Funktionen::

1. **Direkte Anfragen erkennen und unterstützen:** Reaktion auf Anforderungen des Bedieners.
2. **Überwachung und Bewertung des Missionsplans:** Analyse und Optimierungsvorschläge.
3. **Alternativplanung:** Entwicklung alternativer Pläne nach Kriterien wie Zeit, Ressourcen oder Sicherheit.
4. **Reaktion auf dynamische Änderungen:** Anpassung bei dynamischer Lage oder kritischen Situationen.
5. **Optimierung von Einzelaufgaben:** Bewertung und Verbesserung einzelner Aufgaben im Plan.

Die Integration des PAA als Worker verbessert die Mensch-Maschine-Interaktion deutlich. Der Bediener wird bei Planungsaufgaben entlastet, was eine effizientere und effektivere Zusammenarbeit mit automatisierten Systemen ermöglicht.

### 3.2.5 Erforderliche Fähigkeiten des Planungsassistenz Agent

Um seine Aufgaben zu erfüllen, muss der PAA eigenständig Pläne erstellen können. Der Planungsprozess ist dabei in drei Ebenen unterteilt (Cheng & Thawonmas, 2004):

1. **Strategische Planung**: Festlegung übergeordneter Missionsziele – *Was soll getan werden?*
2. **Taktische Planung:** Entwicklung geeigneter Methoden zur Umsetzung – *Wie soll es geschehen?*
3. **Operative Planung:** Konkrete Ausführung einzelner Aktionen – *Welche Schritte sind nötig?*

Diese Aufteilung ermöglicht Pläne unterschiedlicher Granularität, reduziert Rechenzeiten und erhöht die Reaktionsfähigkeit auf Veränderungen, insbesondere auf höheren Ebenen.

Neben der Planerstellung muss der PAA auch Plananpassungen vorschlagen und diese verständlich kommunizieren. Dafür benötigt er:

1. **Analysefähigkeiten:** Bewertung der taktischen Lage und des Bedienerplans**.**
2. **Optimierungsfähigkeiten:** Erkennen von Verbesserungspotenzial.
3. **Kommunikationsfähigkeiten:** Klare und transparente Kommunikation im Cockpit.

## 3.3 Design und Architektur des Planungsassistenzagenten

Abbildung 3-8 zeigt die Architektur des PAA. Dieser nutzt Missionsziele, Umgebungsinformationen und den aktuellen Bedienerplan, um mithilfe zweier Hauptmodule – **Planerstellungsmodul** und **Assistenzmodul** – vollständige Pläne oder Assistenzmeldungen zu generieren.

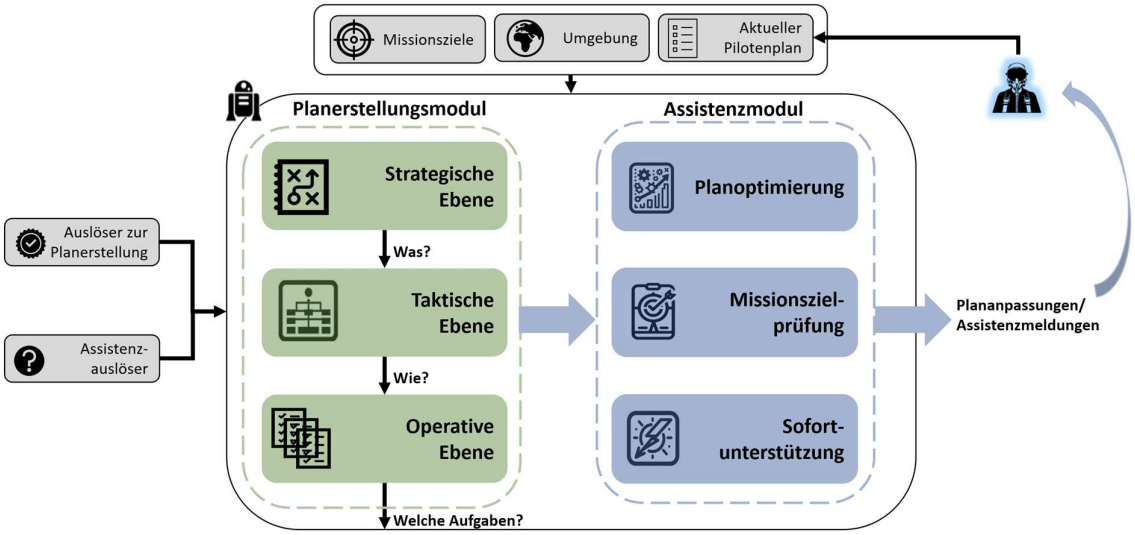



**Abbildung 3-8 Grundlegende Architektur des PAA**

1. **Auslöser zur Planerstellung:**
   a. Manuelle Anforderung durch den Bediener.
   b. Umweltveränderungen, die neue strategische Planung erfordern.
2. **Assistenzauslöser:**
   a. Neue Aufgaben im Bedienerplan, die strategisch nicht erforderlich oder taktisch ungünstig sind.
   b. Zyklische Planüberprüfung zeigt:

i. Unnötige Aufgaben.
ii. Fehlende, aber notwendige Aufgaben.
iii. Optimierungspotenzial (Zeit, Ressourcen, Risiko).

c. Umweltänderungen erfordern:
i. Sofortige Plananpassung.
ii. Entfernung oder Ergänzung von Aufgaben.
iii. Ersetzung nicht mehr ausführbarer Aufgaben.

Nach einem Auslöser sammelt der PAA Informationen zu Missionsziel, taktischer Lage (über Sensoren von bemanntem Flugzeug und UAVs) und Ressourcen. Das **Planerstellungsmodul** erstellt daraufhin Pläne auf allen drei Ebenen und übergibt sie dem **Assistenzmodul**.

Das Assistenzmodul prüft, ob Unterstützungsbedarf besteht, und erstellt – je nach Auslöser – passende Assistenzmeldungen. Die detaillierte Beschreibung der Haupt- und Teilmodule folgt in den nächsten Abschnitten.

### 3.3.1 Planerstellungsmodul

Das Planerstellungsmodul erstellt Pläne auf strategischer, taktischer und operativer Ebene. Diese Struktur folgt der **Means-Ends-Analyse**, einer Problemlösungsmethode, bei der ein Ziel in Teilprobleme zerlegt und schrittweise gelöst wird (Iba, 2006).Die Schritte:

1. Zieldefinition
2. Identifikation der Mittel
3. Vergleich des aktuellen Zustands mit dem Zielzustand
4. Auswahl der besten Mittel
5. Wiederholung des Prozesses bis zum Erreichen des Ziels

Diese Methode erhöht Effizienz, Flexibilität und Zielorientierung. Die Planung erfolgt hierarchisch: Der strategische Plan dient als Grundlage für die taktische Planung, diese wiederum für die operative.

*Strategisches Planungsmodul*

Das strategische Planungsmodul erstellt den übergeordneten Plan zur Erreichung der Missionsziele und ist in Abbildung 3-9 dargestellt.

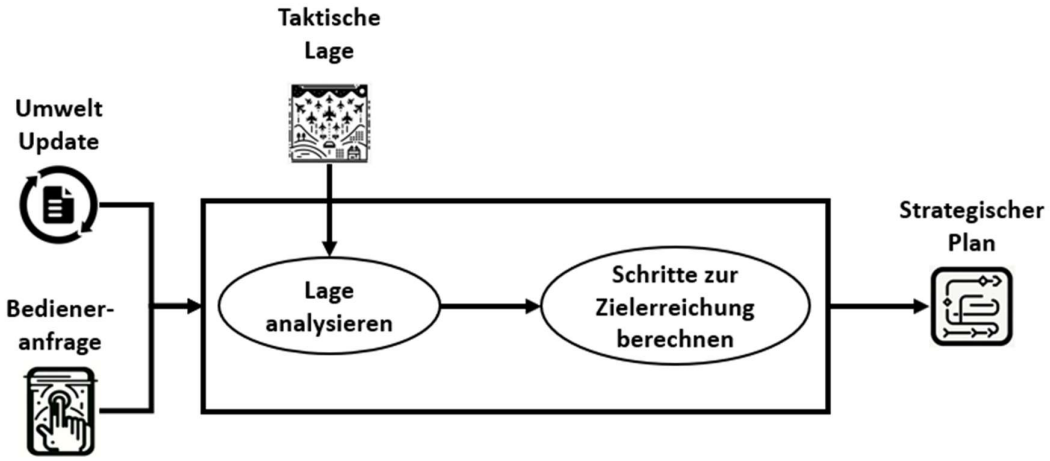



**Abbildung 3-9 Grundlegender Ablauf zur strategischen Plangenerierung**

Es analysiert bei jeder Umweltaktualisierung oder auf Bedieneranfrage die taktische Lage und berechnet die nötigen Schritte zur Zielerreichung. Ziel ist es, festzulegen, **was** erreicht werden soll und **welche Route** das Team nehmen sollte. Abbildung 3-10 zeigt ein schematisches Beispiel.

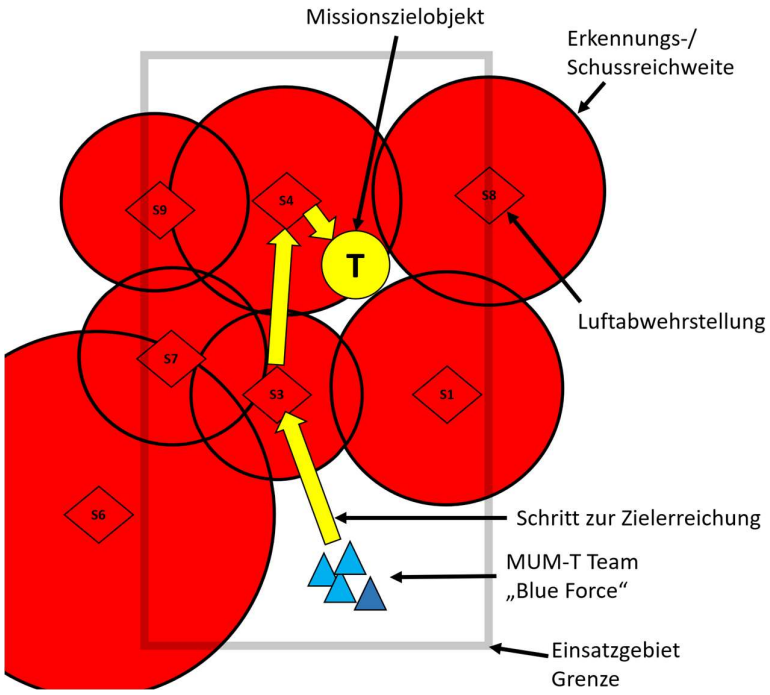



**Abbildung 3-10 Schematisches Missionsbeispiel**

Das Zielobjekt „T“ (gelber Kreis) wird durch Luftabwehr „S4“ (rote Raute) geschützt. Das MUM-T-Team „Blue Force“ (blaue Dreiecke) muss daher zunächst S3 und S4 unterdrücken, bevor es das Ziel angreift. Der strategische Plan legt diese Reihenfolge fest und dient als Grundlage für die nachfolgenden Planungsebenen.

*Taktisches Planungsmodul*

Das taktische Modul konkretisiert den strategischen Plan, indem es geeignete Taktiken auswählt. Der Ablauf ist in Abbildung 3-11 dargestellt.

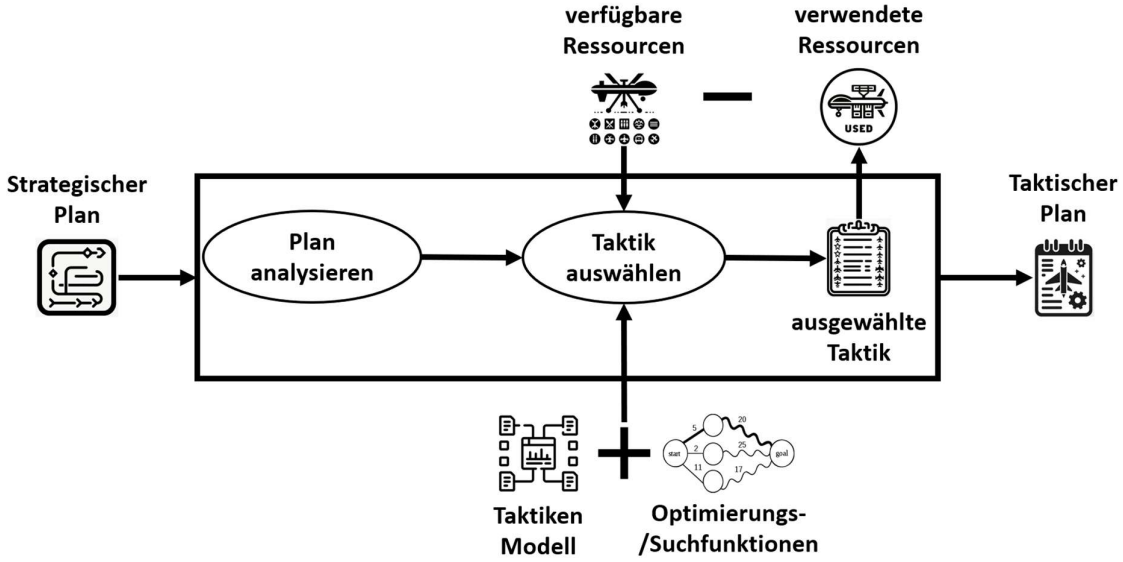



**Abbildung 3-11 Grundlegender Ablauf zur taktischen Plangenerierung**

Zunächst wird der strategische Plan analysiert und die einzelnen Zielobjekte nach ihrer Zunächst werden die Zielobjekte nach Relevanz sortiert. Anschließend wird mithilfe eines Taktikenmodells (vgl.4.2.2) und unter Berücksichtigung verfügbarer Ressourcen eine passende Taktik ausgewählt. Jede Taktik besteht aus mindestens zwei miteinander verknüpften Einzelaufgaben (vgl. 2.3.4). Für jedes Zielobjekt wird eine Taktik bestimmt, wobei die Ressourcen sukzessive angepasst werden. Am Ende entsteht ein taktischer Plan, der die Reihenfolge und Zusammensetzung der Taktiken für die Mission definiert. Dieser wird an das operative Planungsmodul übergeben.

*Operatives Planungsmodul*

Das operative Modul erstellt den detaillierten Ausführungsplan für die Teammitglieder. Der Ablauf ist in Abbildung 3-12 dargestellt.

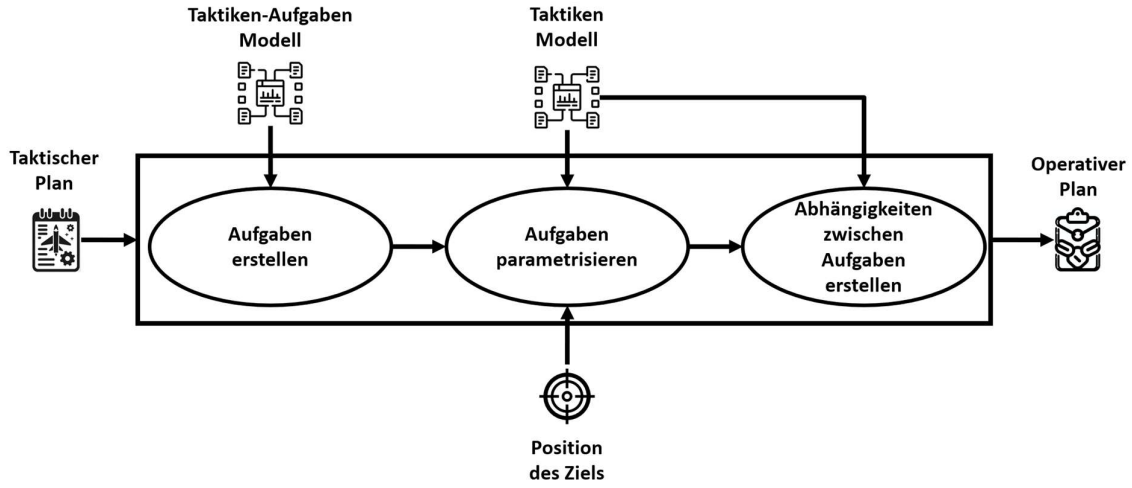



**Abbildung 3-12 Grundlegender Ablauf zur Erstellung des operativen Plans**

Auf Basis der gewählten Taktiken werden mithilfe des Taktiken-Aufgaben-Modells (vgl. 4.2.1) die erforderlichen Einzelaufgaben identifiziert und parametrisiert – z. B. hinsichtlich Dauer, Flughöhe oder Effektorreichweite. Anschließend werden Abhängigkeiten zwischen den Aufgaben definiert, etwa Reihenfolgen oder zeitliche Abstände. So entsteht ein präziser, ausführbarer Plan, der auf die Fähigkeiten und Positionen der Teammitglieder abgestimmt ist.

*Vergleich mit anderen Planerarchitekturen*

Das Planungsmodul des PAA basiert auf einem **hybriden Ansatz**, der domänenunabhängige PDDL-Planung mit taktischer Optimierung kombiniert (vgl. 2.2.1). Im Vergleich dazu:

- **Stanford Research Institute Problem Solver** (STRIPS)(Fikes & Nilsson, 1993; Nilsson & Fikes, 1971): Ein klassischer symbolischer Planer mit deterministischen Zustandsübergängen. Zwar historisch bedeutsam, aber wenig geeignet für dynamische, zeitkritische Szenarien wie militärische Luftoperationen.
- **HTN-Planer** (z.B. in Simple Hierarchical Ordered Planner 2 (SHOP2) (Nau et al., 2003)): Zerlegen komplexer Aufgaben in Teilaufgaben. Effektiv in strukturierten Domänen, aber abhängig von umfangreichem Domänenwissen und weniger flexibel bei unvorhergesehenen Ereignissen (Wertheim & Brafman, 2025).
- **The Rochester Interactive Planning System** (TRIPS) (Ferguson & Allen, 1998): Fokus auf sprachbasierte, kollaborative Planung. Stärken liegen in der Interaktion, weniger in Echtzeitfähigkeit oder taktischer Optimierung.

Der PAA kombiniert deklarative Planung mit situationsadaptiver Entscheidungslogik, Echtzeitfähigkeit und direkter Integration in das Cockpit. Damit ist er besonders geeignet für dynamische, ressourcensensitive Szenarien und stellt eine moderne, praxisnahe Weiterentwicklung klassischer Planungsansätze dar – mit wachsender Relevanz in der Forschung zu autonomen Systemen (Wertheim & Brafman, 2025).

### 3.3.2 Assistenzmodul

Das Assistenzmodul ist verantwortlich für die Überprüfung der Notwendigkeit sowie die Generierung von Plananpassungen oder -optimierungen und die zugehörigen Assistenzmeldungen. Auslöser für Assistenzbedarf können Änderungen des Missionsplans durch den Bediener, Veränderungen in der taktischen Lage oder die Feststellung von Optimierungspotenzial im Rahmen zyklischer Planüberprüfungen sein. Die Aufteilung in drei spezialisierte Teilmodule reduziert die Berechnungszeit und verhindert redundante oder doppelte Assistenzmeldungen. Die Struktur des Moduls ist in Abbildung 3-8 dargestellt.

*Soforthilfe Assistenzmodul*

Das Soforthilfe-Assistenzmodul ist dafür zuständig, den Bediener unmittelbar zu unterstützen, wenn die aktuelle taktische Lage eine schnelle Reaktion erfordert. Es wird aktiviert, sobald eine Lageänderung erkannt wird, und prüft dann die Kritikalität der Situation. Der Ablauf ist in Abbildung 3-13 dargestellt.

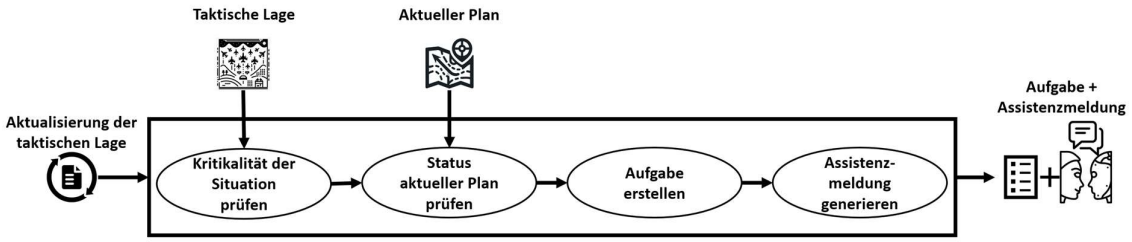



**Abbildung 3-13 Grundlegender Ablauf zur Assistenzgenerierung des Soforthilfe Assistenzmoduls**

Die Bewertung der Kritikalität erfolgt anhand der Distanz eines Teammitglieds zur Erkennungs- oder Schussreichweite einer feindlichen Stellung. Wird festgestellt, dass sich ein Teammitglied innerhalb dieses Gefahrenbereichs befindet (vgl. Abbildung 3-14), wird eine hohe Kritikalitätsstufe angenommen.

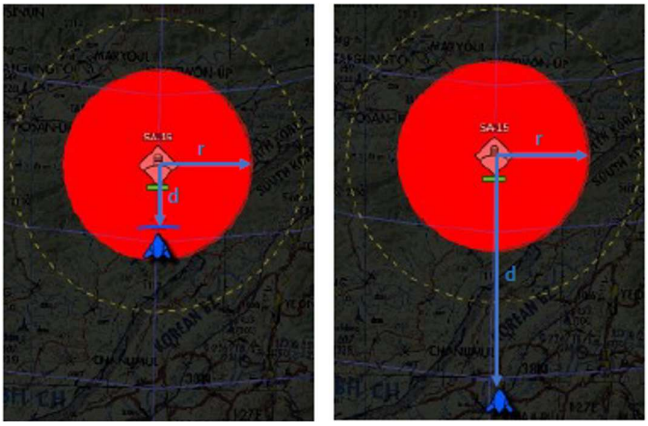



**Abbildung 3-14 Beispielbild zur Bestimmung der Kritikalität der Situation**

In diesem Fall prüft das Modul, ob das entsprechende Zielobjekt bereits im Plan berücksichtigt ist. Falls nicht, wird automatisch eine geeignete Aufgabe zur Gefahrenabwehr erstellt – z. B. ein HARM-Angriff – und dem Bediener als Assistenzmeldung im Cockpit angezeigt.

Die Reaktion des Systems hängt von der aktiven Assistenzstufe ab (vgl. Kapitel 6.2.2): Auf mittlerer Stufe wird dem Piloten ein Vorschlag unterbreitet, den er annehmen oder ablehnen kann. Auf hoher Stufe wird die Maßnahme direkt eingeleitet, mit nachträglicher Möglichkeit zur Rücknahme. Das Modul trägt somit wesentlich zur Reaktionsfähigkeit und Sicherheit des Teams bei.

*Planoptimierungsmodul*

Das Planoptimierungsmodul analysiert den aktuellen Plan des Bedieners mit dem Ziel, diesen hinsichtlich Risiko, Ressourceneinsatz und Durchführbarkeit zu verbessern. Der Ablauf ist in Abbildung 3-15 dargestellt. Es wird – wie das Missionszielvalidierungsmodul (vgl. nächster Abschnitt) – bei Lageänderungen, Planänderungen oder im Rahmen der zyklischen Planüberprüfung aktiviert (vgl. Kapitel 4.3.2).

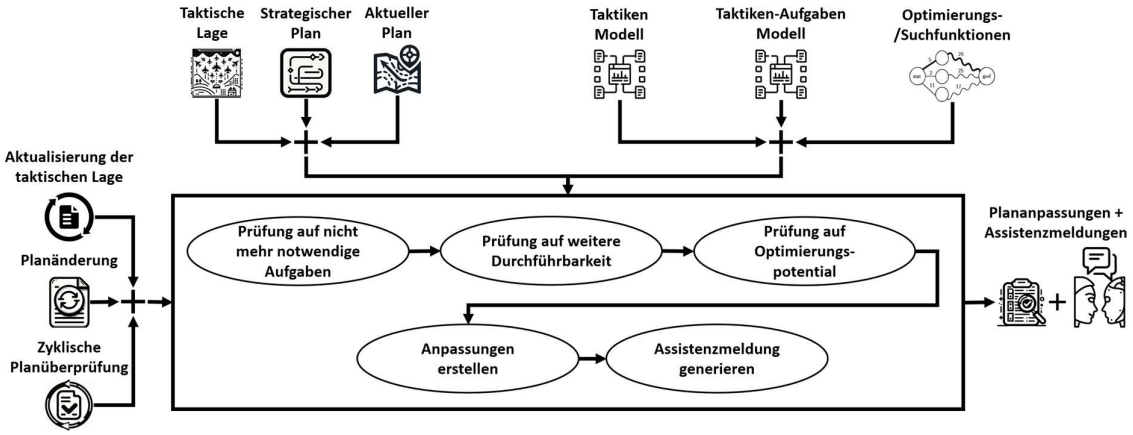



**Abbildung 3-15 Grundlegender Ablauf zur Planoptimierung**

Zunächst prüft das Modul, ob Aufgaben im Plan enthalten sind, die nicht mehr notwendig oder nicht mehr durchführbar sind – etwa weil Ressourcen durch andere Module (z. B. das Soforthilfe-Modul) bereits verplant wurden. Anschließend wird mithilfe des **Taktiken-Modells** (vgl. Kapitel 4.2.2) und der **Optimierungs- und Suchfunktionen** (vgl. Kapitel 4.2.4) bewertet, ob der Plan hinsichtlich Risiko oder Ressourceneffizienz verbessert werden kann.

Ergibt die Analyse Optimierungspotenzial, werden auf Basis des **Taktiken-Aufgaben-Modells** (vgl. Kapitel 4.2.1) konkrete Plananpassungen generiert. Diese werden dem Bediener – je nach Assistenzstufe – als Vorschlag angezeigt oder direkt umgesetzt (vgl. Kapitel 6.2.3). Der Bediener kann die Änderungen annehmen, ablehnen oder rückgängig machen.

Das Planoptimierungsmodul ergänzt das Missionszielvalidierungsmodul (vgl. nächster Abschnitt), indem es nicht nur prüft, ob das Ziel erreichbar ist, sondern auch, wie es möglichst effizient und sicher erreicht werden kann. Beide Module greifen auf dieselben Bewertungsmodelle zurück, unterscheiden sich jedoch in ihrer Zielsetzung: Zielorientierung vs. Optimierung.

*Missionszielvalidierungsmodul*

Das Missionszielvalidierungsmodul prüft, ob das übergeordnete Missionsziel mit den verfügbaren Ressourcen und innerhalb der verbleibenden Zeit erreichbar ist und ob der aktuelle Plan des Bedieners dieses Ziel tatsächlich verfolgt. Der Ablauf ist in Abbildung 3-16 dargestellt.

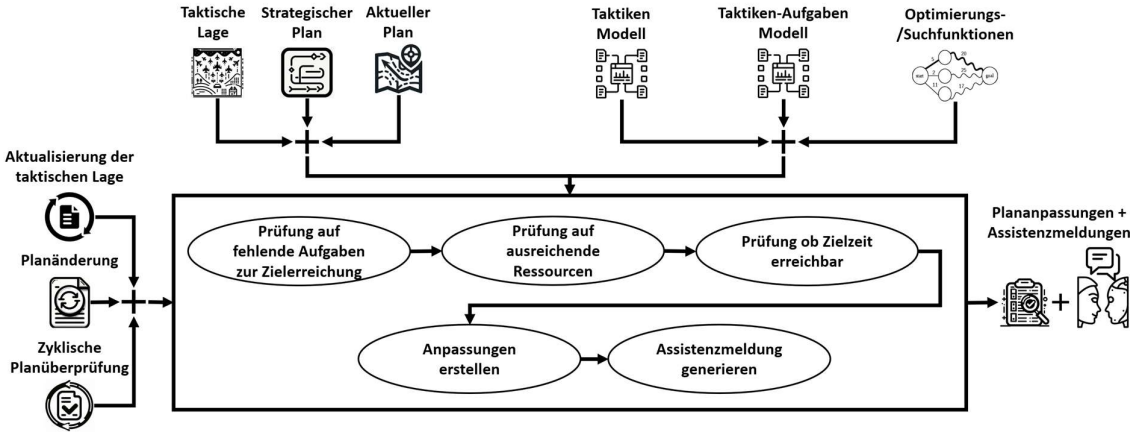



**Abbildung 3-16 Grundlegender Ablauf zur Missionszielvalidierung**

Die Eingangsgrößen und Auslöser entsprechen denen des Planoptimierungsmoduls: Das Modul wird bei Lageänderungen, Planänderungen durch den Bediener oder im Rahmen der zyklischen Planüberprüfung aktiviert (vgl. Kapitel 4.3.2). Während das Planoptimierungsmodul primär auf Effizienz, Risiko und Ressourcennutzung fokussiert (vgl. Kapitel 4.2.4), liegt der Schwerpunkt hier auf der Zielorientierung und der operativen Durchführbarkeit.

Zunächst wird geprüft, ob im aktuellen Plan Aufgaben fehlen, die zur Erreichung des strategischen Ziels notwendig sind. Diese Bewertung erfolgt auf Basis des strategischen Plans, der durch das Planerstellungsmodul erzeugt wurde (vgl. Kapitel 3.3.1). Fehlen solche Aufgaben, schlägt das Modul eine entsprechende Erweiterung vor oder führt diese – abhängig von der aktiven Assistenzstufe – automatisch durch (vgl. Kapitel 6.2.3).

Anschließend wird überprüft, ob die verfügbaren Ressourcen ausreichen, um das Missionsziel zu erreichen. Dabei werden auch bereits eingeplante Aufgaben berücksichtigt, die Ressourcen binden. Die Bewertung erfolgt mithilfe des **Taktiken-Modells** (vgl. Kapitel 4.2.2) und des **Taktiken-Aufgaben-Modells** (vgl. Kapitel 4.2.1), um die erforderlichen Mittel realistisch zu bestimmen.

Wird Unterstützungsbedarf festgestellt – etwa durch fehlende Aufgaben oder unzureichende Ressourcen – generiert das Modul automatisch eine geeignete Plananpassung. Diese wird dem Bediener über eine Assistenzmeldung im Cockpit angezeigt, analog zur Logik des Planoptimierungsmoduls.

Durch die enge funktionale Verzahnung mit den übrigen Modulen trägt das Missionszielvalidierungsmodul wesentlich zur Robustheit, Zielorientierung und operativen Sicherheit der Missionsplanung bei.

*Vergleich mit bestehenden Assistenzarchitekturen*

Das hier vorgestellte Assistenzmodul des PAA geht über klassische Entscheidungsunterstützungssysteme hinaus, indem es eine situationsadaptive Assistenzlogik implementiert, die zwischen Vorschlags- und Direktinterventionen differenziert. Im Vergleich zu etablierten Architekturen wie dem TRIPS-System (Ferguson & Allen, 1998), das auf sprachbasierte Interaktion und kollaborative Planung fokussiert ist, bietet der PAA eine direkte, kontextbezogene Assistenz innerhalb eines taktischen Cockpits. Während TRIPS auf dialogbasierte Entscheidungsunterstützung ausgelegt ist, agiert der PAA in Echtzeit und integriert sich nahtlos in die Missionsführung.

Auch im Vergleich zu klassischen adaptiven Automatisierungssystemen, wie sie z. B. in der Luftfahrt oder Prozessführung eingesetzt werden (Kaber & Endsley, 2004), zeigt der PAA eine höhere Granularität und Flexibilität. Während viele adaptive Systeme auf vordefinierte Schwellenwerte oder Zustandswechsel reagieren, basiert die Assistenzlogik des PAA auf einer mehrstufigen Kritikalitätsbewertung und einer semantischen Analyse des Missionsplans. Dadurch kann der PAA nicht nur auf akute Gefahren reagieren, sondern auch proaktiv Planoptimierungen vorschlagen, die auf taktischen und strategischen Überlegungen beruhen. Ein weiteres Alleinstellungsmerkmal ist die Verknüpfung von Planbewertung, Ressourcenmodellierung und Assistenzkommunikation. Während viele Systeme entweder planen oder assistieren, integriert der PAA beide Funktionen in einem kohärenten Agentenmodell. Dies ermöglicht eine kontinuierliche Bewertung und Anpassung des Missionsplans unter Berücksichtigung von Risiko, Ressourceneinsatz und Zielerreichung – ein Ansatz, der in der Literatur zur Mensch-Automation-Interaktion zunehmend gefordert wird (Chen & Barnes, 2014; Parasuraman et al., 2000).

Insgesamt positioniert sich das Assistenzmodul des PAA als **kognitiv adaptives System**, das klassische Entscheidungsunterstützung mit moderner Planungslogik und Mensch-Maschine-Kooperation verbindet. Es adressiert zentrale Herausforderungen der Automationsakzeptanz, Transparenz und Vertrauensbildung in sicherheitskritischen Umgebungen.

# 4 Technische Umsetzung

Die in Kapitel 3 entwickelte konzeptionelle Architektur des Planungsassistenzagenten (PAA) bildet die Grundlage für die in diesem Kapitel beschriebene technische Realisierung. Aufbauend auf der dort vorgestellten Systemstruktur, den funktionalen Anforderungen sowie den definierten Modulen zur Planerstellung und Assistenzgenerierung, wird im Folgenden die konkrete Implementierung des PAA im MUM-T Kampfflugzeugsimulator detailliert erläutert.

Ziel dieses Kapitels ist es, die Umsetzung der in der Konzeptionsphase spezifizierten Fähigkeiten in ein funktionales, softwaretechnisch realisiertes System darzustellen. Dabei wird zunächst die Gesamtarchitektur des Systems beschrieben, bevor die einzelnen Subsysteme – das hierarchisch strukturierte Planungssystem, die Bewertungs- und Entscheidungsmodelle, der Scheduler sowie das Assistenzsystem – in ihrer technischen Ausprägung vorgestellt werden.

Die technische Umsetzung des PAA basiert auf einer modularen Systemarchitektur, die eine klare funktionale Trennung zwischen Planungs- und Assistenzfunktionen vorsieht. Ziel ist es, eine adaptive, skalierbare und robuste Unterstützung für den menschlichen Operator im Kontext komplexer militärischer Luftoperationen zu realisieren. Der PAA ist in zwei Hauptmodule untergliedert: das Planungssystem und das Assistenzsystem. Das Planungssystem umfasst die strategische, taktische und operative Planerstellung, während das Assistenzsystem für die kontinuierliche Überwachung des Missionsplans, die Bewertung von Änderungen in der Umgebung sowie die Generierung von Handlungsempfehlungen zuständig ist.

## 4.1 Planungssystem des PAA

Das Planungssystem des PAA ist in drei aufeinander aufbauende Ebenen gegliedert: strategisch, taktisch und operativ (vgl. 3.3.1). Diese Struktur ermöglicht eine differenzierte und kontextadaptive Planerstellung, die sowohl langfristige Zielsetzungen als auch kurzfristige taktische Anforderungen berücksichtigt. Jede Ebene nutzt spezifische Methoden und Modelle zur effizienten Generierung und Bewertung von Missionsplänen.

Viele klassische KI-Planungssysteme sind zwar effizient, jedoch nur eingeschränkt auf reale und insbesondere dynamische Probleme anwendbar (Cesta et al., 2004; Chen & Bercher, 2022). Um diese Einschränkungen zu überwinden, wird im PAA ein hybrider Planungsansatz verfolgt (Schattenberg et al., 2005), der die Stärken verschiedener Planungsmethoden kombiniert (vgl. 4.1.1, 4.1.2 und 4.1.3).

Durch die Aufteilung der automatisierten Planerstellung auf mehrere Ebenen wird das komplexe Gesamtproblem in kleinere, besser handhabbare Teilprobleme zerlegt (Iba, 2006). Dies bringt mehrere Vorteile mit sich:

- **Robustheit**: Fehlende Ressourcen oder Konflikte können bereits auf höheren Planungsebenen erkannt und berücksichtigt werden.
- **Effizienz**: Die Modellierung und Implementierung der Teilprobleme ist einfacher und schneller durchführbar.

- **Rechenzeit**: Die spezialisierte Anwendung von Planungsmethoden auf jeder Ebene reduziert die Gesamtberechnungszeit erheblich.

Ein weiterer Vorteil ergibt sich aus der Möglichkeit, unterschiedliche Planungsmodelle und Bewertungskriterien gezielt einzusetzen. So kommen auf der strategischen Ebene domänenunabhängige Planer wie PDDL zum Einsatz (vgl. 4.1.1), während auf der taktischen und operativen Ebene domänenspezifische Modelle wie das Taktiken-Modell, das Taktiken-Aufgaben-Modell und die Ressourcenmodelle (vgl. 4.2.1 – 4.2.3) verwendet werden. Diese ermöglichen eine realitätsnahe Bewertung und Optimierung der Pläne hinsichtlich Zeit, Risiko und Ressourceneinsatz (vgl. 4.2.4).

Insbesondere in dynamischen Einsatzszenarien, wie sie in militärischen Luftoperationen typisch sind, zeigt sich die Stärke dieses Ansatzes: Änderungen in der Lage können auf einer höheren Ebene schnell erkannt und durch gezielte Anpassungen auf den darunterliegenden Ebenen effizient verarbeitet werden – ohne dass eine vollständige Neuplanung erforderlich ist (Edelkamp, 2003).

### 4.1.1 Strategische Planung

Die strategische Planung bildet die oberste Ebene des Planungssystems. Ziel ist es, auf Basis der aktuellen taktischen Lage, der Missionsziele und der verfügbaren Ressourcen einen groben Ablaufplan zu erstellen, der die wesentlichen Schritte zur Zielerreichung definiert. Hierzu wird PDDL in Version 2.2 verwendet, die in dieser Version eine wichtige neue Funktion einführt, die in vorherigen PDDL-Versionen nicht berücksichtigt wurde: zeitlich begrenzte Anfangsliterale (timed initial literals) (Edelkamp & Hoffman, 2004). Vorgängerversionen konnten nur annehmen, dass ein Attribut zu Beginn entweder wahr oder falsch ist. Dadurch wurden Fakten, die sich zu einem späteren Zeitpunkt ändern, nicht berücksichtigt. Durch zeitlich begrenzte Anfangsliterale ist es möglich anzugeben, zu welchem Zeitpunkt eine Tatsache, die zuvor falsch war, wahr wird. Damit können auch dynamische Prozesse abgebildet werden, bei denen Planung und Umplanung durchgeführt werden, sobald sich die Umgebung ändert. Zum Lösen der Planungsprobleme wird der LPG-TD (Gerevini et al., 2004) Planer verwendet, da er die Features von PDDL 2.2 unterstützt.

*Einordnung von PDDL und Alternativen*

Für die strategische Planung in KI-basierten Assistenzsystemen wie dem PAA ist die Wahl der zugrunde liegenden Modellierungssprache von zentraler Bedeutung. In dieser Arbeit kommt PDDL zum Einsatz, ein de-facto-Standard in der KI-Planungsforschung, der sich durch seine domänenunabhängige Struktur, formale Semantik und hohe Interoperabilität mit bestehenden Planern auszeichnet (Haslum et al., 2019).

PDDL erlaubt die deklarative Beschreibung von Planungsproblemen auf Basis prädikatenlogischer Konzepte. Durch Erweiterungen wie PDDL 2.1 und 2.2 können auch zeitliche Aspekte, Ressourcenverbrauch und numerische Effekte modelliert werden (Haslum et al., 2019). Diese Eigenschaften machen PDDL besonders geeignet für komplexe, dynamische Umgebungen wie militärische Missionsszenarien.

Trotz dieser Vorteile existieren mehrere Alternativen zu PDDL, die je nach Anwendungskontext ebenfalls relevant sein können:

- **HTN:** verfolgt einen top-down Ansatz, bei dem komplexe Aufgaben durch Methoden in Teilaufgaben zerlegt werden. HTN-Planung ist besonders effektiv in stark strukturierten, domänenspezifischen Szenarien, erfordert jedoch umfangreiches Expertenwissen zur Modellierung der Hierarchien. Neuere Entwicklungen wie Hierarchical Domain Definition Language (HDDL) versuchen, die Vorteile von HTN mit der Standardisierung von PDDL zu verbinden (Höller et al., 2020).
- **STRIPS:** Vorläufer von PDDL, bietet eine einfache, intuitive Syntax, ist jedoch in seiner Ausdrucksstärke begrenzt. Insbesondere fehlen Mechanismen zur Modellierung von Zeit, Ressourcen oder numerischen Zuständen, was STRIPS für realweltliche Anwendungen weniger geeignet macht (Fikes & Nilsson, 1993; Haslum et al., 2019).
- **Anwser Set Programming (ASP):** eine leistungsstarke Alternative, insbesondere für kombinatorisch komplexe Probleme. ASP erlaubt eine sehr ausdrucksstarke Modellierung, ist jedoch in der Planungsdomäne weniger verbreitet und erfordert tiefere Kenntnisse in Logikprogrammierung (Lifschitz, 2019).
- **Prolog-basierte Systeme** und **regelbasierte Engines**: bieten maximale Flexibilität und Kontrolle, sind jedoch nicht standardisiert und mit hohem Implementierungsaufwand verbunden. Ihre Wiederverwendbarkeit und Wartbarkeit sind im Vergleich zu PDDL deutlich eingeschränkt (Muggleton & De Raedt, 1994; Russel et al., 2016).

Im Vergleich zu diesen Alternativen bietet PDDL eine ausgewogene Kombination aus Ausdrucksstärke, Standardisierung und Toolunterstützung. Die Verfügbarkeit leistungsfähiger Planer wie LPG-TD, Fast Downward oder OPTIC ermöglicht eine direkte Integration in bestehende Systeme, ohne dass eigene Planungsalgorithmen entwickelt werden müssen. Darüber hinaus fördert die deklarative Natur von PDDL die Transparenz und Nachvollziehbarkeit der erzeugten Pläne – ein entscheidender Aspekt in sicherheitskritischen Anwendungen (Gerevini et al., 2004; Haslum et al., 2019).
Insgesamt spricht die Kombination aus Modularität, Erweiterbarkeit, Domänenunabhängigkeit und Kompatibilität mit modernen Planern klar für den Einsatz von PDDL auf der strategischen Ebene des PAA.

*Aufbau des strategischen Planungsmoduls*

Abbildung 4-1 zeigt die Teilmodule des strategischen Planungsmoduls sowie deren Eingangs- und Ausgangsgrößen zur Erstellung eines strategischen Plans.

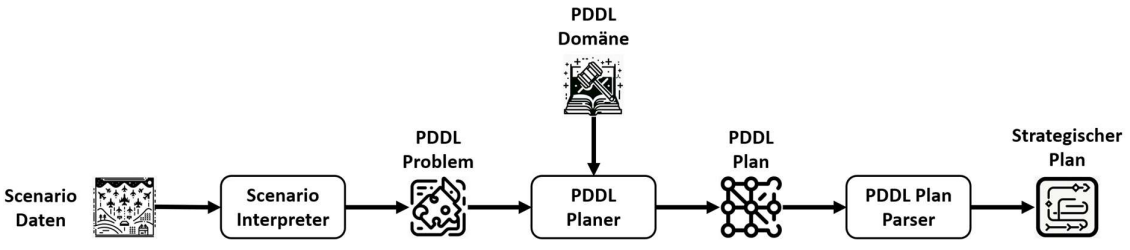



**Abbildung 4-1 Aufbau strategisches Planungsmodul**

Die "Scenario Daten" beinhalten die aktuell bekannte taktische Lage, das Missionsziel sowie Nebenbindungen (z.B. eine zeitliche Vorgabe wann ein bestimmtes Ziel erreicht werden muss)

sowie alle Informationen der zur Planung notwendigen Ressourcen. Diese werden durch den "Scenario Interpreter" in ein "PDD -Problem" umgewandelt. Das PDDL Problem ist zusammen mit der definierten "PDDL Domäne" notwendig, damit ein "PDDL Planer" einen Plan erstellen kann. Die PDDL Domäne definiert den Kontext oder die "Regeln des Spiels", innerhalb derer geplant wird. Das PDDL Problem spezifiziert das explizite "Spiel", das mit den definierten Regeln gelöst werden soll. Nachdem der PDDL Planer einen "PDDL Plan" erstellt hat, wird dieser vom "PDDL Plan Parser" in ein für das Gesamtsystem verständliches Datenformat überführt, wodurch der "Strategische Plan" erstellt wird.

*PDDL Domänen Definition*

Die PDDL-Domäne ist eines der zentralen Elemente von PDDL. Sie beschreibt die allgemeinen Strukturen und Regeln, die in der Umgebung gelten, in der geplant wird (Ghallab et al., 1998). Abbildung 4-2 zeigt einen Ausschnitt der PDDL-Domänendefinition. Diese besteht aus den folgenden Abschnitten (Ghallab et al., 1998; Fox et al., 2003):

- **Name der Domäne** (domain): Der Name der Domäne wird in der Definition (define) festgelegt.
- **Anforderungen** (requirements): Dies sind spezielle Eigenschaften oder Erweiterungen, die die Domäne unterstützt
- **Typen** (types): Objekte, auf die Prädikate und Aktionen angewendet werden können.
- **Funktionen** (functions): Ein numerischer Fluss (numeric fluent), welcher den Wert während des Planungsvorgangs behalten und ändern kann.
- **Prädikate** (predicates): Eigenschaften und Zustände der Domäne.
- **Aktionen** (actions): Mögliche Aktionen die in der Domäne durchgeführt werden können.

```
(define (domain domain_new)

    (:requirements :strips :typing :action-costs :negative-preconditions :disjunctive-preconditions)

    (:types
        pathway area flyingObject target - object
        blueForce - flyingObject
    )

    (:functions
        (distance ?from ?to - area)
        (supression_cost ?a - area)
        (total-cost)
            )

    (:predicates
        (at ?o - object ?a - area)
        (part_of ?p - pathway ?from - area ?to - area)
        (is_localized ?o - object)
        (is_scanned ?a - area)

        (is_hostile ?o - object)
        (is_verified_hostile ?o - object)
        (is_verified_peaceful ?o - object)
        (is_verified_as_success ?o - object)
    )

    (:action move
        :parameters (?fo - flyingObject ?from ?to - area ?p - pathway)
        :precondition (and (at ?fo ?from)
        (part_of ?p ?from ?to)
        (not (is_hostile ?from))
        )
        :effect (and (not (at ?fo ?from))
            (at ?fo ?to)
            (increase (total-cost) (distance ?from ?to))
        )
    )
```

**Abbildung 4-2 Ausschnitt einer PDDL Domänen Definition**

Auf der strategischen Planungsebene können spezifische taktische Entscheidungen und explizite Aktionen einzelner Teammitglieder zunächst vernachlässigt werden. Aus diesem Grund und zur Vereinfachung der Modellierung der PDDL Domäne sowie zur Minimierung der Berechnungszeiten, wurden alle Teammitglieder zu einem Kollektiv namens "BlueForce" zusammengefasst. Ebenso wurden die möglichen durchführbaren Aktionen, die das Team ausführen kann, auf die grundlegendsten beschränkt:

- **move:** Bewegt das Team von einem Punkt zum nächsten.
- **supress_enemy:** Unterdrückt ein feindliches Ziel.
- **scan_area:** Sucht ein bestimmtes Gebiet nach potenziellen feindlichen Stellungen ab.
- **localize_object:** Lokalisiert ein bestimmtes Objekt in einem Bereich.
- **verify_target_as_hostile/verify_target_as_peaceful:** Diese beiden Aktionen dienen zur Verifikation des Status des Zielobjektes als feindlich oder freundlich.

Die Implementierung dieser Aktionen ist in Abbildung 4-3 dargestellt.

```
(:action move
    :parameters (?fo - flyingObject ?from ?to - area ?p - pathway)
    :precondition (and (at ?fo ?from)
    (part_of ?p ?from ?to)
    (not (is_hostile ?from))
    )
    :effect (and (not (at ?fo ?from))
        (at ?fo ?to)
        (increase (total-cost) (distance ?from ?to))
    )
)

    (:action surpress_enemy
        :parameters (?fo - flyingObject ?a - area)
        :precondition (and
            (at ?fo ?a)
            (is_hostile ?a)
        )
        :effect (and
            (not(is_hostile ?a))
            (increase (total-cost) (supression_cost ?a))
        )
    )

    (:action scan_area
        :parameters ( ?bf - blueForce ?a - area)
        :precondition (and
            (at ?bf ?a)
            (not (is_hostile ?a))
        )
        :effect (and
            (is_scanned ?a)
        )
    )
```

```
(:action localize_object
        :parameters (?bf - blueForce ?a - area ?o - object)
        :precondition (and
            (at ?bf ?a)
            (at ?o ?a)
            (is_scanned ?a)
        )
        :effect (and
            (is_localized ?o)
        )
    )

    (:action verify_target_as_hostile
        :parameters (?t - target ?bf - blueForce ?a - area)
        :precondition (and
            (at ?t ?a)
            (at ?bf ?a)
            (is_localized ?t)
        )
        :effect (and
            (is_verified_hostile ?t)
        )
    )

    (:action verify_target_as_peaceful
        :parameters (?t - target ?bf - blueForce ?a - area)
        :precondition (and
            (at ?t ?a)
            (at ?bf ?a)
            (is_localized ?t)
            (not (is_hostile ?t))
        )
        :effect (and
            (is_verified_peaceful ?t)
        )
    )
```

**Abbildung 4-3 Implementierte Aktionen der PDDL Domäne**

Durch diese einfache Modellierung kann schnell ein einfacher und robuster Plan erstellt werden, der die wichtigsten Schritte zur Zielerreichung enthält.

*PDDL Problem Definition*

Ein PDDL Problem beschreibt die spezifischen Details einer Instanz eines Planungsproblems innerhalb einer Planungsdomäne. Während die Domänendefinition allgemeine Regeln und Aktionen definiert, spezifiziert ein PDDL Problem die konkreten Objekte, den Anfangszustand und die Zielbedingungen (Ghallab et al., 1998). Ein Beispiel für ein PDDL-Problem ist in Abbildung 4-4 dargestellt und besteht aus folgenden Abschnitten:

- **Name des Problems** (problem): Der Name, der diesem speziellen Problem zugewiesen wird.
- **Domäne** (domain): Der Name der Domäne, in der das Problem definiert ist.
- **Objekte** (objects): Spezifische Instanzen von Typen, die in der Domäne definiert sind. Jedes Objekt gehört zu einem bestimmten Typ.
- **Anfangszustand** (init): Beschreibt die initialen Fakten, die zu Beginn des Planungsproblems wahr sind. Diese Fakten sind Prädikate, die die Positionen und Zustände der Objekte definieren.
- **Zielzustand** (goal): Beschreibt die Bedingungen, die erfüllt sein müssen, damit der Plan als erfolgreich gilt.

- **Metrik** (metric): Definition von Metriken bzw. Nebenbedingungen, die bei der Planerstellung zur Zielerreichung zu beachten sind.

```
(define (problem prob_new)

    (:domain domain_new)

    (:objects
        start areaA areaB areaC areaEnd - area
        pathStartToA  pathStartToC pathAToB pathAToEnd pathCToEnd  - pathway
        bluef - blueForce
    )

    (:init
        (at bluef start)
        (is_hostile areaA)
        (is_hostile areaC)

        (part_of pathStartToA start areaA)
        (part_of pathStartToC start areaC)

        (part_of pathAToB areaA areaB)
        (part_of pathAToEnd areaA areaEnd)
        (part_of pathCToEnd areaC areaEnd)

        (= (supression_cost areaA) 15)
        (= (supression_cost areaC) 15)

        (= (distance start areaA) 1.0)
        (= (distance start areaC) 25.0)

        (= (distance areaA areaB) 1.0)
        (= (distance areaB areaEnd) 20.0)
        (= (distance areaC areaEnd) 500.0)

        (= (total-cost) 0)
    )

 (:goal
        (and
            (at bluef areaEnd)
            (is_scanned areaEnd)
        )
)

 (:metric minimize (
    (total-cost)
    )
)
)
```

**Abbildung 4-4 Beispiel eines PDDL Problems**

*Beispiel zur strategischen Planung*

Abbildung 4-5 zeigt ein Beispiel, anhand dessen die strategische Planerstellung erläutert wird. Die Darstellung ist dieselbe, die dem Bediener innerhalb des Cockpits zur Verfügung steht. Dem PAA stehen somit auch nur dieselben Informationen zur Verfügung wie dem Piloten im Cockpit.

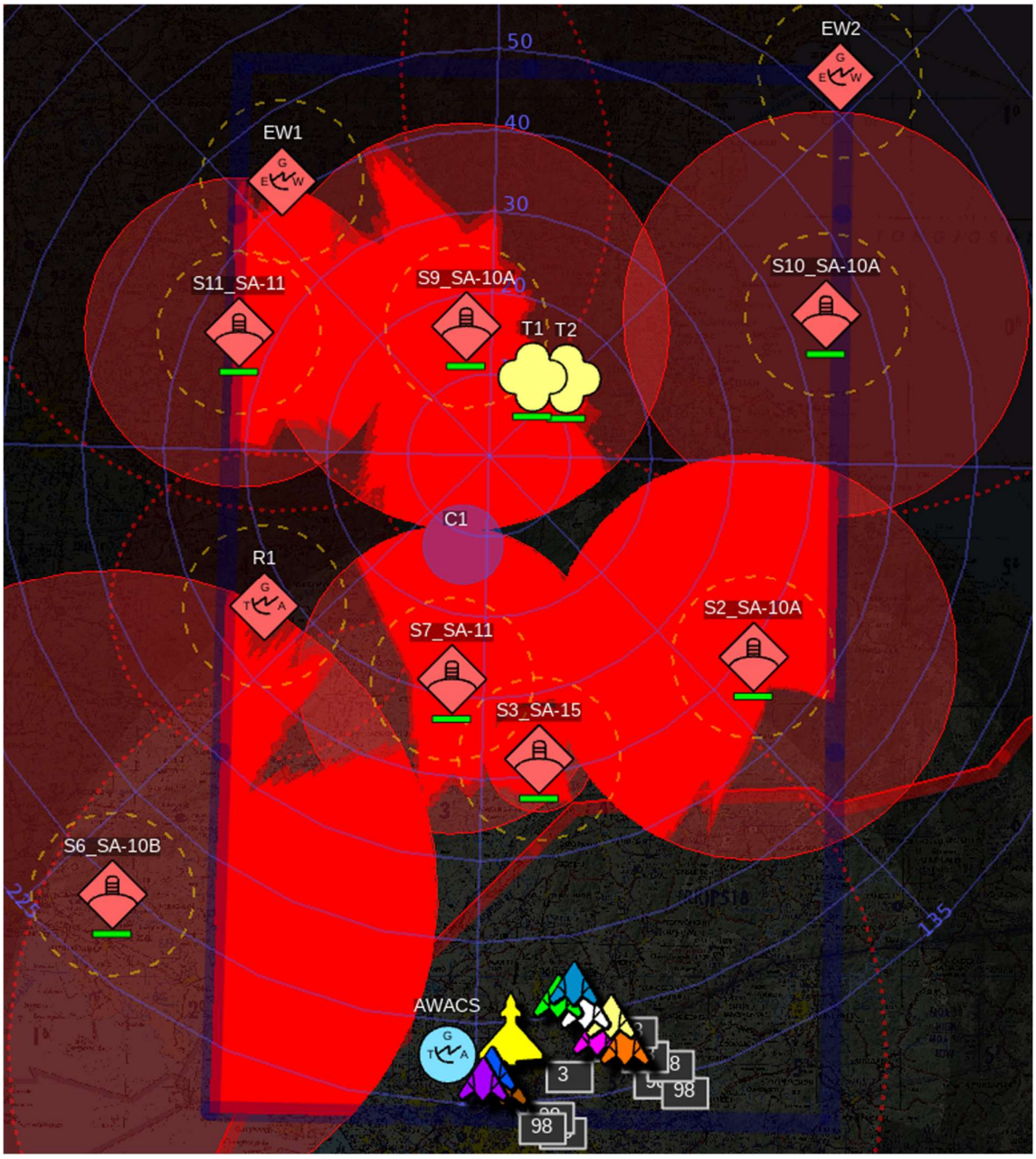



**Abbildung 4-5 Beispielszenario zur strategischen Planung**

Das Ziel dieser Mission ist es, die beiden Zielobjekte T1 und T2 aufzuklären und ihren Status zu verifizieren. Im aktuellen Missionsausschnitt ist der Zustand dieser Zielobjekte noch unbekannt – es ist nicht eindeutig geklärt, ob es sich tatsächlich um die gesuchten Ziele handelt (vgl. Tabelle 2-4). Daher besteht die primäre Aufgabe in der Verifikation des Zielstatus durch Annäherung und sensorbasierte Aufklärung.

Zur Effizienzsteigerung soll die Gesamtmissionszeit minimiert werden. Dies bedeutet, dass einerseits die kürzeste Route zu den Zielobjekten gefunden werden muss, andererseits möglichst wenige feindliche Stellungen unterdrückt werden sollen, um Ressourcen zu schonen und Risiken zu minimieren. Alle feindlichen Stellungen im Szenario sind mit einer spezifischen Gefährdungsstufe für die BlueForce modelliert. Diese Gefährdungsstufen fließen zusätzlich zur reinen Luftlinienentfernung in die strategische Planung ein.

Konkret wird bei der Pfadplanung nicht nur die geometrisch kürzeste Verbindung zwischen Startpunkt und Ziel betrachtet, sondern auch die Gefährdungslage entlang des Weges. Dabei wird bewertet, welche feindlichen Stellungen sich zwischen dem Team und dem Ziel befinden und in welchem Maße sie den geplanten Pfad gefährden. Zusätzlich wird berücksichtigt, ob und in welchem Ausmaß die Zielobjekte durch feindliche Stellungen „eingeschlossen“ sind, was sich direkt auf die Auswahl der Annäherungsrichtung und die Notwendigkeit zur Unterdrückung einzelner Bedrohungen auswirkt.

Die Daten des Szenarios liegen in Form einer Extensible Markup Language (XML)-Datei (Bray et al., 1997) vor. Aus dieser Datei werden die relevanten Objekte, Bedrohungen und Zielkoordinaten extrahiert und in das zuvor beschriebene Verfahren zur strategischen Planung überführt. Schematisch dargestellt sind der resultierende Pfad sowie der daraus abgeleitete strategische Plan in Abbildung 4-6.

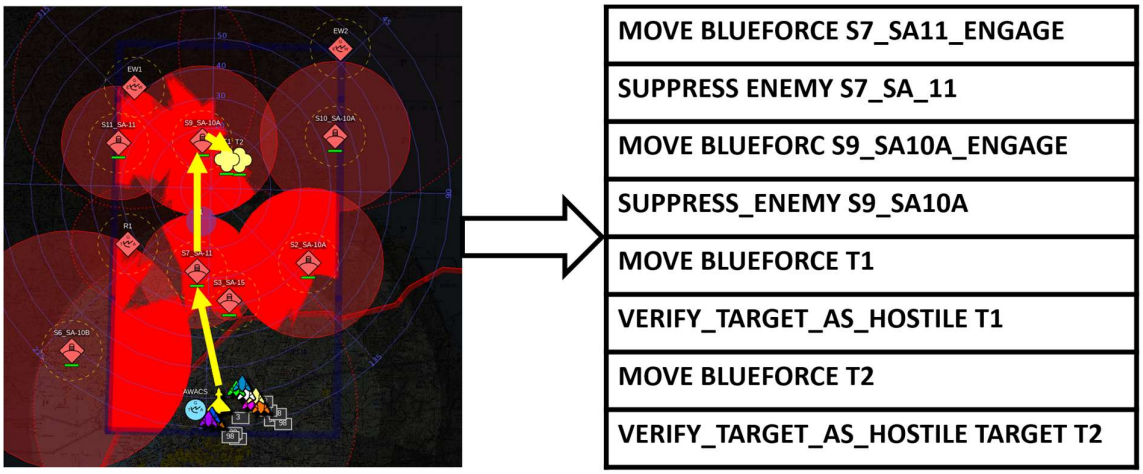



**Abbildung 4-6 Beispielszenario und resultierender strategischer Plan**

Nachdem sich die BlueForce zur SAM-Stellung S7_SA11 (Spitze des ersten gelben Pfeils) bewegt hat (MOVE BLUEFORCE S7_SA11_ENGAGE), soll diese unterdrückt werden (SUPPRESS ENEMY S7_SA_11). Im nächsten Schritt bewegt sich die BlueForce zur SAM-Stellung S9_SA10A (MOVE BLUEFORCE S9_SA10A_ENGAGE) und unterdrückt (SUPPRESS_ENEMY S9_SA10A) diese ebenfalls. Anschließend sieht der strategische Plan vor, die BlueForce zu T1 zu bewegen (MOVE BLUEFORCE T1), den Status zu verifizieren (VERIFY_TARGET_AS_HOSTILE T1) und anschließend dasselbe für T2 durchzuführen (MOVE BLUEFORCE T2, VERIFY_TARGET_AS_HOSTILE TARGET T2). Dieser Ablauf liegt dem System in einer verarbeitbaren und verständlichen Form vor und dient, wie in Kapitel 3 erwähnt, den anderen Modulen zur weiteren Verwendung.

### 4.1.2 Taktische Planung

Auf Basis des strategischen Plans erfolgt die taktische Planung. Hierbei werden für jedes im strategischen Plan identifizierte Zielobjekt geeignete Taktiken ausgewählt, die unter Berücksichtigung der verfügbaren Ressourcen, Risiken und Zeitvorgaben eine effektive Zielbekämpfung ermöglichen. Die Auswahl erfolgt iterativ und priorisiert Ziele mit hoher Kritikalität.

Das taktische Planungsmodul ist für die Umsetzung des strategischen Plans in konkrete taktische Handlungsoptionen zuständig. Ziel ist es, für jedes im strategischen Plan identifizierte Zielobjekt eine geeignete Taktik auszuwählen, die unter den gegebenen Ressourcenbedingungen durchführbar ist und gleichzeitig ein optimales Verhältnis zwischen Risiko, Zeitaufwand und Ressourceneinsatz bietet. Der grundlegende Ablauf ist in Abbildung 4-7 dargestellt.

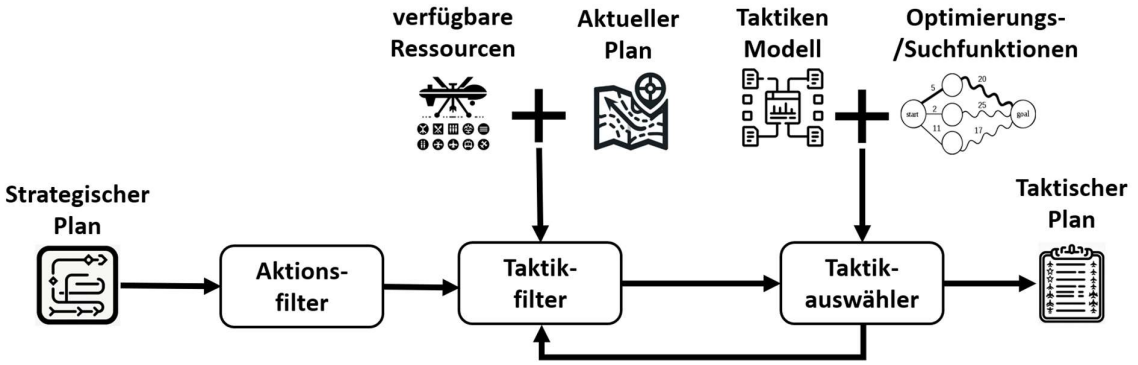



**Abbildung 4-7 Aufbau taktisches Planungsmodul**

*Vorverarbeitung des strategischen Plans*

Zunächst wird der strategische Plan durch einen Aktionsfilter vorverarbeitet. Dabei werden ausschließlich die SUPPRESS_ENEMY-Schritte extrahiert, da diese für die Auswahl geeigneter Taktiken relevant sind. Anschließend wird die Reihenfolge dieser Schritte invertiert. Der Grund hierfür liegt in der militärischen Praxis: Hochwertziele verfügen in der Regel über die stärksten Schutzmaßnahmen. Um im Zielgebiet noch über die effektivsten Ressourcen zu verfügen, werden diese Ziele zuerst berücksichtigt.

Der resultierende gefilterte und invertierte strategische Plan (als Grundlage dient der strategische Plan aus Abbildung 4-6) sowie der zugehörige Baum aus SAM-Stellungen und möglichen Taktiken sind in Abbildung 4-8 dargestellt.

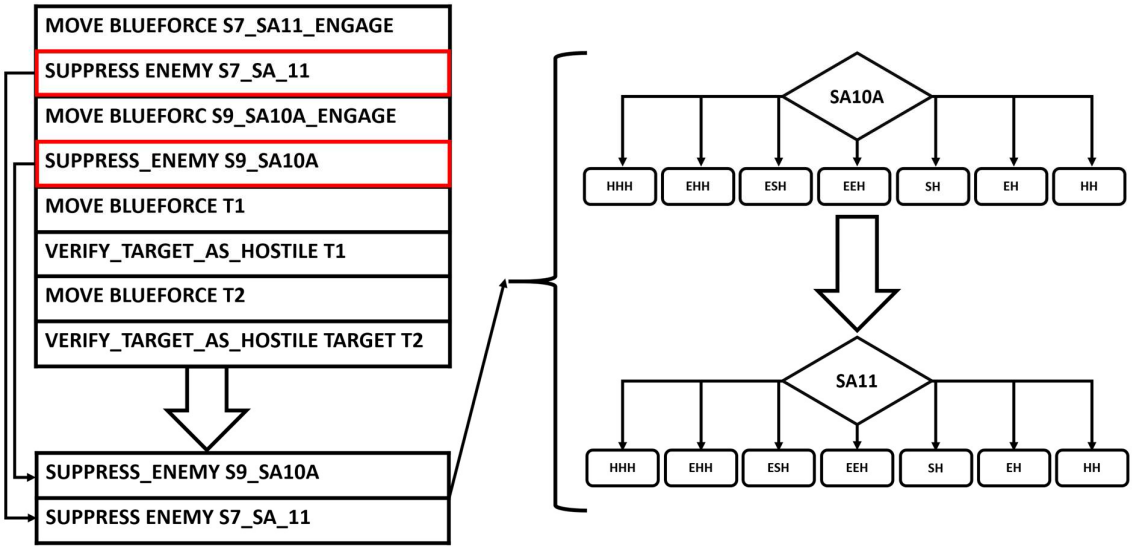



**Abbildung 4-8 Gefilterter und invertierter strategischer Plan und resultierender Baum aus SAM-Stellungen und Taktiken**

*Auswahl geeigneter Taktiken*

Für jedes Zielobjekt wird eine geeignete Taktik ausgewählt. Dabei kommt das in Kapitel 4.2.2 beschriebene Taktiken-Modell zum Einsatz, das eine numerische Bewertung möglicher Taktiken hinsichtlich Zeit, Risiko und Ressourceneinsatz erlaubt. Die Auswahl erfolgt mithilfe von Optimierungs- und Suchfunktionen, die auf den in Kapitel 4.2.4 definierten Bewertungs- und Optimierungskriterien basieren.

Eine Taktik besteht aus mindestens zwei miteinander in Beziehung stehenden Einzelaufgaben, deren Struktur und Abfolge im Taktiken-Aufgaben-Modell (vgl. Kapitel 4.2.1) definiert ist. Dieses Modell legt fest, ob Aufgaben parallel oder sequentiell ausgeführt werden und bildet damit die Grundlage für die operative Umsetzung (siehe Kapitel 4.1.3), hat jedoch auf dieser Ebene der Planung keinen direkten Einfluss.

Sind mehrere zu unterdrückende Objekte im strategischen Plan vorhanden, werden die für die ausgewählte Taktik nötigen Ressourcen von den verfügbaren Ressourcen abgezogen. Die Ressourcenverfügbarkeit und deren Einsatzkosten werden durch die in Kapitel 4.2.3 beschriebenen Ressourcenmodelle spezifiziert. Diese ermöglichen eine realistische Einschätzung der Belastung einzelner Plattformen und helfen, die Effizienz und Sicherheit der Mission zu maximieren.

Mit den aktuell verfügbaren Ressourcen und dem bestehenden Plan des Bedieners werden die umsetzbaren Taktiken gefiltert. Dies geschieht aus zwei Gründen:

1. Ausschluss von nicht durchführbaren Taktiken aufgrund bereits verplanter Ressourcen.
2. Minimierung der Berechnungszeiten für die taktische Planerstellung.

Die verbleibenden Taktiken werden anschließend anhand ihrer Gesamtkosten aufsteigend sortiert. Die Taktik mit den geringsten Kosten wird ausgewählt und dient als neue

Eingangsgröße für den Taktikfilter, um potenziell nicht mehr durchführbare Optionen zu eliminieren. Dieser Prozess wiederholt sich iterativ, bis alle SUPPRESS_ENEMY-Schritte des strategischen Plans abgearbeitet sind. Das Ergebnis ist ein vollständiger taktischer Plan. Der Ablauf ist in Abbildung 4-9 visualisiert.

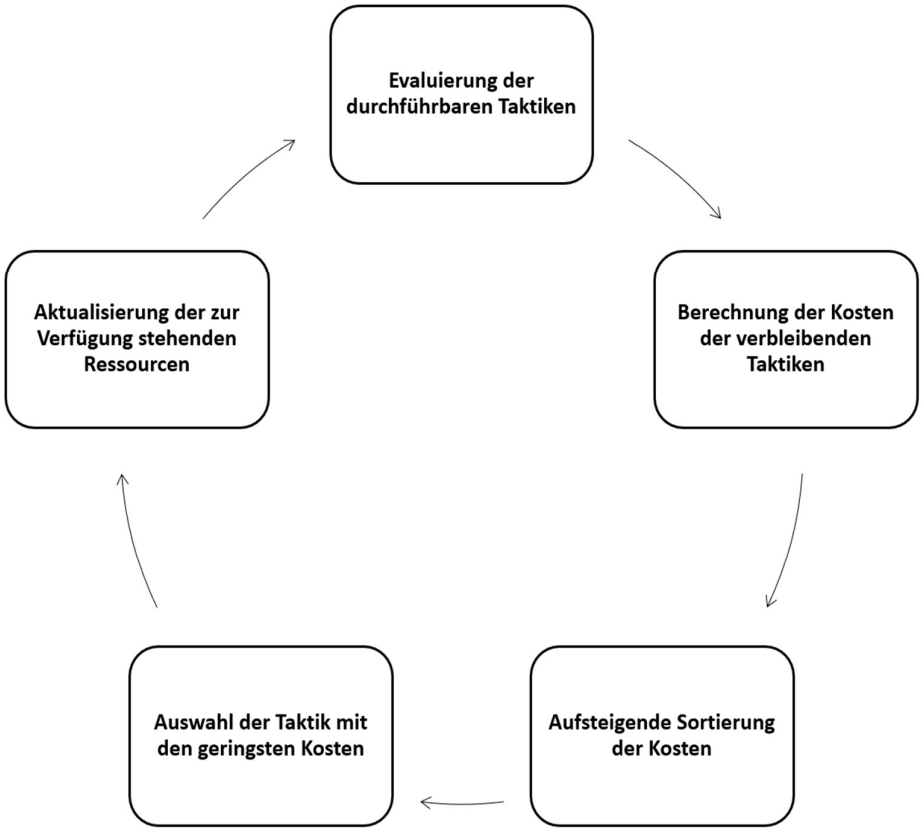



**Abbildung 4-9 Zyklischer Ablauf zur Taktikauswahl**

*Algorithmische Umsetzung*

Dieses Vorgehen entspricht der Anwendung eines Greedy-Algorithmus (Chen, 2008) in Kombination mit dynamischer Programmierung (Neumann, 1993)**:**

- Der **Greedy-Ansatz** wählt in jedem Schritt lokal die kostengünstigste Taktik aus. Obwohl er keine globale Optimallösung garantiert, liefert er in vielen praktischen Anwendungen Lösungen, die nahe am globalen Optimum liegen – insbesondere bei additiven Kostenstrukturen oder monotonen Entscheidungsräumen (Cormen et al., 2022).
- Die **dynamische Programmierung** ergänzt diesen Ansatz, indem sie Teilprobleme speichert und wiederverwendet. Dies ist besonders effektiv, wenn sich ähnliche Taktikfolgen wiederholen oder mehrere Zielobjekte mit vergleichbaren Bedrohungslagen vorliegen.

Die Entscheidung für die Kombination aus einem Greedy-Algorithmus und dynamischer Programmierung bei der Optimierung bzw. Suche nach einer geeigneten Taktik basiert auf mehreren Gründen:

Die Kombination beider Verfahren ermöglicht eine **Balance zwischen Rechenzeit, Speicherbedarf und Planqualität**. In dynamischen, zeitkritischen Einsatzszenarien – wie militärischen Luftoperationen – ist dieser hybride Ansatz besonders vorteilhaft, da er schnelle Reaktionen auf Lageänderungen erlaubt, ohne aufwändige vollständige Neuplanungen durchführen zu müssen (Du et al., 2012).

### 4.1.3 Operative Planung

Das operative Planungsmodul bildet die unterste Ebene des hierarchischen Planungssystems des PAA. Aufbauend auf dem zuvor erstellten taktischen Plan (vgl. 4.1.2) generiert es konkrete Einzelaufgaben für jedes Teammitglied. Ziel ist es, die taktisch definierten Taktiken in ausführbare, zeitlich und ressourcenmäßig abgestimmte Aufgaben zu überführen, die direkt in den Missionsplan übernommen werden können.

*Ablauf der Planerstellung*

Der grundlegende Ablauf zur Erstellung des operativen Plans ist in Abbildung 4-10 dargestellt.

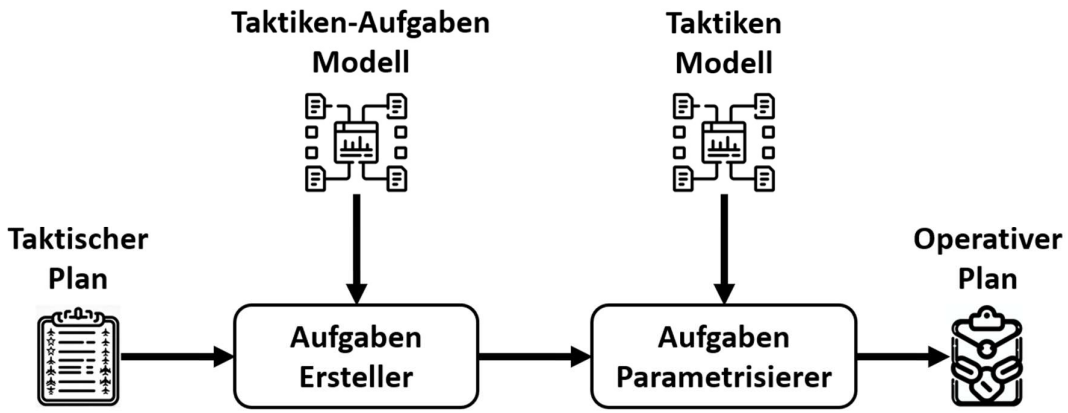



**Abbildung 4-10 Aufbau operatives Planungsmodul**

Die Erstellung erfolgt auf Basis der im taktischen Plan definierten Taktiken. Für jede Taktik werden mithilfe des Taktiken-Aufgaben-Modells (vgl. 4.2.1) die zugehörigen Einzelaufgaben identifiziert. Dieses Modell beschreibt die Struktur und Abfolge der Aufgaben innerhalb einer Taktik, einschließlich ihrer logischen Abhängigkeiten (z. B. sequentiell oder parallel auszuführende Aufgaben).

Anschließend erfolgt die Parametrisierung der Aufgaben. Hierbei werden mithilfe des Taktiken-Modells (vgl. 4.2.2) und der konkreten Zielpositionen relevante Parameter wie:

- Aufgabendauer,
- Flughöhe,
- Ausführungsdistanz,
- Startzeitversatz

festgelegt. Diese Parameter sind entscheidend für die spätere zeitliche Koordination und Ressourcenzuweisung im Plan.

Wie in diesem und den vorangegangen Kapitel bereits erwähnt, verwenden die im Planungssystem erzeugten Aufgaben und Taktiken eine Reihe von Bewertungs- und Entscheidungsmodellen, die im nächsten Abschnitt erläutert werden.

## 4.2 Modelle und Taktikbewertungsmethoden zur Planerstellung und Planbewertung

Zur Auswahl geeigneter Taktiken und zur Optimierung von Planungsentscheidungen greift der PAA auf eine Reihe miteinander verknüpfter Modelle zurück. Diese quantifizieren Risiko, Zeitaufwand und Ressourceneinsatz und ermöglichen so eine objektive Bewertung möglicher Handlungsoptionen. Die Modelle bilden das methodische Rückgrat für die taktische und operative Planerstellung sowie für die Assistenzfunktionen des PAA.

Die Konzeption dieser Modelle ist direkt aus der in Kapitel 3.3 beschriebenen Architektur des PAA abgeleitet. Dort wurden die funktionalen Anforderungen an das Planerstellungs- und Assistenzmodul definiert, die in diesem Kapitel in Form konkreter Bewertungs-/Entscheidungsmodelle und -funktionen operationalisiert werden. Sie bilden die Grundlage des Planungs- und Assistenzsystems des PAA (vgl. 4.1 und 4.3).

Die Modellklassen sind unmittelbar mit der taktischen und operativen Planungsebene verknüpft. Auf der taktischen Ebene werden mithilfe des Taktiken-Modells und der Ressourcenmodelle die für die jeweilige Lage geeigneten Vorgehensweisen hinsichtlich Risiko, Zeit und Ressourceneinsatz bewertet und ausgewählt. Auf der operativen Ebene wird die gewählte Taktik schließlich durch das Taktiken-Aufgaben-Modell in konkrete Einzelaufgaben mit Abhängigkeiten, Parametern und Reihenfolgen überführt. Dieselbe Modellbasis wird nicht nur für die Planerstellung, sondern auch für die Bewertung, Optimierung und Validierung bestehender Pläne im Assistenzsystem verwendet.

Die Modellstruktur folgt einem modularen Aufbau, der eine klare funktionale Trennung bei gleichzeitig enger Verzahnung erlaubt:

- Das Taktiken-Aufgaben-Modell (4.2.1) beschreibt die strukturelle Zusammensetzung und Abfolge von Aufgaben innerhalb einer Taktik. Es definiert, welche Einzelaufgaben (z. B. EA, HARM, SWARM_EA) zu einer Taktik gehören, in welcher Reihenfolge sie ausgeführt werden und ob sie parallel oder sequentiell ablaufen. Dieses Modell bildet die Grundlage für die operative Planung (vgl. Kapitel 4.1.3).
- Das Taktiken-Modell (Kapitel 4.2.2) ergänzt diese Struktur durch eine numerische Parametrisierung. Es enthält konkrete Werte für Aufgabendauern, Startzeit-Offsets, Risiko-Level und Kostenfunktionen und ist essenziell für die taktische Planbewertung und Optimierung (vgl. Kapitel 4.1.2 und 4.2.4).
- Die Ressourcenmodelle (Kapitel 4.2.3) spezifizieren die Verfügbarkeit, den Verbrauch und das Risiko einzelner Ressourcen (z. B. UAVs, Wirkmittel) bei der Durchführung bestimmter Aufgaben oder Taktiken. Sie liefern die Grundlage für die Ressourcenkalkulation und -verteilung im Planungsprozess und ermöglichen eine differenzierte Bewertung der Auswirkungen einzelner Taktiken auf das Gesamtsystem.

Diese drei Modelle sind funktional getrennt, aber eng miteinander verzahnt:

- Was wird getan? → Taktiken-Aufgaben-Modell
- Wie gut ist die Maßnahme? → Taktiken-Modell
- Womit wird sie umgesetzt? → Ressourcenmodelle

Die daraus abgeleiteten Bewertungs- und Optimierungskriterien (Kapitel 4.2.4) ermöglichen es dem PAA, situationsabhängig geeignete Taktiken auszuwählen, Planalternativen zu bewerten und dem Piloten transparente Vorschläge zu unterbreiten oder eigenständig Anpassungen vorzunehmen. Sie kommen sowohl bei der automatisierten Planerstellung (siehe 4.1) als auch bei der dynamischen Assistenzgenerierung (Kapitel 4.3) zum Einsatz.

In ihrer Gesamtheit stellen die hier beschriebenen Modelle die Brücke zwischen der konzeptionellen Architektur (Kapitel 3) und der technischen Umsetzung (Kapitel 4) dar. Sie ermöglichen eine skalierbare, transparente und adaptive Planungsarchitektur, die den Anforderungen komplexer, dynamischer Einsatzszenarien gerecht wird.

### 4.2.1 Taktiken-Aufgaben Modell

Das Taktiken-Aufgaben-Modell ist ein zentrales Element der operativen Planung des PAA und wird im entsprechenden Teilmodul des Planerstellungsmoduls verwendet (vgl. Kapitel 3.3.1 sowie 4.1.3). Es definiert die strukturelle Zusammensetzung und Abfolge von Aufgaben innerhalb einer Taktik und bildet damit die Grundlage für die Generierung konkreter Einzelaufgaben, die im Rahmen der Missionsplanung an die Teammitglieder delegiert werden.

Im Simulator gibt es drei Aufgaben, die an das Team delegiert werden können, um gegen feindliche SAM-Stellungen (vgl. Kapitel 2.3.4) vorzugehen:

- **HARM-Aufgabe:** Ein radargesteuerter Flugkörper wird vom Teammitglied abgefeuert, sobald es in Schussreichweite ist. Diese Flugkörper zielen auf die Radare der SAM-Stellungen und zerstören sie. Während eine HARM im Anflug ist, deaktiviert die SAM-Stellung ihre Radare und kann somit keine Flugobjekte anvisieren und attackieren.
- **EA-Aufgabe:** Teammitglieder bestrahlen SAM-Stellungen mit aktiven elektronischen Störsendern, wodurch die Radarreichweite der SAM-Stellungen verringert wird.
- **SWARM_EA-Aufgabe:** Teammitglieder setzen einen Schwarm von Kleinstdrohnen ein, der die SAM-Stellung anfliegt und deren Radare elektronisch deaktiviert.

Diese drei Aufgabentypen bilden die Bausteine für komplexe Taktiken, die im Rahmen eines Workshops mit Piloten der deutschen Luftwaffe entwickelt wurden. Ziel war es, effektive und realitätsnahe Taktiken zur Bekämpfung potenter SAM-Stellungen zu definieren. Eine grafische Darstellung des daraus resultierenden Modells ist in Abbildung 4-11 dargestellt.

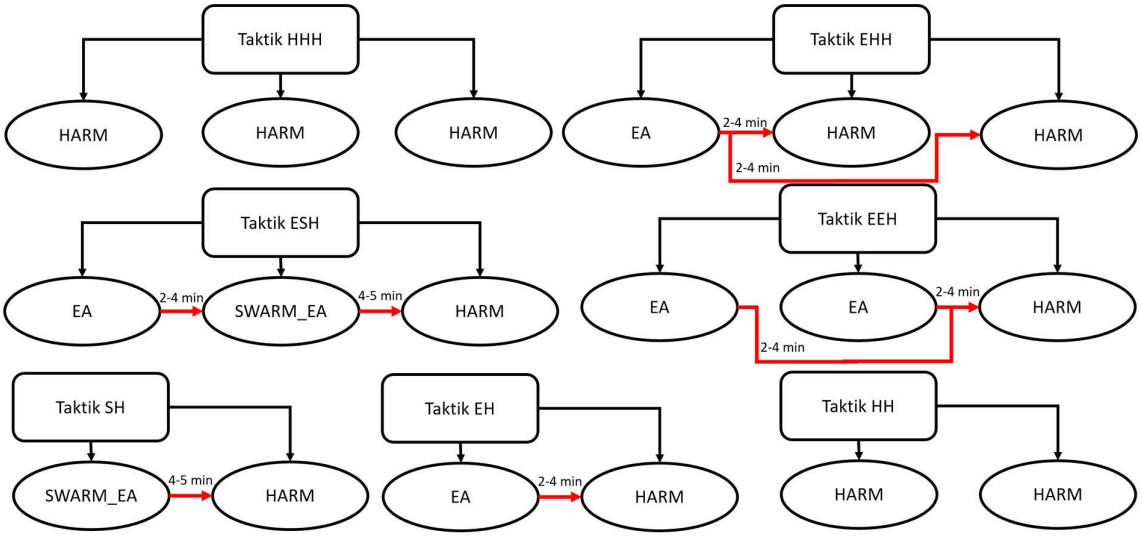



**Abbildung 4-11 Taktiken-Aufgaben Modell**

Insgesamt stehen sieben Taktiken zur Verfügung, die jeweils aus zwei bis drei Aufgaben bestehen. Jede Taktik beinhaltet mindestens eine HARM-Aufgabe zur direkten Bekämpfung der SAM-Stellung. Die Benennung der Taktiken (z. B. „EHH“) gibt Aufschluss über die enthaltenen Aufgaben und deren Reihenfolge: In diesem Fall wird eine EA-Aufgabe an ein Teammitglied delegiert, während zwei HARM-Aufgaben auf weitere Teammitglieder verteilt werden.

Die roten Pfeile zwischen den Aufgaben in Abbildung 4-11 zeigen die Reihenfolge der Ausführung an. Fehlt ein Pfeil, so starten die Aufgaben in der Grundkonfiguration zeitgleich. Zeitangaben über den Pfeilen (z. B. bei der Taktik „EH“) geben an, mit welchem Zeitversatz die Folgeaufgabe nach Beginn der ersten Aufgabe starten soll. Diese Zeitversätze sind notwendig, da z. B. ein Schwarm eine gewisse Flugzeit benötigt, um die SAM-Stellung zu erreichen und deren Radar zu deaktivieren, bevor ein HARM sicher eingesetzt werden kann.

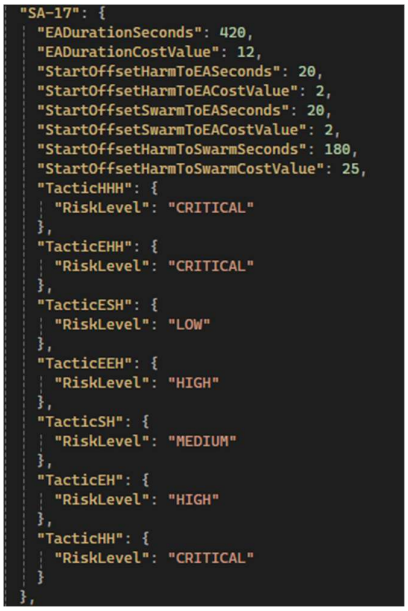
Das Modell ist einer JavaScript Object Notation (JSON)-Datei implementiert. JSON ist ein leichtgewichtiges, textbasiertes Datenformat, das auf Schlüssel-Wert-Paaren basiert (Bourhis et al., 2017; Eldakiky & Du, 2018). Diese Struktur ermöglicht eine einfache Verarbeitung, Erweiterung und Integration in das Planungssystem des PAA. Die Implementierung des Modells im JSON-Format ist in Anhang A zu finden.

Die im Taktiken-Aufgaben-Modell definierten Strukturen werden in den nachfolgenden Kapiteln 4.2.2 (Taktiken-Modell) und 4.2.3 (Ressourcenmodelle) durch numerische Bewertungen und Ressourcenzuordnungen ergänzt. Gemeinsam bilden sie die Grundlage für die taktische Bewertung und die operative Umsetzung der Missionsplanung.

### 4.2.2 Taktiken Modell

Das Taktiken-Modell ergänzt das in Kapitel 4.2.1 beschriebene Taktiken-Aufgaben-Modell um eine numerische Bewertung der Taktiken. Es wird sowohl bei der Erstellung des taktischen Plans als auch bei der operativen Planung eingesetzt (vgl. Kapitel 3.3.1 und 4.1.2 – 4.1.3) und liefert die quantitativen Parameter, die für die Bewertung und Auswahl geeigneter Taktiken erforderlich sind.

Ein Ausschnitt der JSON-Datei des Taktiken-Modells ist in Abbildung 4-12 dargestellt. Das vollständige Modell ist in Anhang C zu sehen.



```
"SA-17": {
  "EADurationSeconds": 420,
  "EADurationCostValue": 12,
  "StartOffsetHarmToEASeconds": 20,
  "StartOffsetHarmToEACostValue": 2,
  "StartOffsetSwarmToEASeconds": 20,
  "StartOffsetSwarmToEACostValue": 2,
  "StartOffsetHarmToSwarmSeconds": 180,
  "StartOffsetHarmToSwarmCostValue": 25,
  "TacticHHH": {
    "RiskLevel": "CRITICAL"
  },
  "TacticEHH": {
    "RiskLevel": "CRITICAL"
  },
  "TacticESH": {
    "RiskLevel": "LOW"
  },
  "TacticEEH": {
    "RiskLevel": "HIGH"
  },
  "TacticSH": {
    "RiskLevel": "MEDIUM"
  },
  "TacticEH": {
    "RiskLevel": "HIGH"
  },
  "TacticHH": {
    "RiskLevel": "CRITICAL"
  }
},
```


**Abbildung 4-12 Ausschnitt der JSON-Datei des Taktiken Modells**

Das Modell enthält für jede im System bekannte SAM-Stellung:

- die Dauer der EA-Aufgabe, abhängig vom Erkennungs- und Schussradius der Stellung (größere Stellungen erfordern längere Störzeiten),
- die Zeit-Offsets zwischen aufeinanderfolgenden Aufgaben innerhalb einer Taktik (z. B. zwischen EA und HARM/SWARM_EA), wie sie bereits im Taktiken-Aufgaben-Modell (Kapitel 4.2.1) strukturell definiert wurden,
- sowie eine Risikoabschätzung (RiskLevel), die das Gefährdungspotenzial für das Team bei Durchführung der jeweiligen Taktik quantifiziert.

Die Parametrisierung basiert auf empirischen Messungen innerhalb der Simulationsumgebung: Für jede SAM-Stellung wurden die Zeiten erfasst, die ein UAV benötigt, um einen Schwarm oder eine HARM auszubringen. Die Zeitdifferenz zwischen SWARM_EA und HARM wurde ebenfalls experimentell bestimmt, um realistische Zeitversätze zu modellieren.

Zur Ermittlung des RiskLevels wurden die Taktiken in vollautomatisierten Simulationen gegen jede SAM-Stellung getestet. Dabei wurde erfasst, ob das Ziel erfolgreich bekämpft wurde und ob Teammitglieder dabei gefährdet oder abgeschossen wurden. Die daraus abgeleiteten Risikoindikatoren fließen direkt in die taktische Bewertung und Assistenzlogik ein (vgl. Kapitel 4.2.4).

### 4.2.3 Ressourcen Modelle

Die Ressourcenmodelle ergänzen das Taktiken-Modell um eine ressourcenbezogene Bewertung der Taktiken. Aufbauend auf dem Taktiken-Aufgaben-Modell (Kapitel 4.2.1)

wurden zwei Modelle entwickelt, die sowohl die Verfügbarkeit als auch die Kosten des Ressourceneinsatzes abbilden.

Das erste Modell beschreibt für jede Taktik:

- die Anzahl der zur Durchführung benötigten Aufgaben,
- die dafür erforderlichen freien Ressourcen,
- sowie die Anzahl der unmittelbar gefährdeten UAVs, also jener Teammitglieder, die sich zur Ausführung der Aufgabe in den Erkennungs- oder Schussbereich einer SAM-Stellung begeben müssen.

Ein Ausschnitt dieses Modells ist in Abbildung 4-13 dargestellt, die vollständige Implementierung befindet sich in Anhang B.

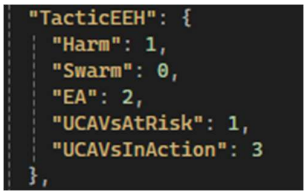



**Abbildung 4-13 Ausschnitt eines der Ressourcen Modelle**

Beispiel: Für die Taktik „EEH“ sind zwei EA-Aufgaben und eine HARM-Aufgabe erforderlich. Nur das UAV mit der HARM-Aufgabe muss sich in den Gefahrenbereich begeben, sodass **ein UAV unmittelbar gefährdet** ist, aber **drei UAVs insgesamt** zur Durchführung benötigt werden.

Das zweite Ressourcenmodell (siehe Abbildung 4-14) ergänzt diese Struktur um:

- Zeitkosten für HARM- und SWARM-Aufgaben (EA-Zeiten sind im Taktiken-Modell enthalten),
- Kostenwerte für den Ressourceneinsatz je Aufgabentyp,
- sowie Risikokosten, die in vier Kategorien unterteilt sind: Kritisch (CRITICAL), Hoch (HIGH), Mittel (MEDIUM) und Gering (LOW).




**Abbildung 4-14 Ressourcen- und Risikolevelkosten Modell**

Diese Modelle werden sowohl bei der Planerstellung (vgl. Kapitel 4.1) als auch bei der Taktikbewertung (vgl. Kapitel 4.2.4) und Assistenzgenerierung (vgl. Kapitel 4.3) verwendet. Sie ermöglichen eine differenzierte Bewertung der Auswirkungen einzelner Taktiken auf das

Gesamtsystem und tragen zur Optimierung von Ressourceneinsatz, Missionssicherheit und Effizienz bei.

### 4.2.4 Taktikbewertungs- und Optimierungskriterien

Zur Bewertung und Auswahl geeigneter Taktiken greift der PAA auf eine Kombination aus strukturellen, numerischen und ressourcenbezogenen Modellen zurück (vgl. Kapitel 4.2.1 – 4.2.3). Die daraus abgeleiteten Bewertungsgrößen ermöglichen eine objektive und vergleichbare Einschätzung möglicher Handlungsoptionen. Diese Bewertungen fließen sowohl in die automatisierte Planerstellung (vgl. Kapitel 4.1) als auch in die Assistenzgenerierung (vgl. Kapitel 4.3) ein.

Die Bewertung erfolgt entlang dreier Hauptdimensionen:

- **Risikostufe (R):** Die Risikostufe quantifiziert die potenzielle Gefährdung des Teams bei Durchführung einer Taktik. Sie ergibt sich aus:
  - der Anzahl der direkt bedrohten Teammitglieder (vgl. "UCAVsAtRisk" in Abbildung 4-13)
  - und den Risiko-Level der jeweiligen Taktik für die spezifische SAM-Stellung (vgl. "RiskLevel" in Abbildung 4-12).

  Die Risikostufe wird berechnet als:

  $$Risikostufe: R = \#Bedrohte\ Teammitglieder * RiskLevel$$

  **Beispiel**: Für eine SA-17-Stellung mit deinem bedrohten UAV und einem RiskLevel von 100 ergibt sich:

  $$R = 1 * 100 = 100$$

- **Zeiteinsatzkosten (T):** Die Zeiteinsatzkosten erfassen die zeitliche Belastung des Teams durch eine Taktik. Sie setzen sich zusammen aus:
  - Der Gesamtdauer der Aufgaben (z.B. „EADurationCostValue“ in Abbildung 4-12),
  - Und den Zeitversätzen zwischen den Aufgaben (z.B. „StartOffsetHarmToEACostValue“ in Abbildung 4-12).

  Die Formel lautet:

  $$Zeiteinsatzkosten: T = \sum Taskdauer + \sum Zeit\ zwischen\ Aufgaben$$

  **Beispiel**: Für die Taktik EEH mit zwei EA-Aufgaben (je 12s), einem Zeitversatz von 1 s und 2 s ergibt sich:

  $$T = 12 + 12 + 1 + 2 = 27$$

- **Ressourceneinsatzkosten (W):** Diese Größe bewertet den materiellen Aufwand einer Taktik. Sie ergibt sich aus:
  - der Anzahl eingesetzter Ressourcen je Typ,

- multipliziert mit dem jeweiligen Ressourcenwert (vgl. Abbildung 4-13 und Abbildung 4-14).

Die Formel lautet:

$$Ressourceneinsatzkosten: W = \sum \#Ressourcenart + Ressourcenwert$$

**Beispiel**: Für die Taktik EEH mit zwei EA-Aufgaben (Wert = 1) und einer HARM (Wert = 5):

$$W = 2 * 1 + 1 * 5 = 7$$

- **Gesamtkostenfunktion (K):**
  Die drei Einzelwerte werden zu einem Gesamtkostenwert zusammengeführt:

$$Kosten: K = R + T + W$$

**Beispiel:** Mit den obigen Werten ergibt sich für die Taktik EEH gegen eine SA-17:

$$K = 100 + 27 + 7 = 134$$

Diese Bewertungsfunktion erlaubt es dem PAA, Taktiken situationsabhängig zu vergleichen, zu priorisieren und bei Bedarf automatisch zu optimieren. Die Einzelwerte (R, T, W) können dabei auch gewichtet oder kontextabhängig angepasst werden, etwa bei missionsspezifischen Prioritäten (z. B. Zeitdruck vs. Ressourcenschonung).

Die Bewertungslogik wird sowohl bei der initialen Planerstellung (vgl. Kapitel 4.1) als auch bei der dynamischen Plananpassung im Rahmen der Assistenzfunktionen (vgl. Kapitel 4.3) verwendet.

## 4.3 Assistenzsystem des PAA

In diesem Abschnitt wird das Assistenzsystem des PAA detailliert vorgestellt. Es nutzt die hier beschriebenen Modelle und Bewertungsgrößen, um situationsabhängig Unterstützungsbedarf zu erkennen, geeignete Plananpassungen vorzuschlagen oder automatisch durchzuführen und diese transparent mit dem Piloten zu kommunizieren. Damit wird die Brücke geschlagen zwischen der modellbasierten Planbewertung und der interaktiven Mensch-Maschine-Kooperation im Cockpit. Die Darstellung und Implementierung der Assistenzdialoge, Handlungsoptionen und Beispiele der Planadaptionsergebnisse werden in Kapitel 6.2 beschrieben.

### 4.3.1 Assistenz auf Grundlage von Umgebungsänderung

Ein zentrales Merkmal des PAA ist seine Fähigkeit, auf dynamische Veränderungen in der Einsatzumgebung zu reagieren. Aufbauend auf den in Kapitel 4.2 beschriebenen Bewertungsmodellen und den in Kapitel 3.3.2 konzipierten Assistenzmechanismen, überprüft das Assistenzmodul kontinuierlich die aktuelle Lage und leitet daraus situationsabhängige Unterstützungsmaßnahmen ab. Dieses Kapitel beschreibt die Abläufe, die der PAA bei der Erkennung und Verarbeitung von Umgebungsänderungen durchläuft, um dem Piloten adaptive und kontextgerechte Assistenz anzubieten.

Abbildung 4-15 zeigt die einzelnen Schritte, die der PAA zur Generierung von Assistenzmeldungen bei Lageänderungen durchführt.

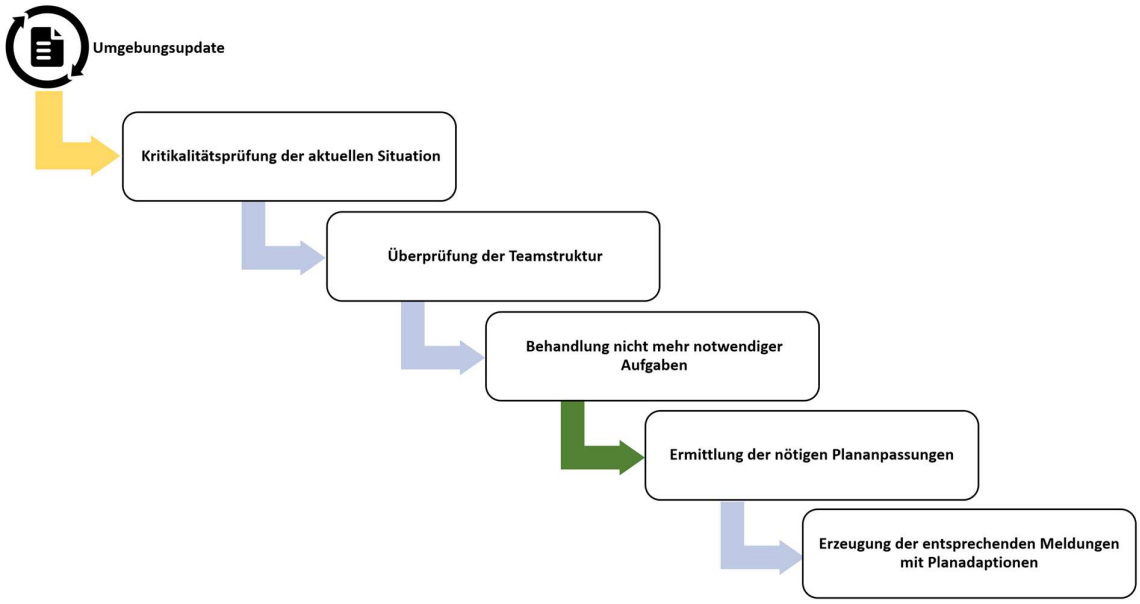



**Abbildung 4-15 Überprüfungen zur Assistenzgenerierung durch den PAA basierend auf Umgebungsupdates**

Sobald der PAA eine Änderung in der Umgebung erkennt, durchläuft er drei zentrale Prüfprozesse:

1. Kritikalitätsbewertung der aktuellen Situation
2. Analyse der Teamstruktur
3. Überprüfung auf obsolet gewordene Aufgaben im Missionsplan

Wenn eine dieser Prüfungen Handlungsbedarf ergibt, generiert der PAA entsprechende Plananpassungen und kommuniziert diese über das Cockpitinterface an den Piloten (vgl. Kapitel 6.2 zur Darstellung der Assistenzdialoge).

- **Kritikalitätsprüfung der aktuellen Situation:**
  Die Einschätzung der Kritikalität erfolgt auf Basis der Distanz eines Teammitglieds zur Erkennungs- bzw. Schussreichweite einer feindlichen SAM-Stellung. Die zugrunde liegende Logik ist in Tabelle 4-1 dargestellt und orientiert sich an der Analyse situativer Bedrohungslagen nach Bautz (Bautz, 2023)

**Tabelle 4-1 Kritikalitätsstufen in Abhängigkeit der Distanz eines Teammitglieds (d) zu der Erkennungs-/Schussreichweite einer SAM-Stellung (r)**

| Kritikalitätsstufe | Wertebereich |
|---|---|
| Hoch | d < r |
| Niedrig | d > r |

Abbildung 4-16 illustriert ein Beispiel zur Bestimmung der Kitikalität.

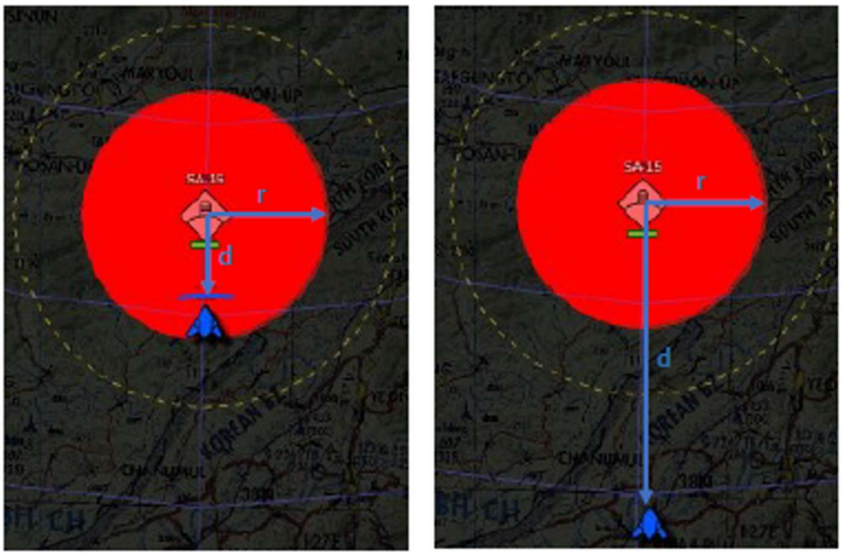



**Abbildung 4-16 Beispielbild zur Bestimmung der Kritikalität der Situation**

Eine hohe Kritikalität liegt vor, wenn sich ein Teammitglied innerhalb der Reichweite einer aktiven SAM-Stellung befindet. Dies kann in zwei Fällen auftreten:

1. Das Teammitglied fliegt auf dem Weg zur nächsten Aufgabe in den Gefahrenbereich.
2. Eine zuvor unbekannte SAM-Stellung wird plötzlich sichtbar und bedroht unmittelbar ein Teammitglied.

In solchen Fällen hat der Schutz des bedrohten Teammitglieds oberste Priorität – unabhängig davon, ob das feindliche Objekt für das Missionsziel relevant ist. Die schnellste Reaktion erfolgt in der Regel durch das automatische Einplanen einer HARM-Aufgabe (vgl. Kapitel 2.3.4 und (Bolkcom, 2005)) , um die Bedrohung temporär auszuschalten und dem Teammitglied ein Ausweichen zu ermöglichen.

Situationen mit niedriger Kritikalität erfordern kein sofortiges Eingreifen. Sie werden im Rahmen der zyklischen Planüberprüfung berücksichtigt (vgl. Kapitel 4.3.2).

- **Überprüfung der Teamstruktur**
  Neben der Lagebewertung analysiert der PAA auch Veränderungen innerhalb des Teams, die sich auf die Planumsetzung auswirken können. Zwei Szenarien sind dabei relevant:
  1. Ausfall eines Teammitglieds: Wird ein UAV durch feindliche Einwirkung neutralisiert, prüft der PAA, ob diesem noch Aufgaben im Missionsplan zugewiesen sind. Falls ja, werden diese Aufgaben automatisch neu verteilt und entsprechende Dialoge im Cockpit angezeigt. Ist das UAV nicht mehr aktiv beteiligt, wird es aus der Anzeige entfernt.
  2. Ressourcenausfall: Hat ein Teammitglied durch Selbstschutzmaßnahmen (z. B. Täuschkörper) kritische Ressourcen verloren, sodass es seine Aufgaben nicht mehr erfüllen kann, informiert der PAA den Piloten und schlägt eine Plananpassung vor.

- **Löschen nicht mehr notwendiger Aufgaben**

Wenn sich der Status eines gegnerischen Objekts ändert – etwa durch erfolgreiche Bekämpfung oder weil es aus dem Lagebild verschwindet – überprüft der PAA, ob im Missionsplan noch Aufgaben auf dieses Objekt referenzieren. Ist dies der Fall, erstellt der PAA Anpassungsvorschläge, um unnötige Aufgaben zu entfernen und Ressourcen freizugeben. Die Kommunikation dieser Vorschläge erfolgt über das Assistenzinterface im Cockpit (vgl. Kapitel 6.2.3).

### 4.3.2 Assistenz auf Grundlage von Planänderungen und zyklischer Planüberprüfung

Neben der reaktiven Assistenz bei Umgebungsänderungen (vgl. Kapitel 4.3.1) bietet der PAA auch Unterstützung bei Planänderungen durch den Bediener sowie im Rahmen einer zyklischen Überprüfung des Missionsplans. Ziel ist es, den Plan kontinuierlich auf Konsistenz, Zielorientierung und Effizienz zu prüfen und gegebenenfalls automatisch oder dialoggestützt anzupassen.

Abbildung 4-17 zeigt die zentralen Prüfpunkte, die der PAA bei Planänderungen oder zyklischen Überprüfungen durchläuft, um potenzielle Plananpassungen oder Optimierungen zu identifizieren.

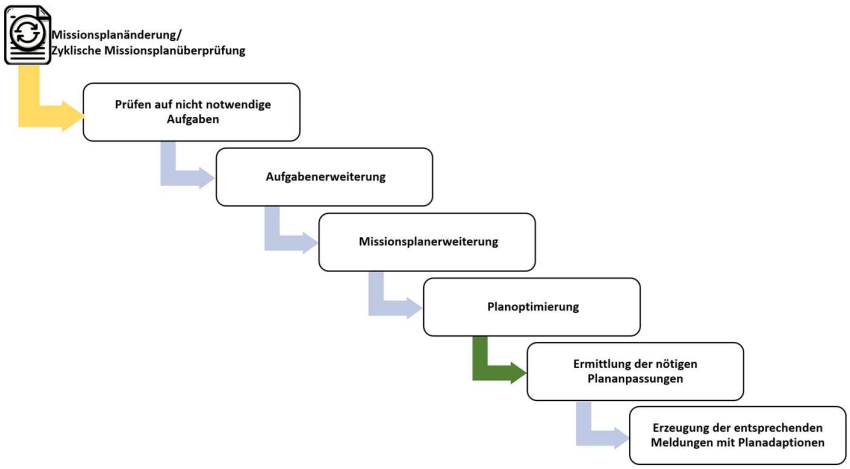



**Abbildung 4-17 Überprüfungen zur Assistenzgenerierung durch den PAA aufgrund von Missionsplanänderungen und zyklischen Missionsplanüberprüfung**

Die folgenden Abschnitte beschreiben die vier Hauptmechanismen, mit denen der PAA auf Planänderungen reagiert oder Optimierungspotenziale erkennt:

- **Behandlung nicht notwendiger Aufgaben**
  Wenn der Bediener Aufgaben in den Missionsplan einfügt, prüft der PAA, ob diese Aufgaben zur Erreichung des strategischen Ziels erforderlich sind. Dazu wird das Zielobjekt der Aufgabe mit dem strategischen Plan abgeglichen (vgl. Kapitel 4.1.1). Ist das Zielobjekt dort nicht enthalten, informiert der PAA den Bediener über die fehlende Relevanz und schlägt eine entsprechende Plananpassung vor.

- **Aufgabenerweiterung bei nicht optimaler Aufgabenauswahl**
  Abbildung 4-18 zeigt das Ablaufdiagramm bei dieser Aufgabenerweiterung.

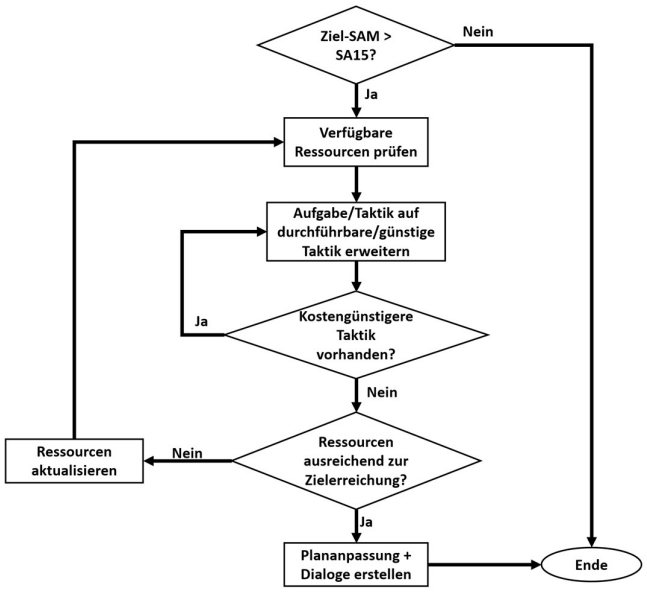



**Abbildung 4-18 Ablaufdiagramm zur Aufgabenerweiterung bei nicht optimaler Aufgabenauswahl**

Fügt der Bediener eine isolierte Aufgabe zur Bekämpfung einer potenten SAM-Stellung hinzu (vgl. Tabelle 2-3), prüft der PAA zunächst die Verfügbarkeit der Ressourcen. Anschließend wird die Aufgabe mithilfe des Taktiken-Modells (vgl. Kapitel 4.2.2) auf eine vollständige, durchführbare Taktik erweitert. Der PAA bewertet daraufhin, ob eine kostengünstigere Alternative existiert (vgl. Bewertungslogik in Kapitel 4.2.4). Falls ja, wird diese vorgeschlagen. Ist keine bessere Option verfügbar, prüft der PAA, ob die gewählte Taktik mit den verbleibenden Ressourcen durchführbar ist. Falls nicht, werden Ressourcen „reserviert“ und der Prozess iterativ wiederholt, bis eine geeignete Taktik gefunden ist. Die resultierende Plananpassung wird dem Bediener im Cockpit angezeigt (vgl. Kapitel 6.2.3).

- **Planerweiterung zur Missionszielerreichung**
  Der PAA überprüft regelmäßig, ob der aktuelle Plan des Bedieners alle Schritte des strategischen Plans abdeckt. Fehlt ein Schritt, wird zunächst die verbleibende Zeit bis zur Zielerreichung geprüft. Ist noch ausreichend Zeit vorhanden, wird ein Hinweis auf das nächste Ziel generiert. Ist die Zeit knapp, wird automatisch eine geeignete Taktik ausgewählt und vorgeschlagen. Abbildung 4-19 zeigt den Ablauf dieser Planerweiterung.

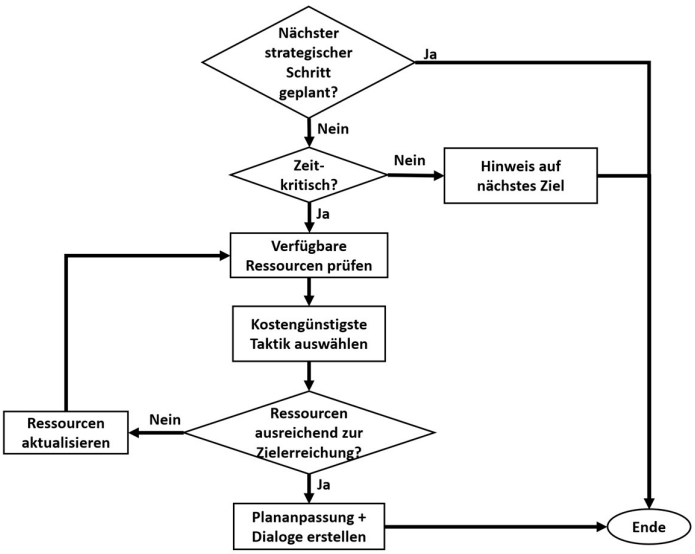



**Abbildung 4-19 Ablaufdiagramm zur Planerweiterung zur Missionszielerreichung**

Zunächst prüft der PAA, ob der nächste strategische Schritt bereits im Missionsplan des Bedieners berücksichtigt wird. Dabei vergleicht er die Zielobjekte der Aufgaben im Plan des Bedieners mit denen des strategischen Plans. Ein Beispiel für einen strategischen Plan, auf dessen Basis diese Prüfung erfolgt, ist in Abbildung 4-20 dargestellt.

| |
|---|
| MOVE BLUEFORCE S7_SA11_ENGAGE |
| SUPPRESS ENEMY S7_SA_11 |
| MOVE BLUEFORC S9_SA10A_ENGAGE |
| SUPPRESS_ENEMY S9_SA10A |
| MOVE BLUEFORCE T1 |
| VERIFY_TARGET_AS_HOSTILE T1 |
| MOVE BLUEFORCE T2 |
| VERIFY_TARGET_AS_HOSTILE TARGET T2 |

**Abbildung 4-20 Beispiel strategischer Plan**

Die Auswahl der Taktik erfolgt unter Berücksichtigung der verbleibenden Ressourcen, der Effektdauer und der Gesamtkosten (vgl. Kapitel 4.2.4). Die resultierenden Plananpassungen werden dem Bediener über das Assistenzinterface kommuniziert.

- **Planoptimierungen**
  Der PAA unterscheidet zwei Arten der Planoptimierung:
  - Optimierung der Gesamtkosten
    Ziel ist es, den Plan hinsichtlich Ressourceneinsatz, Risiko und Zeitaufwand zu verbessern. Die Optimierung erfolgt auf der taktischen Ebene, da hier die Bewertungsmodelle (vgl. Kapitel 4.2.2 – 4.2.4) am wirksamsten greifen. Abbildung 4-21 zeigt den Ablauf dieser Optimierung.

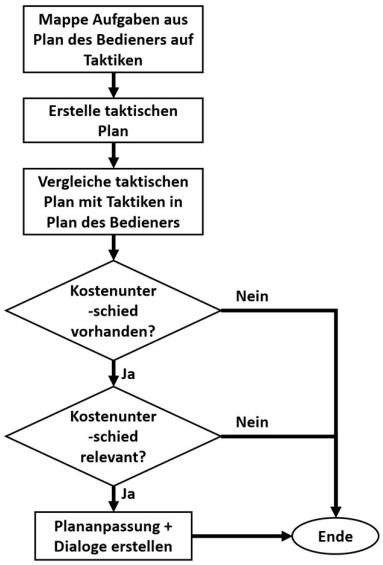



**Abbildung 4-21 Ablaufdiagramm zur Kostenoptimierung des Plans des Bedieners**

Zunächst werden die Aufgaben im Plan des Bedieners auf Taktiken gemappt. Anschließend wird ein taktischer Referenzplan durch den PAA erstellt und mit dem Bedienerplan verglichen. Bei signifikanten Kostenunterschieden werden entsprechende Optimierungsvorschläge generiert und im Cockpit angezeigt.

- Optimierung auf Zielerreichung
  Hierbei wird geprüft, ob das Missionsziel mit dem aktuellen Plan **zeitgerecht** erreicht werden kann. Ist dies nicht der Fall, versucht der PAA, durch Auswahl schnellerer Taktiken eine rechtzeitige Zielerreichung zu ermöglichen – unter Berücksichtigung des akzeptablen Risikos.
  Abbildung 4-22 zeigt den Ablauf dieser Optimierung.

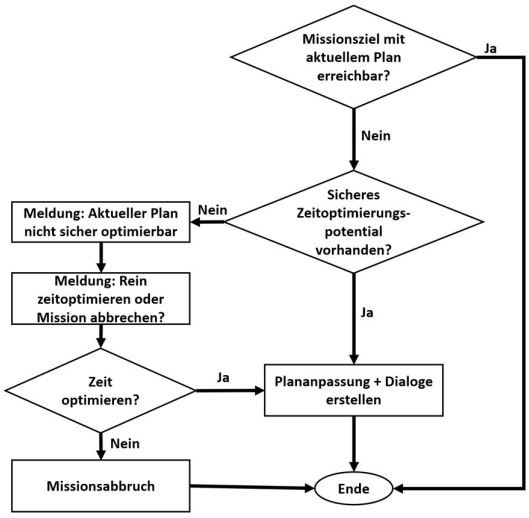



**Abbildung 4-22 Ablaufdiagramm zur Planoptimierung des Plans des Bedieners zur Missionszielerreichung**

Falls keine sichere Optimierung möglich ist, wird der Bediener informiert und kann entscheiden, ob er eine risikobehaftete Zeitoptimierung zulässt oder die

Mission abbricht. Im ersten Fall werden die entsprechenden Plananpassungen automatisch generiert und angezeigt.

## 4.4 Implementierung des Scheduler

Der **Scheduler** ist zwar kein direkter Bestandteil des PAA, übernimmt jedoch eine zentrale Rolle im erweiterten Arbeitssystem (vgl. Kapitel 3.2.5, Abbildung 3-7). Er ist verantwortlich für die finale **Ressourcenzuweisung** und die **zeitliche Optimierung** der Aufgabenverteilung im Team. Dabei berücksichtigt er verfügbare Ressourcen, operative Rahmenbedingungen wie Flugzeiten und Distanzen und überführt strategische sowie taktische Planungen in realisierbare, zeitlich abgestimmte Missionspläne. Der Ablauf von der Anfrage bis zum fertigen Plan ist in Abbildung 4-23 dargestellt.

Die ursprüngliche Scheduler-Konzeption basiert auf den Vorarbeiten von Felix Heilemann, der einen Ansatz zur zeitlichen und personellen Zuweisung delegierter Einzelaufgaben in einem rein iterativen Planungsprozess beschrieben hat (Heilemann, 2022). Aufbauend auf dieser konzeptionellen Grundlage wurde der Scheduler im Rahmen der vorliegenden Arbeit für das hierarchische Planungssystem des PAA weitgehend neu implementiert und funktional deutlich erweitert. Insbesondere wurde die Delegation von einer reinen Task-Ebene auf Taktik- und Missionsebene ausgedehnt. Darüber hinaus verarbeitet der Scheduler nicht mehr nur manuell erzeugte Einzelaufgaben, sondern auch automatisch aus der hierarchischen Planung abgeleitete Aufgabenstrukturen. Der wesentliche Beitrag dieser Arbeit liegt damit in der Neuimplementierung und Erweiterung des ursprünglichen Scheduler-Ansatzes zu einer durchgängigen hybriden Missionsplanung über mehrere Planungsebenen.

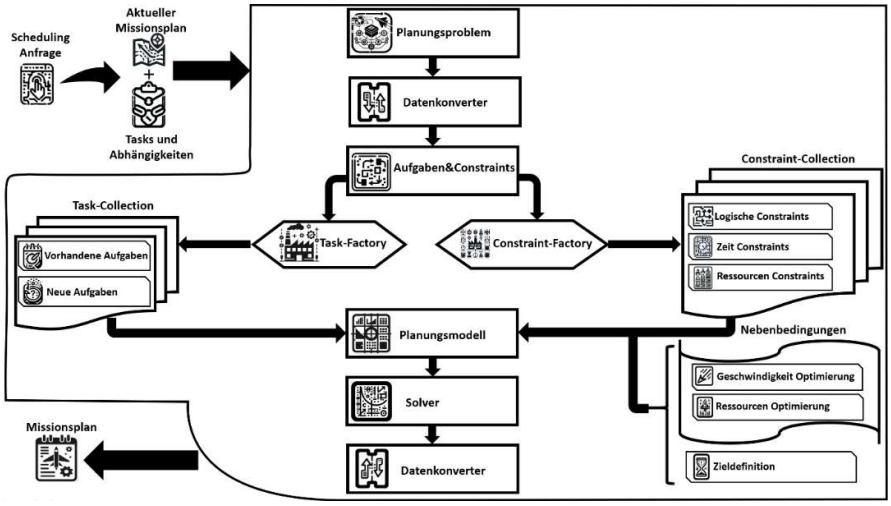



**Abbildung 4-23 Aufbau Scheduler**

Bei einer Anfrage an den Scheduler, unabhängig davon, ob sie vom Bediener oder dem PAA gestellt wird, erstellt dieser eine Kopie des aktuellen Missionsplans. Diese Kopie wird zusammen mit den zu planenden Aufgaben und deren Constraints an den Scheduler übermittelt. Der Scheduler durchläuft anschließend acht Hauptprozesse, die sich in diverse Unterprozesse gliedern. Neben der Konvertierung und Erstellung von Daten, um diese für den verwendeten CPLEX Optimizer verständlich zu machen, kommen auch verschiedene interne CPLEX-Funktionen zum Einsatz.

### 4.4.1 Erstellung des Planungsproblems und Datenkonvertierung

Um einen neuen Plan zu erstellen, der sowohl bestehende als auch neu zu planende Aufgaben umfasst, definiert der Scheduler zunächst ein vollständiges **Planungsproblem**. Dieses beinhaltet:

- Alle bereits im Plan enthaltenen Aufgaben mit ihren Constraints
- Bekannte Objekte im Einsatzgebiet und deren aktueller Zustand
- Verfügbare Teammitglieder und deren spezifische Ressourcen
- Neue Aufgaben mit ihren Einschränkungen und ggf. Vorabzuweisungen

Diese Informationen werden anschließend durch einen **Datenkonverter** in die von **IBM CPLEX Optimizer** benötigten Formate überführt. CPLEX ist ein leistungsfähiger Optimierungssolver, der zur Lösung komplexer kombinatorischer Probleme eingesetzt wird (IBM Corp, 2015).

Die konvertierten Daten – insbesondere Aufgaben und Constraints – dienen als Eingabe für die **Task-Factory** und **Constraint-Factory**, die das Planungsmodell weiter strukturieren und für die Optimierung vorbereiten.

### 4.4.2 Task Collection

Die **Task-Factory** (siehe Abbildung 4-23) erstellt die sogenannte **Task Collection** (vgl. Abbildung 4-24). Sie umfasst:.

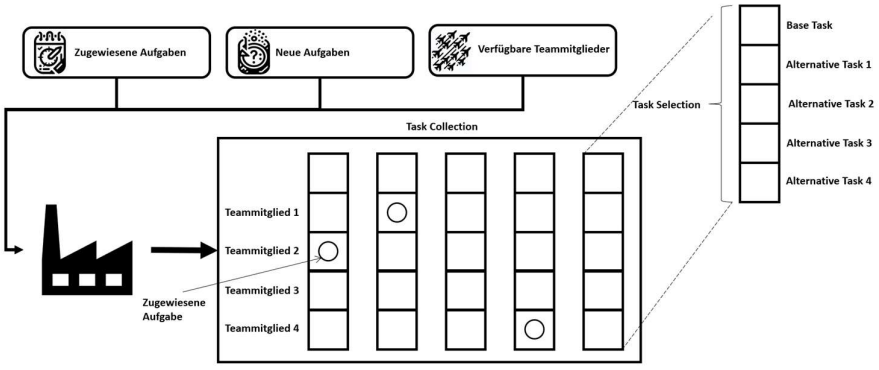



**Abbildung 4-24 Erstellung und Aufbau der Task Collection**

- Bereits eingeplante Aufgaben.
- Noch zuzuweisende Aufgaben.
- Verfügbare Teammitglieder.

Jede Aufgabe wird als **Task Selection** dargestellt, bestehend aus einer **Base Task** und mehreren **Alternative Tasks**. Letztere repräsentieren verschiedene Ausführungsoptionen durch unterschiedliche Teammitglieder. Bereits eingeplante Aufgaben sind innerhalb der Task Selection markiert. Die Task Collection bildet die Grundlage für die Auswahl durch den Solver, der entscheidet, welche Alternative Task welchem Teammitglied zugewiesen wird.

### 4.4.3 Constraint Collection

Die **Constraint Collection** umfasst drei zentrale Typen von Einschränkungen, die für das Planungsmodell entscheidend sind. Sie werden vom Solver genutzt, um die Zuweisung der Alternative Tasks zu steuern und den finalen Plan zu erstellen.

*Logische Constraints*

Diese definieren die zeitliche Abfolge von Aufgaben und mögliche Verzögerungen zwischen ihnen (IBM Corp, 2015):

- **Start before End**: Es muss eine Mindestverzögerung zwischen dem Beginn von Aufgabe a und dem Ende von Aufgabe b geben. Die Regel lautet:
  $$start(a) + delay \leq end(b)$$

- **End before End**: Zwischen dem Ende von Aufgabe a und dem Ende von Aufgabe b muss mindestens die angegebene Zeitspanne vergehen. Es gilt:
  $$end(a) + delay \leq end(b)$$

- **End before Start**: Zwischen dem Ende von Aufgabe a und dem Beginn von Aufgabe b muss mindestens die angegebene Zeitspanne vergehen. Die Regel lautet:
  $$end(a) + delay \leq start(b)$$

- **End at End**: Diese Einschränkung erzwingt eine spezifische Verzögerung zwischen dem Ende von Aufgabe a und dem Ende von Aufgabe b, indem Gleichheit gefordert wird:
  $$end(a) + delay == end(b)$$

- **Start at Start**: Diese Regel erzwingt, dass der Beginn von Aufgabe a und der Beginn von Aufgabe b durch genau die angegebene Verzögerung getrennt sind, indem Gleichheit gefordert wird:
  $$start(a) + delay == start(b)$$

- **Start before Start**: Es wird erzwungen, dass zwischen dem Beginn von Aufgabe a und dem Beginn von Aufgabe b mindestens die angegebene Verzögerung liegen muss. Die Bedingung hierfür ist:
  $$start(a) + delay \leq start(b)$$

Diese Constraints werden in der CPLEX-Klasse **IloConstraint** gespeichert und definieren die zulässigen Bedingungen im Lösungsraum.(IBM Corp, 2015).

*Zeit Constraints*

Zeit-Constraints modellieren Mindestabstände zwischen Aufgaben. Grundlage ist eine **Distanzmatrix**, die die Entfernungen zwischen Teammitgliedern und Zielpunkten enthält. Daraus wird eine **Transitions-Matrix** berechnet, die die benötigten Flugzeiten bei gegebener

Geschwindigkeit abbildet. Diese Matrix wird zur Definition von IloNoOverlap-Constraints verwendet, die sicherstellen, dass sich Aufgaben zeitlich nicht überschneiden.

*Ressourcen Constraints*

Diese stellen sicher, dass Aufgaben nur von Teammitgliedern mit ausreichenden Ressourcen übernommen werden. Die Klasse **IloCumulFunctionExpr** bildet dabei Ressourcennutzung über die Zeit ab. Sie aggregiert Beiträge von Aufgabenintervallen und stellt sicher, dass Ressourcen nicht überbeansprucht werden.

### 4.4.4 Zielfunktion und Nebenbedingungen

*Zielfunktion*

Ziel des Planungsmodells ist die **Minimierung der Gesamtendzeit** aller Aufgaben unter Berücksichtigung bestehender Aufgaben und verfügbarer Ressourcen. Diese Optimierung hat höchste Priorität.

*Optionale Optimierungen*

Diese werden zusätzlich berücksichtigt, können aber bei Bedarf gelockert oder deaktiviert werden:

- **Geschwindigkeitsoptimierung:** Minimierung des Treibstoffverbrauchs durch Optimierung der Fluggeschwindigkeit im Bereich von 400–590 Knoten. Die Transitions-Matrix wird für jeden Geschwindigkeitswert angepasst.
- **Ressourcenoptimierung:** Gleichmäßige Verteilung der verbleibenden Ressourcen über alle Teammitglieder, um Überlastung einzelner Einheiten zu vermeiden.

### 4.4.5 Planungsmodell

Das vollständige Planungsmodell wird in der Klasse `IloModel` zusammengeführt. Diese enthält:

- Die **Task Collection.**
- Die **Constraint Collection.**
- Die **Zielfunktion.**

IloModel fungiert als Container für alle Komponenten des Optimierungsproblems: Entscheidungsvariablen, Constraints und Zielgrößen (IBM Corp, 2015).

### 4.4.6 Solver

Der Solver verarbeitet das definierte Modell mithilfe der mathematischen Methoden des IBM CPLEX Optimizers. Er weist Aufgaben jenen Teammitgliedern zu, die sie am effizientesten und ressourcenschonendsten ausführen können – z. B. mit minimaler Fluggeschwindigkeit zur Reduktion des Treibstoffverbrauchs. Nach erfolgreicher Lösung wird das Ergebnis in ein für das Gesamtsystem verständliches Format überführt und als ausführbarer Plan bereitgestellt.

# 5 Experimentelle Validierung der Planungsfähigkeiten des Planungsassistenzagenten

Zur Beantwortung der ersten Forschungsfrage aus Kapitel 1.3 – **„Mit welchen technischen Methoden kann ein MIP-Agent für komplexe und hochdynamische MUM-T Luftkampf-Szenarien konzipiert und umgesetzt werden?“** – wurde ein speziell abgestimmtes Experiment durchgeführt. Der Fokus lag ausschließlich auf dem **Planerstellungsmodul** des PAA. Ziel war es zu prüfen, ob der PAA in der Lage ist, **vollständige, klare, effiziente und zuverlässige Missionspläne** zu erstellen, die die vorgegebenen Ziele erfüllen.

## 5.1 Experimentalkampagne

Das Experiment wurde im Rahmen der vom **Kommando Luftwaffe** beauftragten Studie *„Operative Forderung Cockpit-Konfigurationen für Multi-UCAV Fighter Missionen“* (OpFoCo) durchgeführt. Die **Experimentalkampagne** erstreckte sich über fünf Wochen im November und Dezember 2023. Pro Woche nahmen zwei erfahrene Luftwaffenpiloten teil. Neben den PAA-Experimenten (Kapitel 5 und 6) wurden auch weitere Studien im Rahmen des Projekts sowie Forschungsarbeiten anderer IFS-FMFF Mitarbeitender durchgeführt. Der typische Ablauf einer Experimentalwoche ist in Abbildung 5-1 dargestellt.

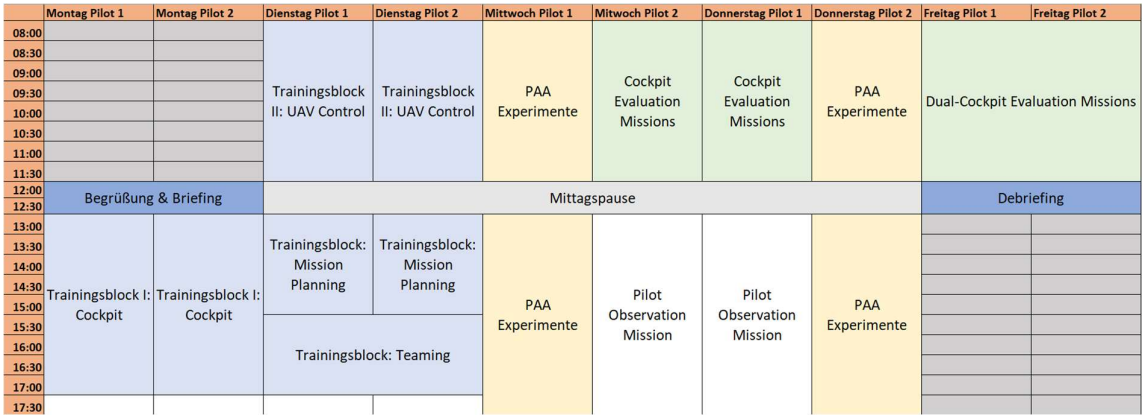



**Abbildung 5-1 Zeitplan einer Experimentalwoche im Rahmen der Experimentalkampagne**

Die Piloten reisten montags an und erhielten nach einer Einführung ein intensives **Training** (12 Stunden) zur Bedienung des Cockpitsimulators, UAV-Führung, Missionsplanung und Durchführung. In den folgenden Tagen wurden die Experimente durchgeführt:

- **Tag 1-2:** Training und erste Missionsdurchläufe.
- **Tag 3**-4: Abwechselnde Durchführung von PAA-Experimenten (Planung und Assistenz), Cockpitbewertungen und Pilotenbeobachtungsmissionen.
- **Tag 5:** Gemeinsame Mission in einer Zweisitzerkonfiguration, Abschlussbesprechung und Verabschiedung.

Trotz vereinzelter Abweichungen durch persönliche oder externe Umstände konnten alle geplanten Experimente im vorgesehenen Zeitraum erfolgreich abgeschlossen werden.

## 5.2 Versuchspersonen

An den Experimenten nahmen zehn erfahrene, männliche Piloten der deutschen Luftwaffe teil. Ihr Alter lag zwischen 32 und 59 Jahren (Ø 40,75 Jahre, SD = 10,7). Die Flugerfahrung reichte von 760 bis 3.156 Stunden (Ø 1.591 h), insgesamt 15.906 Stunden. Die Piloten verfügten über Einsatzerfahrung auf Plattformen wie T-38 Talon, Panavia Tornado, Eurofighter Typhoon und F-4 Phantom II. Einige hatten zudem Erfahrung als UAV-Operateure sowie im zivilen Motor- und Segelflug.

## 5.3 Experimentaufbau und Experimentalablauf

Das Experiment wurde außerhalb des Simulators (siehe Kapitel 2.4) an einem separaten **Experimentalstand** durchgeführt (vgl. Abbildung 5-2).

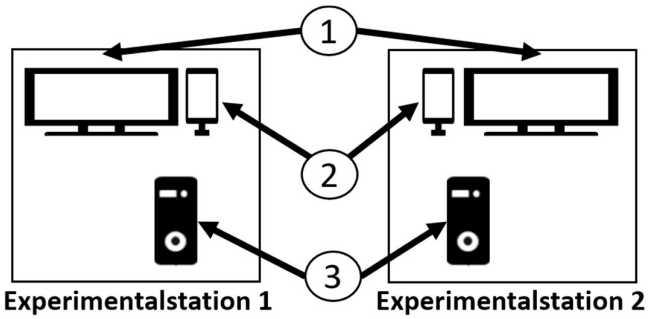



**Abbildung 5-2 Blockschaltbild der Experimentalumgebung**

Dieser bestand aus zwei identisch ausgestatteten Stationen mit:

1. Taktischer Karte (Widescreen-Monitor).
2. Planungsinterface (vertikaler Monitor).
3. Steuerungsrechner mit allen notwendigen Programmen.

Die Versuchsdauer betrug **2 Stunden**. Nach einer Einführung in Zielsetzung und Ablauf wurden den Piloten vier **statische Szenarien** präsentiert. Für jedes Szenario erhielten sie Informationen zur taktischen Lage, Missionszielen, Zielzeiten und Nebenbedingungen.

- An **Station 1** erstellten die Piloten eigenständig einen Missionsplan ohne Zeitlimit.
- An **Station 2** wurde der automatisch vom PAA generierte Plan präsentiert.

Anschließend verglichen die Piloten beide Pläne und bewerteten den PAA-Plan mithilfe eines Fragebogens (vgl. Abschnitt 5.5).

## 5.4 Experimentalmissionen

Jede der vier statischen Missionen hatte eine eigene Ausgangslage, Ressourcenverteilung, Zielstruktur und Komplexität. Unterschiede bestanden u. a. in der Anzahl und Art der feindlichen Stellungen, Missionsziele sowie zeitlichen Vorgaben. Abbildung 5-3 zeigt ein Beispiel für die Ressourcenverteilung:

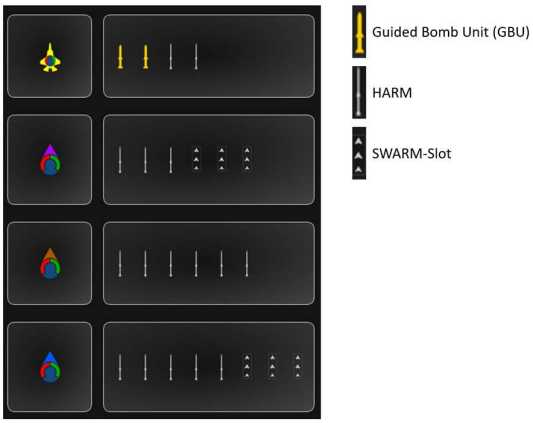



**Abbildung 5-3 Beispiel Ressourcen**

- **Gelb:** Guided Bomb Unit (GBU) (Bundeswehr, 2024a), ähnlich GBU-54. Diese Waffen werden eingesetzt, um Missionszielobjekte in der Simulationsumgebung zu neutralisieren.
- **Weiße**: HARM (Bolkcom, 2005) zur SAM-Unterdrückung.
- **Drei UAV-Symbole:** SWARM-Slot (Lindner, 2022) zur elektronischen Störung von SAM-Stellung.
- UAVs verfügen zusätzlich über nicht-verbrauchbare elektronische Störsender.

### 5.4.1 Statische Situation 1

Abbildung 5-4 zeigt die taktische Lage und verfügbare Ressourcen.

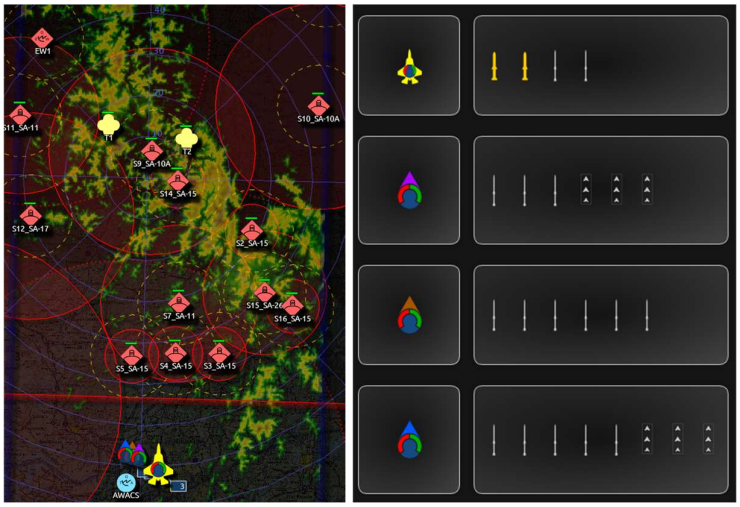



**Abbildung 5-4 Taktische Lage statische Situation 1 und verfügbare Ressourcen**

Das Team befindet sich hinter der FLOT. Ziele T1 und T2 müssen nach Aufklärung durch die bemannte Einheit um 12:19:00 und 12:24:00 Uhr (Simulationszeit) bekämpft werden.

- Bemannte Einheit: 2GBUs, 2 HARMS.
- Lila UAV: 3 SWARM-Slots, 3 HARMs.
- Blaues UAV: 3 SWARM-Slots, 5 HARMs.
- Braunes UAV: 6 HARMs.

### 5.4.2 Statische Situation 2

Abbildung 5-5 zeigt die taktische Lage und verfügbaren Ressourcen.

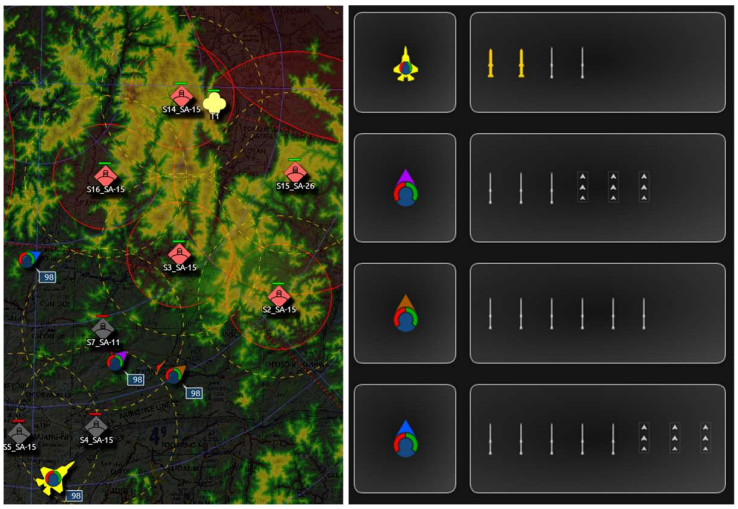



**Abbildung 5-5 Taktische Lage statische Situation 2 und verfügbare Ressourcen**

Das Team befindet sich bereits im Einsatzgebiet. Einige SAM-Stellungen wurden neutralisiert (grau dargestellt). Ziel T1 soll um 12:06:00 Uhr bekämpft werden.

- Ressourcen identisch zu Situation 1.

### 5.4.3 Statische Situation 3

Abbildung 5-6 zeigt die taktische Lage 3 und die verfügbaren Ressourcen.

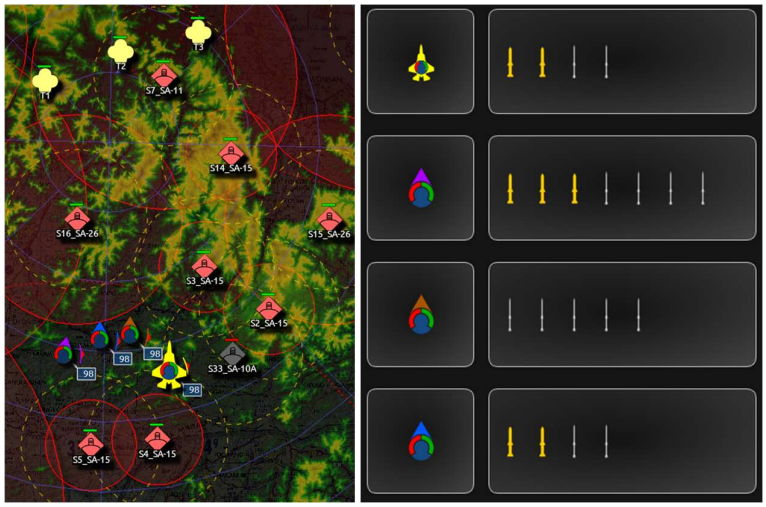



**Abbildung 5-6 Taktische Lage statische Situation 3 und verfügbare Ressourcen**

Drei Ziele (T1, T2, T3) müssen nach Aufklärung bekämpft werden. T1 und T3 gleichzeitig um 12:22:00 Uhr, T2 um 12:26:00 Uhr. Alle Teammitglieder dürfen Ziele angreifen.

- Bemannte Einheit: 2 GBUs, 1 HARM.
- Lila & Braunes UAV: 3 HARMs, 3 SWARM-Slots.
- Blaues UAV: 2 GBUs, 2 HARMs.

### 5.4.4 Statische Situation 4

Abbildung 5-7 zeigt die taktische Lage und die verfügbaren.

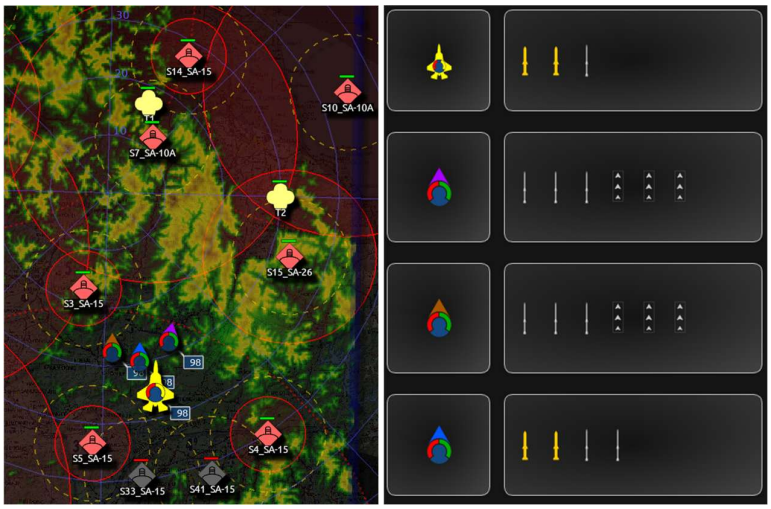



**Abbildung 5-7 Taktische Lage statische Situation 4 und verfügbare Ressourcen**

T1 und T2 müssen gleichzeitig um 12:18:00 Uhr bekämpft werden – je eines durch bemannte Einheit und UAV.

- Bemannte Einheit: 2 GBUs, 1 HARM.
- Lila & Braunes UAV: 3 HAMRs, 3 SWARM-Slots.
- Braunes UAV: 2 GBUs, 2 HARMs.

## 5.5 Erhobene Daten zur Planvalidierung

Zur Bewertung der Planungsleistung des PAA wurden sowohl **subjektive** als auch **objektive Daten** erhoben und analysiert.

*Subjektive Daten*

Die subjektiven Daten wurden durch standardisierte Fragebögen, geschlossene Skalierungsfragen sowie offene Freitextantworten erhoben. Methodisch umfasst dieser Datenblock sowohl quantitativ-subjektive Daten – etwa Likert-Skalen und Präferenzangaben – als auch qualitativ-subjektive Daten in Form frei formulierter Kommentare. Ziel war es, die Wahrnehmung der Piloten hinsichtlich Klarheit, Effizienz, Risiko, Planpräferenz und Vertrauen in den PAA zu erfassen (Mariampolski, 2001; Patten, 2016).

Nach der Erstellung eines eigenen Plans für eine statische Situation wurden die Piloten gebeten, diesen mit dem vom PAA generierten Plan zu vergleichen. Die Bewertung erfolgte anhand eines **Fragebogens**, der mehrere Abschnitte umfasste:

- Zunächst bewerteten die Piloten den automatisierten Plan auf einer **7-stufigen Likert-Skala** hinsichtlich Klarheit, Effizienz und Zielerreichung (vgl. Abbildung 5-8)

- Im nächsten Abschnitt (vgl. Abbildung 5-9) sollten sie angeben, welchen Plan sie bevorzugen – bezogen auf:
    - **Ressourceneinsatz** (z. B. Anzahl eingesetzter UAVs, verwendete Mittel)
    - **Einsatzrisiko** (z. B. elektronische Angriffe, SWARM-EA, Gefährdung von Teammitgliedern)
    - sowie ihre Bereitschaft, den PAA künftig zur Missionsvorplanung zu nutzen.

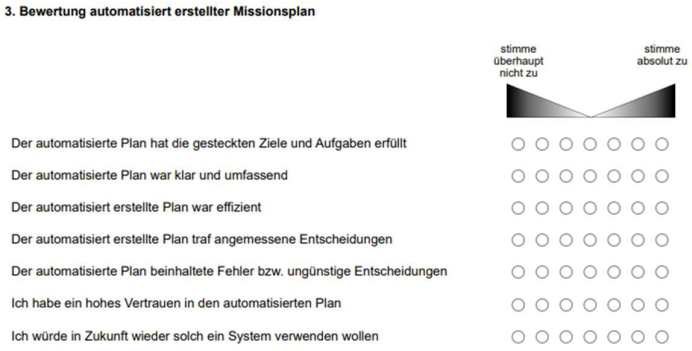



**Abbildung 5-8 Fragebogenteil zur Bewertung des Missionsplans des PAA**

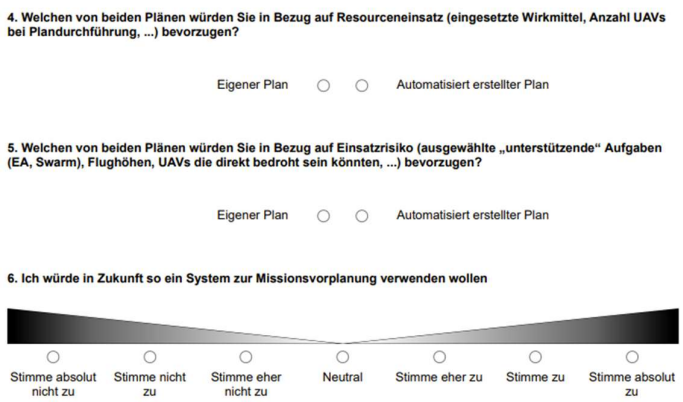



**Abbildung 5-9 Fragebogenteil zur Angabe der Planpräferenz**

Zusätzlich konnten die Piloten in **offenen Textfeldern** ihre Einschätzungen zur Effizienz des PAA-Plans im Vergleich zum eigenen Plan abgeben und **Verbesserungsvorschläge** machen.

Ein weiterer Bestandteil war der Fragebogen zum Vertrauen in Automatisierung (*engl. Trust in Automation* (TiA)) nach (Körber, 2018) , der das Vertrauen der Nutzer in automatisierte Systeme erfasst. Der TiA-Fragebogen umfasst **sechs Subskalen**, darunter:

- Zuverlässigkeit / Kompetenz
- Verständnis / Vorhersagbarkeit
- Vertrautheit
- Intention der Entwickler
- Allgemeine Vertrauensbereitschaft

Die Teilnehmer bewerteten Aussagen zu diesen Dimensionen ebenfalls auf einer Likert-Skala. Daraus wurde ein **Gesamtwert für das Vertrauen in die Automation** berechnet.

Für eine differenzierte Analyse empfiehlt sich jedoch die Betrachtung der einzelnen Subskalen, da Vertrauen ein **mehrdimensionales Konstrukt** ist (Nunnally & Bernstein, 1994).

Abschließend hatten die Piloten die Möglichkeit, **frei formulierte Anmerkungen** zu hinterlassen. Der vollständige Fragebogen ist in Anhang D dokumentier.

*Objektive Daten*

Die objektiven Daten wurden durch die automatisierte Auswertung der von den Piloten erstellten Missionspläne sowie der vom PAA generierten Pläne erhoben. Ziel war es, die Leistungsfähigkeit, Effizienz und Robustheit der Pläne anhand reproduzierbarer Kriterien unabhängig von der subjektiven Bewertung der Probanden zu analysieren.

Nach Abschluss der Planungsphase wurden alle Pläne in einer **vollautomatisierten Simulationsumgebung** abgespielt. Dabei wurden folgende **leistungsrelevante Metriken** erfasst:

- **Zielerreichung:** Wurden alle vorgegebenen Missionsziele erfolgreich erfüllt? Diese Metrik gibt Aufschluss über die **operative Effektivität** des Plans.
- **Zeiteinhaltung:** Wurden die Missionsziele innerhalb der vorgegebenen Zeitfenster erreicht? Dies ist besonders relevant für zeitkritische Operationen und die **Synchronisation mit anderen Einheiten**.
- **Verluste:** Wie viele Teammitglieder (bemannt oder unbemannt) wurden während der Missionsausführung neutralisiert? Diese Kennzahl dient als Indikator für das **Einsatzrisiko** und die **Sicherheit des Plans**.

Die Auswertung dieser Daten erfolgte **standardisiert und automatisiert**, um eine **vergleichbare** und **reproduzierbare Bewertung** aller Pläne zu gewährleisten. Durch die Kombination dieser Metriken konnte die **Gesamtqualität der Planungen** sowohl auf individueller Ebene (Pilot) als auch im Vergleich zum PAA objektiv beurteilt werden. Die quantitative Analyse liefert somit eine **empirische Grundlage**, um die Planungsleistung des PAA im Vergleich zu menschlichen Planern zu bewerten und die erste Forschungsfrage aus Kapitel 1.3 zu beantworten.

## 5.6 Experimentalergebnisse

In diesem Kapitel werden die Ergebnisse des Validierungsexperiments vorgestellt. Zunächst werden die quantitativen Ergebnisse in Bezug auf den Erfolg der erstellten Missionspläne präsentiert. Dabei werden zuerst die von dem PAA erstellten Pläne vorgestellt. Anschließend werden die Ergebnisse der vollautomatisierten Simulation beschrieben und diskutiert. Im zweiten Teil der Auswertung werden die Ergebnisse der Fragebögen präsentiert und analysiert. Abschließend erfolgt eine Zusammenfassung der Ergebnisse.

### 5.6.1 Missionserfolg der Planergebnisse

*Missionspläne des PAA*

Die Abbildungen Abbildung 5-10 bis Abbildung 5-13 zeigen die vom PAA erstellten Missionspläne zu den in Kapitel 5.4 vorgestellten statischen Situationen S1 bis S4. Die angezeigten Uhrzeiten auf der rechten Seite des Planungsinterfaces beziehen sich immer auf die Simulationsuhrzeit.

- **Statische Situation 1**

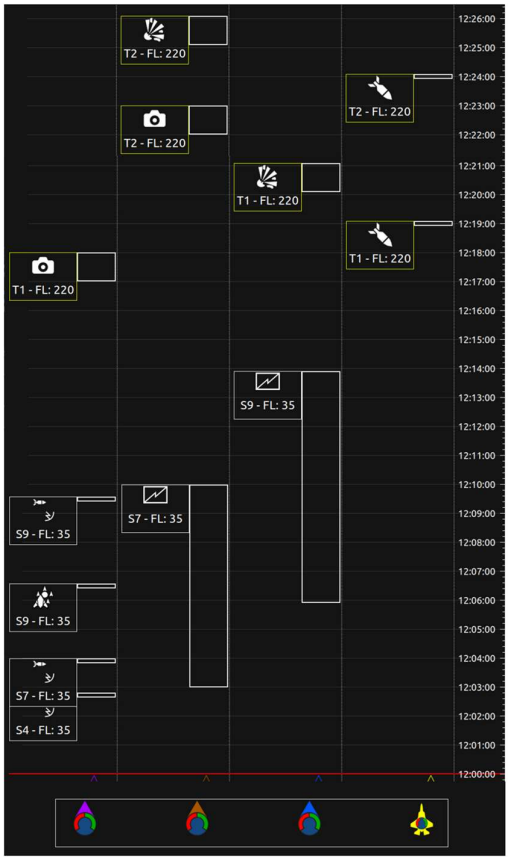



**Abbildung 5-10 PAA Missionsplan für S1**

In Situation S1 sieht der Plan des PAA folgende Schritte vor:

1. **Bekämpfung der mittleren S4_SA-15:** Das lila UAV führt einen HARM-Angriff um 12:02:50 Uhr gegen die S4_SA-15 durch.
2. **Beginn der elektronischen Unterdrückung S7_SA-11:** Um 12:03:00 Uhr startet das braune UAV mit einem Auftrag zur elektronischen Unterdrückung der zentralen S7_SA-11.
3. **Angriff auf die S7_SA-11:** Um 12:04:00 Uhr führt das lila UAV einen HARM-Angriff auf die S7_SA-11 durch.
4. **Unterdrückung der S9_SA-10A**: Um 12:06:00 Uhr beginnt das blaue UAV mit der elektronischen Unterdrückung der S9_SA-10A, die beide Zielobjekte, T1 und T2, abdeckt.
5. **Schwarm-Einsatz und HARM-Angriff:** Etwa um 12:06:30 Uhr setzt das lila UAV einen Drohnenschwarm ein, um drei Minuten später einen sicheren HARM-Angriff auf die S9_SA-10A durchzuführen.
6. **Aufklärung und Angriff auf T1:** Die Aufklärung des Zielobjekts T1 beginnt um 12:17:00 Uhr, sodass die bemannte Einheit um 12:19:00 Uhr ihre GBU auf T1 abwerfen kann.

Anschließend bestätigt das blaue UAV um 12:20:00 Uhr durch Nachaufklärung die Zerstörung des Ziels.

7. **Aufklärung und Angriff auf T1:** Ab 12:22:00 Uhr startet das braune UAV die Aufklärung von T2. Dies wird gefolgt von einem Angriff der bemannten Einheit auf T2 um 12:24:00 Uhr.
8. **Mission Abschluss:** Die Mission endet um 12:26:00 Uhr mit dem Abschluss des letzten Auftrags, der Nachaufklärung von T2 durch das braune UAV.

- **Statische Situation 2**

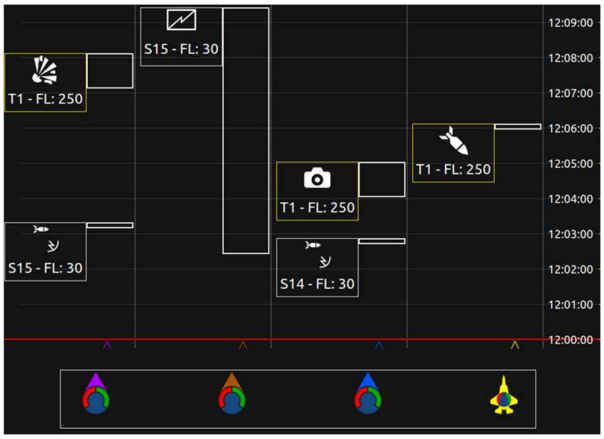



**Abbildung 5-11 PAA Missionsplan für S2**

1. **Direkte Unterdrückung S14_SA-15:** Aufgrund des knappen Zeitfensters zur Missionsdurchführung schickt der PAA das blaue UAV direkt über eine nordwärts verlaufende Route zur Unterdrückung der S14_SA-15 um etwa 12:02:50 Uhr.
2. **Neutralisierung S15_SA-26:** Um 12:02:30 Uhr startet das braune UAV die elektronische Unterdrückung der S15_SA26, welche das Zielobjekt abdeckt. Diese wird bis zum Ende der Mission aufrechterhalten. Um etwa 12:03:10 Uhr führt das lila UAV einen HARM-Auftrag auf die S15_SA-26 durch.
3. **Aufklärung und Zerstörung des Zielobjekts:** Nachdem das blaue UAV die S14_SA-15 zerstört hat, fliegt es zur Aufklärung des Zielobjekts T1 und beginnt diese um 12:04:00 Uhr. Die bemannte Einheit bringt laut Plan dann um 12:06:00 Uhr eine GBU aus um das Zielobjekt zu zerstören.
4. **Nachaufklärung und Missionsabschluss:** Um 12:07:00 Uhr sieht der Plan eine Nachaufklärung und Bestätigung der Zerstörung des Zielobjekts vor.

- **Statische Situation 3**




**Abbildung 5-12 PAA Missionsplan für S3**

1. **Direkte Unterdrückung S3_SA-15:** Die zentrale SAM-Stellung S3_SA-15 wird durch das braune UAV um ca. 12:01:30 Uhr unterdrückt um den Weg zur potenten S7_SA-11, welche alle drei Hochwertziele abdeckt frei zu machen.
2. **Neutralisierung S7_SA-**11: Der nächste Schritt zur Erreichung des Missionsziels sieht das Ausbringen einer HARM auf die S7_SA-11 um 12:04:00 Uhr durch das blaue UAV vor, während diese SAM-Stellung durch das braune UAV elektronisch gestört wird.
3. **Aufklärung und gleichzeitige Neutralisierung T1 und T3:** Um 12:20:00 Uhr beginnt durch das braune und lila UAV die Aufklärung der Hochwertziele T1 und T3. Anschließend werden diese laut Plan um 12:22:00 Uhr durch das blaue UAV und die bemannte Einheit zeitgleich neutralisiert.
4. **Nachaufklärung der Ziele T1 und T3 sowie Aufklärung von T2:** Nach dem durchgeführten gleichzeitigen Angriff auf T1 und T3, wird um 12:23:00 Uhr eine Nachaufklärung der Ziele durch das braune und lila durchgeführt um die Zerstörung der Ziele zu bestätigen. Um 12:24:00 Uhr beginnt das blaue UAV mit der Aufklärung des letzten Ziels T2.
5. **Zerstörung und Nachaufklärung von T2:** Der Plan sieht die Zerstörung des Ziels T2 um 12:26:00 Uhr durch die bemannte Einheit vor, sowie eine abschließende Nachaufklärung um 12:27:00 Uhr durch das braune UAV.
6. 

- **Statische Situation 4**

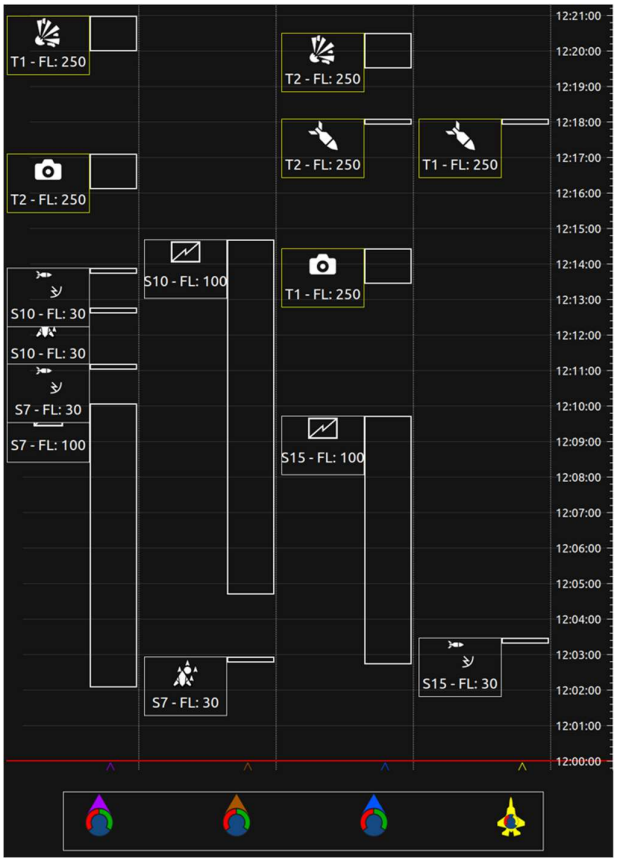



**Abbildung 5-13 PAA Missionsplan für S4**

1. **Elektronische Unterdrückung S7_SA-10A:** Um 12:02:00 Uhr beginnt das lila UAV mit einer elektronischen Unterdrückung der S7_SA-10A welche beide Ziele T1 und T2 abdeckt, gefolgt vom Ausbringen eines Schwarms durch das brauche UAV um 12:03:00 Uhr.
2. **Elektronische Unterdrückung und Neutralisierung S15_SA-26:** Um 12:02:45 Uhr beginnt das blaue UAV mit der elektronischen Unterdrückung der SAM-Stellung S15_SA-26 welche das Ziel T2 abdeckt. Um 12:03:30 Uhr sieht der Plan vor, dass die bemannte Einheit eine HARM auf die S15_SA-26 ausbringt.
3. **Elektronische Unterdrückung S10_SA-10A sowie Neutralisierung S7_SA-10A und S10_SA-10A:** Um 12:04:45 Uhr beginnt das braune UAV mit der elektronischen Unterdrückung der nordöstlichen S10_SA-10A, die das Ziel T2 abdeckt. Gleichzeitig führt das lila UAV drei aufeinanderfolgende Aufträge aus. Zuerst neutralisiert es die S7_SA-10A mit einer HARM um 12:11:00 Uhr, dann bringt es einen Schwarm zur S10_SA-10A um 12:12:45 Uhr aus. Schließlich bringt es um etwa 12:13:50 Uhr eine weitere HARM auf die S10_SA-10A aus.
4. **Zielaufklärung T1 und T2:** Um 12:13:30 Uhr klärt das blaue UAV Ziel T1 auf. Nachdem alle Gefahrenquellen beseitigt sind und das lila UAV bereits vor Ort ist, beginnt es um 12:16:00 Uhr mit der Aufklärung von T2.
5. **Gleichzeitige Neutralisierung von T1 und T2:** Um 12:18:00 Uhr sieht der Plan vor, dass sowohl die bemannte Einheit als auch das blaue UAV gleichzeitig die Ziele T1 und T2 ausschalten.

6. **Nachaufklärung der Ziele T1 und T2**: Um 12:19:30 Uhr beginnt das blaue UAV mit der Nachaufklärung von T2, gefolgt vom lila UAV um 12:20:00 Uhr mit der Nachaufklärung von T1.

*Ergebnisse der vollautomatisierten Simulation*

Die vom PAA generierten Missionspläne für die vier statischen Szenarien (S1–S4) wurden mit den von den Piloten erstellten Plänen verglichen. Die Bewertung erfolgte anhand von drei Kriterien:

- **Zielerreichnung** (Missionserfolg).
- **Einhaltung der Missionszeitfenster**
- **Verluste von UAVs**

Die Ergebnisse der vollautomatisierten Simulationen sind in folgender Tabelle 5-1 zusammengefasst:

**Tabelle 5-1 Vergleich Missionserfolg – PAA vs. Piloten**

| Szenario | PAA: Missionserfolg | PAA: UAV-Verluste | Erfolgreiche Piloten Pläne (von 10) | Häufige Fehlerursachen bei Piloten |
|---|---|---|---|---|
| **S1** | Ja | 0 | 4 | Falsche Zielreihenfolge, zu knappe Zeitfenster |
| **S2** | Ja | 0 | 3 | Zeitüberschreitung, ineffiziente Routen |
| **S3** | Ja | 0 | 2 | Gleichzeitigkeit nicht eingehalten, Ressourcenfehler |
| **S4** | Ja | 0 | 5 | Teilweise unklare Priorisierung |

Der PAA erreichte in allen Szenarien 100 % Zielerreichung ohne Verluste. Nur 4 von 10 Piloten erreichten dieses Niveau in allen Szenarien. Die nicht erfolgreichen Pläne der Piloten sind in Anhang H – S dokumentiert. Tabelle 5-2 führt Beispiele der fehlgeschlagenen Piloten-Pläne auf.

**Tabelle 5-2 Beispiele fehlgeschlagener Piloten-Pläne**

| Pilot | Szenario | Fehlerursache | Anhang |
|---|---|---|---|
| **P1** | S2 | Zeitfenster nicht eingehalten | H |
| **P4** | S1, S3 | Aufklärung zu spät, zu kompakter Plan | I, J |
| **P5** | S1 | Falsche Zielreihenfolge, keine Nachaufklärung | K |
| **P7** | S1, S2 | Riskante Route, SAM nicht neutralisiert | L, N |
| **P8** | S1, S2 | Aufklärung vor SAM-Bekämpfung, zu viele Ziele | O, P |
| **P10** | S1 – S3 | Keine SAM-Unterdrückung, falsche Zielzeiten | Q – S |

Die Ergebnisse zeigen, dass der PAA in der Lage ist, **robuste, effiziente und sichere Missionspläne** zu erstellen. Die Pläne waren in allen Fällen erfolgreich und führten zu keinen Verlusten – ein Ergebnis, das nur 40 % der Piloten erreichten. Die häufigsten Fehler bei den Piloten lagen in der **zeitlichen Planung**, **Ressourcenzuweisung** und **mangelnden Redundanzen** bei der SAM-Bekämpfung.

### 5.6.2 Evaluation der Planungsergebnisse

Die Bewertung der vom PAA generierten Pläne erfolgte durch die Piloten mittels standardisierter Fragebögen (Likert-Skala) sowie Freitextantworten. Die Ergebnisse zeigen:

- **Hohe Zustimmung** zu Aussagen wie (vgl. Abbildung 5-14 und Abbildung 5-15):
  - „Der Plan war klar und umfassend."
  - „Die Ziele wurden erfüllt."
  - „Der Plan war effizient."




**Abbildung 5-14 Bewertung der Planergebnisse, gemittelt über alle Situationen und Piloten Teil 1**

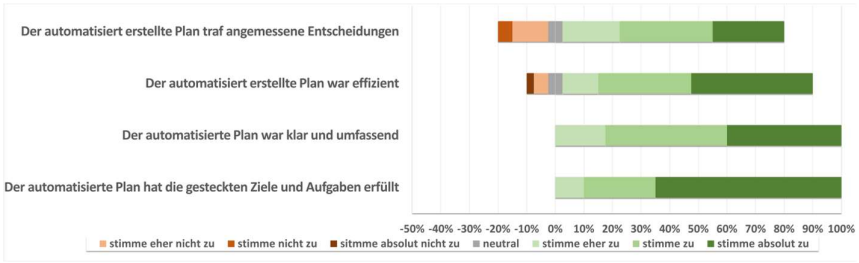



**Abbildung 5-15 Bewertung der Planergebnisse, gemittelt über alle Situationen und Piloten Teil 2**

- **Kritischere Bewertungen** bei:
  - „Der Plan traf angemessene Entscheidungen" (Abbildung 5-16).
  - „Der Plan enthielt Fehler oder ungünstige Entscheidungen" (Abbildung 5-17).

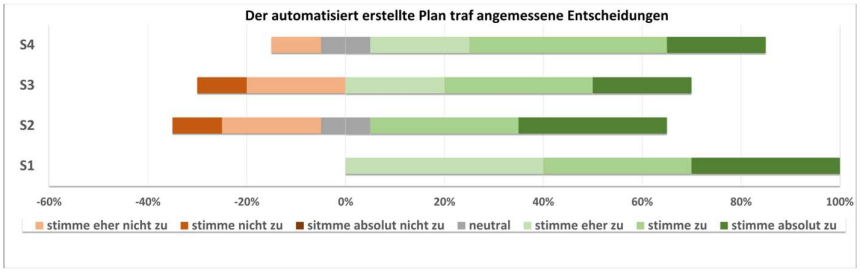



**Abbildung 5-16 Detaildarstellung der Ergebnisse zur Frage: "Der automatisiert erstellte Plan traf angemessene Entscheidungen"**

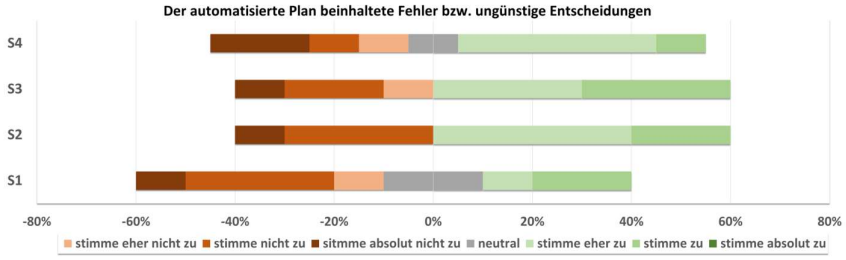



**Abbildung 5-17 Detaildarstellung der Ergebnisse zur Frage: "Der automatisierte Plan beinhaltete Fehler bzw. ungünstige Entscheidungen"**

Die **Freitextantworten** zeigten folgende wiederkehrende Themen (Tabelle 5-3):

**Tabelle 5-3 Zusammenfassung der Freitextantworten zur Bewertung der Planungsergebnisse**

| Thema | Beobachtungen |
|---|---|
| **Effizienz vs. Risiko** | Der PAA plant effizient, aber mitunter auf Kosten der Bewegungsfreiheit und Redundanz. |
| **Bewegungsfreiheit** | Piloten wünschten sich mehr „Luft“ im Zielgebiet für Ausweichmanöver. |
| **SAM-Bekämpfung** | Uneinigkeit über aggressives Vorgehen vs. Ressourcenschonung. |
| **Zeitplanung** | Kritik an zu engen Zeitfenstern zwischen Aufklärung und Angriff. |

Die Auswertung der Planpräferenzen zwischen dem PAA-Plan und dem Pilotenplan hinsichtlich Ressourcenverbrauch und Risiko zeigt einige Übereinstimmung mit den vorher diskutierten Punkten und ist in Abbildung 5-18 dargestellt.

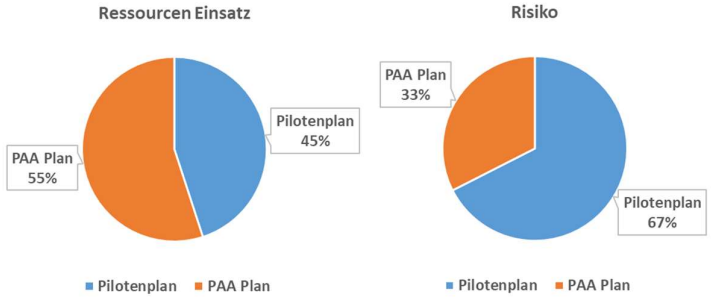



**Abbildung 5-18 Bewertung der Planbevorzugung**

- **55%** der Piloten bevorzugten den PAA-Plan hinsichtlich **Ressourceneinsatz**.
- **67 %** bevorzugten ihren eigenen Plan hinsichtlich **Risiko.**

- Einige Piloten gaben an, dass sie beide Pläne als gleichwertig empfanden, aber sich im Fragebogen entscheiden mussten.

### 5.6.3 Vertrauen in den des Planungsassistenzagenten bei der automatisierten Planerstellung

Zur Erfassung des Vertrauens wurde der **Trust in Automation** (TiA)-Fragebogen nach Körber (2018) verwendet. Beim TiA handelt es sich um einen standardisierten Fragebogen zur Erfassung von Vertrauen in Automation. Für die Interpretation der Ergebnisse ist zu beachten, dass einzelne Aussagen negativ formuliert sind, beispielsweise „Ein Ausfall des Systems ist wahrscheinlich“ oder „Das System reagiert unvorhersehbar“. Eine Ablehnung solcher Aussagen ist deshalb nicht als negatives Ergebnis, sondern im Sinne eines höheren Vertrauens als positives Ergebnis zu interpretieren. Dies ist bei der Betrachtung der in Abbildung 5-19 dargestellten Ergebnisse zu berücksichtigen. Die **aggregierten Ergebnisse** über alle Piloten und Szenarien hinweg zeigen ein **hohes Maß an Vertrauen** in den PAA (vgl. Abbildung 5-19). Besonders positiv bewertet wurden:

- Die **Kompetenz** des Systems, komplexe Aufgaben zu übernehmen.
- Die **Zuverlässigkeit** bei der Planerstellung.
- Die **Vorhersagbarkeit** des Systemverhaltens.

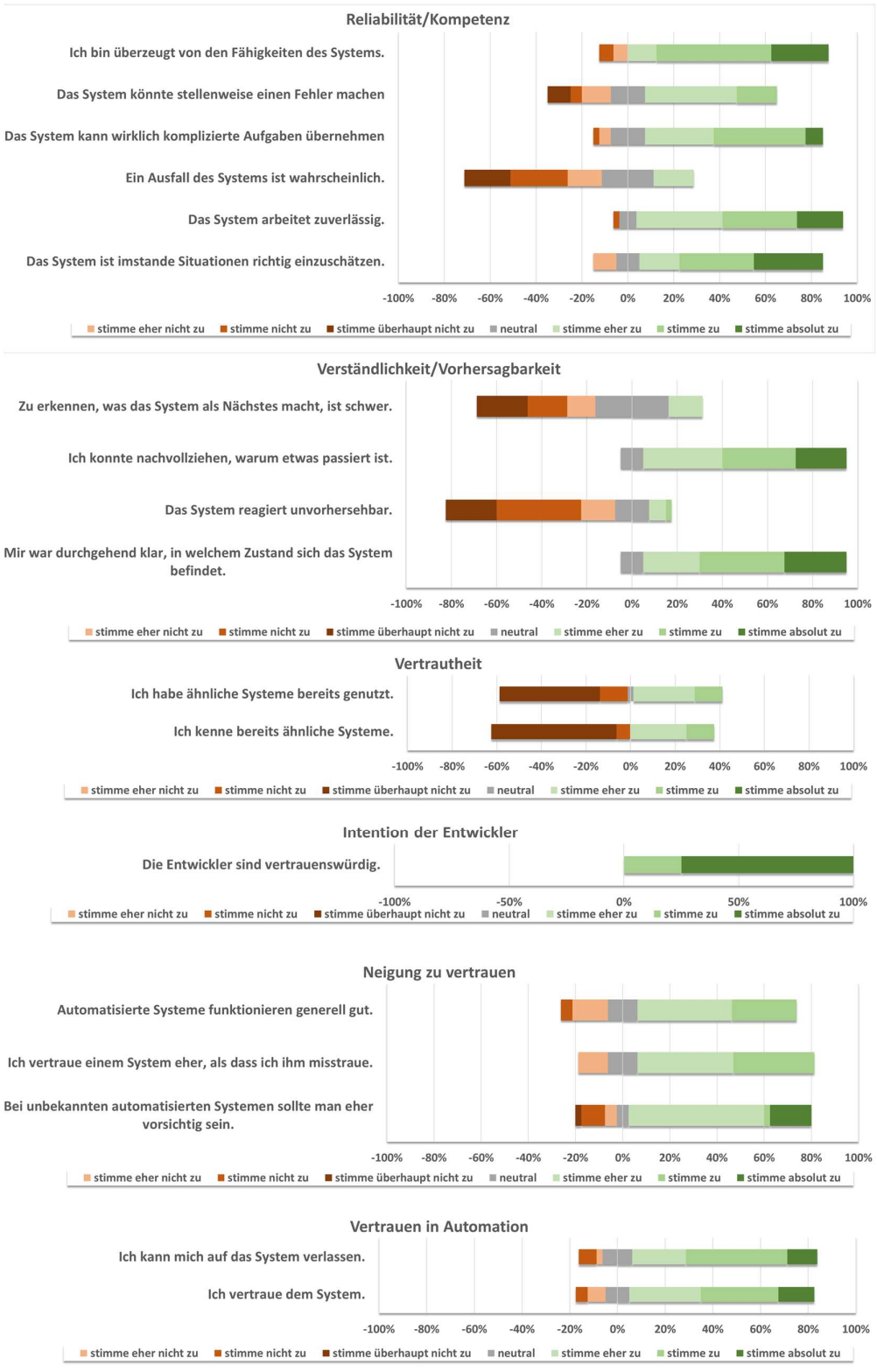



**Abbildung 5-19 Ergebnisse des TiA-Fragebogens über alle Situationen und Piloten gemittelt**

Allerdings wurde auch deutlich, dass die Piloten nicht ausschließen, dass der PAA stellenweise Fehler machen könnte – eine Aussage, der in allen Szenarien mehrheitlich zugestimmt wurde (vgl. Abbildung 5-20). Diese Einschätzung korreliert mit den Bewertungen in Abbildung 5-16

und Abbildung 5-17, wo einige Pläne als „nicht immer angemessen“ oder „mit Fehlern behaftet“ beschrieben wurden.

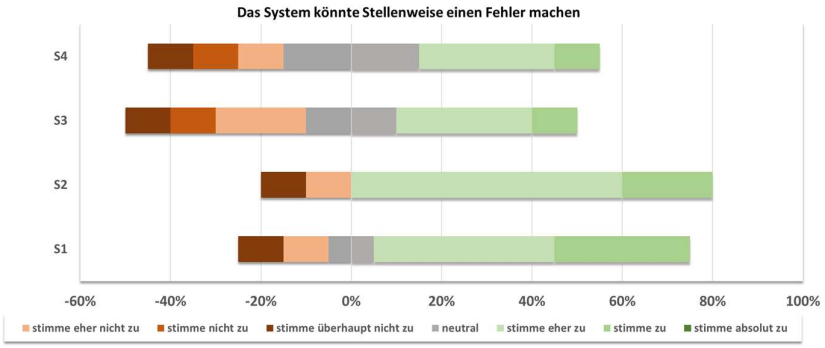



**Abbildung 5-20 Detailauswertung zum Punkt "Das System könnte Stellenweise einen Fehler machen" über alle Experimentalsituationen**

Tabelle 5-4 zeigt eine detaillierte Übersucht der Subskalen.

**Tabelle 5-4 Subskalen im Detail**

| Subskala | Bewertung | Interpretation |
|---|---|---|
| **Zuverlässigkeit / Kompetenz** | Hoch | Der PAA wird als fähig und robust wahrgenommen |
| **Verständlichkeit / Vorhersagbarkeit** | Hoch | Piloten konnten Systementscheidungen nachvollziehen. |
| **Vertrautheit** | Gering | Erwartbar, da es sich um ein neuartiges System handelt. |
| **Intention der Entwickler** | Sehr hoch | Vertrauen in die Systemgestaltung und -ethik. |
| **Allgemeine Vertrauensbereitschaft** | Hoch | Piloten sind offen für Automation, aber vorsichtig bei neuen Systemen |
| **Vertrauen in Automation (gesamt)** | Hoch | Der PAA wird als vertrauenswürdiger Partner im Cockpit akzeptiert. |

Die Ergebnisse zeigen, dass **Vertrauen in den PAA stark von Transparenz und Erklärbarkeit** abhängt. Besonders positiv wurde bewertet, dass der PAA:

- **konsistente Entscheidungen** trifft,
- und **klare Vorschläge** macht.

Gleichzeitig wurde angemerkt, dass **fehlende Bewegungsfreiheit im Zielgebiet** (vgl. 5.6.2 und Tabelle 5-3) und zu starke Effizienzorientierung das Vertrauen in bestimmten Situationen mindern können. Einige Piloten äußerten in den Freitextfeldern, dass sie sich **mehr Kontrolle oder Override-Möglichkeiten** wünschen würden – insbesondere bei kritischen Planänderungen. Dies deutet auf ein Bedürfnis nach **adaptiver Automatisierung** hin, bei der der Mensch situativ stärker eingebunden wird (vgl. (Kaber & Endsley, 2004)).

### 5.6.4 Zusammenfassung und Empfehlung

Die Ergebnisse der experimentellen Validierung zeigen, dass der PAA in der Lage ist, valide, effiziente und sichere Missionspläne zu erstellen. In allen vier untersuchten Szenarien wurden

die Missionsziele zuverlässig erreicht – ohne UAV-Verluste. Dieses Ergebnis wurde nur von vier der zehn Piloten erreicht, was die Leistungsfähigkeit des Systems unterstreicht.

Die vom PAA erzeugten Pläne wurden von den Piloten als klar, strukturiert und effizient bewertet. Besonders deutlich zeigte sich ein Vorteil hinsichtlich der Planerstellungszeit: Während die manuelle Missionsplanung durch die Piloten teils zehn Minuten oder länger erforderte, erzeugte der PAA nach Initiierung des Planungsprozesses in weniger als einer Sekunde einen vollständigen, konsistenten und direkt nutzbaren Missionsplan. Der Planungsausgang stand damit innerhalb der Systemlaufzeit nahezu ohne wahrnehmbare Verzögerung bereit. Für den operativen Einsatz bedeutet dies, dass Planungsalternativen praktisch unmittelbar verfügbar sind, was insbesondere unter Zeitdruck von erheblicher Bedeutung ist.

Gleichzeitig wurden auch Verbesserungspotenziale identifiziert. Ein zentraler Kritikpunkt betraf die eingeschränkte Bewegungsfreiheit im Zielgebiet. Der PAA neigt dazu, nur die unbedingt notwendigen feindlichen Stellungen zu neutralisieren, was zwar effizient ist, aber die taktische Flexibilität einschränkt. Die Piloten wünschten sich mehr Spielraum für Ausweichmanöver oder Reaktionen auf unerwartete Bedrohungen wie Pop-up-SAMs. Hier wäre eine Erweiterung der Planlogik sinnvoll, die auch die Umgebung im Zielgebiet berücksichtigt.

Ein weiterer Aspekt betrifft die Gewichtung von Effizienz und Risiko. Der PAA optimiert stark auf Zeit und Ressourcenschonung, was in bestimmten Situationen zu einem erhöhten Risiko führen kann. Eine stärkere Berücksichtigung von Sicherheitsaspekten – etwa durch Redundanz in der SAM-Bekämpfung – wäre wünschenswert. Dies könnte durch eine konfigurierbare Gewichtung der Optimierungsziele (z. B. Zeit vs. Risiko) realisiert werden.

Darüber hinaus wurde vorgeschlagen, den PAA um die Berücksichtigung von **Rules of Engagement** (ROE) zu erweitern. Diese stellen politische, rechtliche und strategische Rahmenbedingungen dar, die den Einsatz militärischer Mittel regeln (Corn, 2016; Cooper, 2019). Ihre Integration würde nicht nur die Realitätsnähe erhöhen, sondern auch die Akzeptanz bei den Nutzern stärken. Auch eine Erweiterung um zusätzliche operative Fähigkeiten – etwa Luft-Luft-Einsätze oder ISR – wurde angeregt, um die Einsatzbreite des Systems zu erhöhen. Insgesamt wurde der PAA von den Piloten als leistungsfähiges, vertrauenswürdiges und zukunftsfähiges System bewertet. Die Kombination aus menschlicher und maschineller Intelligenz, wie sie der PAA verkörpert, stellt einen bedeutenden Fortschritt in der dynamischen Missionsplanung dar und bietet hohes Potenzial zur Steigerung von Effizienz, Sicherheit und Missionserfolg in komplexen militärischen Operationen.

# 6 Experimentelle Validierung der Assistenzfähigkeiten des Planungsassistenzagenten

Dieses Kapitel widmet sich der Untersuchung der Assistenzfähigkeiten des PAA im Rahmen komplexer MUM-T-Missionen. Aufbauend auf der in Kapitel 5 dargestellten Validierung der Planungsfähigkeiten liegt der Fokus nun auf der Interaktion zwischen Mensch und System während der Missionsdurchführung. Ziel ist es, die Auswirkungen unterschiedlicher Automatisierungs- bzw. Assistenzstufen auf zentrale Leistungsindikatoren zu analysieren, darunter:

- Missionserfolg,
- SA,
- WL,
- Vertrauen in das System,
- sowie Benutzerfreundlichkeit und Akzeptanz.

Die Experimente wurden im Kampfflugzeugsimulator des IFS-FMMF (siehe 2.4) durchgeführt. Dabei kamen reale Piloten der Luftwaffe zum Einsatz, die in einem Single-Cockpit-Szenario mit einem bemannten Flugzeug und drei UAVs operierten. Die Untersuchung erfolgte im Rahmen der Experimentalkampagne zur Studie OpFoCo (vgl. Kapitel 5.1).

Im Folgenden werden zunächst die implementierten Assistenzstufen des PAA sowie deren Integration in den Simulator vorgestellt. Anschließend folgen die Beschreibung Methodik und Datenerhebung, der Ablauf der Experimente, die Missionsszenarien sowie die Ergebnisse und deren Diskussion.

## 6.1 Untersuchte Assistenzstufen des Planungsassistenzagenten

Im Rahmen der experimentellen Untersuchung wurden drei Assistenzstufen des PAA implementiert, die sich im Grad der Automatisierung und der Interaktion mit dem Piloten unterscheiden. Ziel war es, deren Einfluss auf Leistung, Vertrauen, kognitive Belastung und Situational Awareness zu analysieren. Die Konzeption orientiert sich an etablierten Modellen der Mensch-Maschine-Kooperation, insbesondere an den Prinzipien des Management-by-Consent und Management-by-Exception (siehe Kapitel 2.1.2). Ergänzt wurde dieses Spektrum durch eine situationsadaptive Assistenz, die den Automatisierungsgrad dynamisch an die aktuelle Lage anpasst.

- **Mittlere Assistenzstufe:** Abbildung 6-1 zeigt den Ablauf der Generierung von Assistenzmeldungen und deren Bearbeitung durch den Piloten.

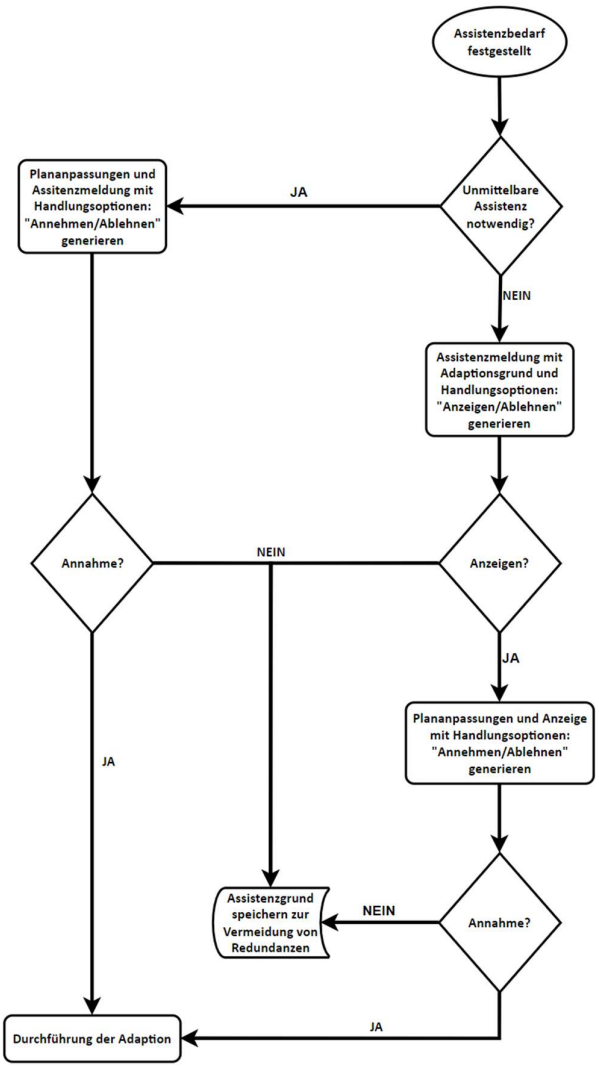



**Abbildung 6-1 Ablauf der Assistenzgenerierung und Bearbeitung bei mittlerer Assistenzstufe**

In dieser Stufe agiert der PAA als beratender Partner. Er erkennt Planungsfehler, Optimierungspotenziale oder sicherheitskritische Situationen und schlägt entsprechende Plananpassungen vor. Der Pilot wird über eine Assistenzmeldung informiert und kann die vorgeschlagene Änderung annehmen oder ablehnen. In weniger kritischen Situationen kann der Pilot zunächst entscheiden, ob er sich die vorgeschlagene Änderung überhaupt anzeigen lassen möchte. Diese Form der Assistenz stärkt das Situationsbewusstsein und die Kontrolle des Nutzers, erfordert jedoch zusätzliche Interaktion und Aufmerksamkeit.

- **Hohe Assistenzstufe:** Abbildung 6-2 zeigt den Ablauf der Assistenzgenerierung und die Schritte der Bearbeitung bei der hohen Assistenzstufe.

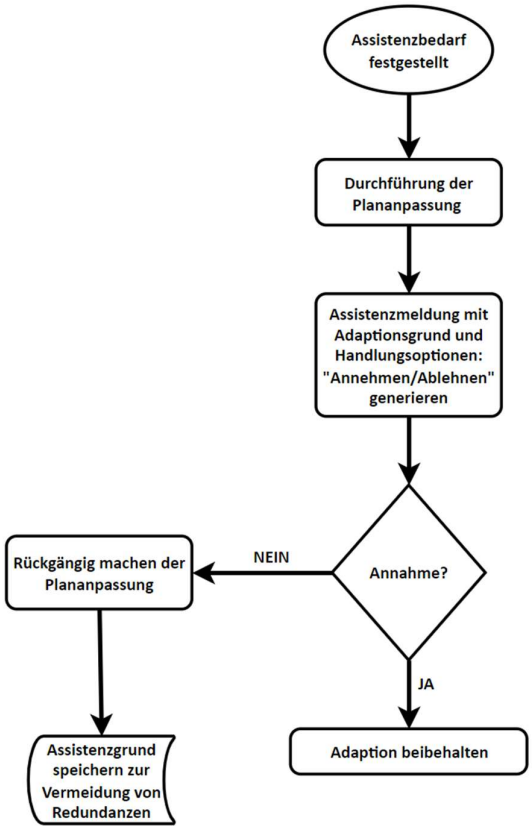



**Abbildung 6-2 Ablauf der Assistenzgenerierung und Bearbeitung bei hoher Assistenzstufe**

Bei dieser Stufe handelt der PAA proaktiv. Sobald er eine kritische Situation erkennt oder eine Planoptimierung identifiziert, führt er die entsprechende Änderung direkt durch. Der Pilot wird im Nachgang über die durchgeführte Anpassung informiert und hat die Möglichkeit, diese zu akzeptieren oder rückgängig zu machen. Diese Form der Assistenz reduziert die Interaktionslast und entlastet den Piloten in zeitkritischen Situationen, birgt jedoch das Risiko eines Kontrollverlusts oder einer verminderten Transparenz.

- **Situationsangepasste Assistenz:** Abbildung 6-3 zeigt den Ablauf der Assistenzgenerierung und Bearbeitung bei der situationsangepassten Assistenzstufe.

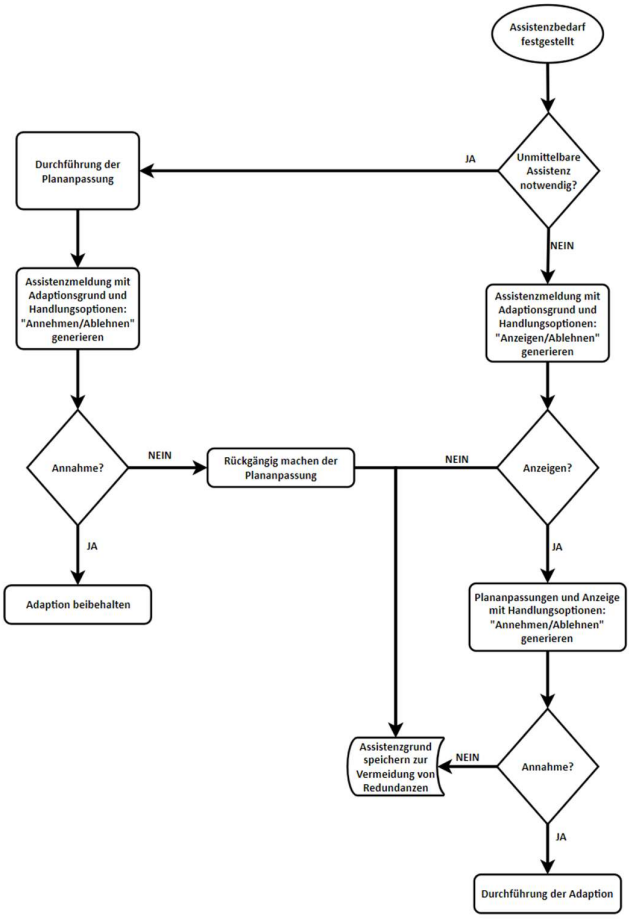



**Abbildung 6-3 Ablauf der Assistenzgenerierung und Bearbeitung bei situationsangepasster Assistenzstufe**

Die dritte Stufe kombiniert beide Ansätze in einem adaptiven Modell. Der PAA bewertet kontinuierlich die Kritikalität der aktuellen Situation und entscheidet kontextabhängig, ob eine Änderung vorgeschlagen oder direkt durchgeführt wird. In hochkritischen Situationen (z. B. unmittelbare Bedrohung durch eine SAM-Stellung) greift der PAA direkt ein, während in weniger dringlichen Fällen eine kooperative Entscheidungsfindung mit dem Piloten erfolgt. Diese Form der Assistenz soll die Vorteile beider Strategien vereinen und eine flexible, kontextgerechte Unterstützung ermöglichen.

Alle drei Assistenzstufen wurden vollständig in das Cockpit des MUM-T-Kampfflugzeugsimulators integriert. Die Kommunikation zwischen PAA und Pilot erfolgt über visuelle Meldungen im MHDD und SHDD, wobei Darstellung und Interaktionslogik je nach Assistenzstufe variieren (vgl. Kapitel 6.2).

Die Auswahl dieser Stufen basiert auf Erkenntnissen aus der Forschung zu HAT und MIP (Chen et al., 2025; Kaber & Endsley, 2004; Woods & Hollnagel, 2006) und erlaubt eine differenzierte Analyse der Mensch-Maschine-Interaktion unter variierenden Automatisierungsgraden in dynamischen, sicherheitskritischen Einsatzszenarien.

## 6.2 Integration der Assistenzstufen und Kommunikation mit dem Piloten in den MUM-T Kampfflugzeugsimulator

Dieses Kapitel beschreibt, wie die drei Assistenzstufen des PAA in das Cockpit des MUM-T-Kampfflugzeugsimulators integriert wurden und wie die Kommunikation zwischen System und Pilot erfolgt.

### 6.2.1 Allgemeine Meldungen und Anzeigen

Der PAA kommuniziert auf allen Assistenzstufen über visuelle Meldungen im MHDD und den SHDD. Zwei zentrale Funktionen sind:

- **Vorschlag des nächsten Missionsschritts**
  Erkennt der PAA, dass das nächste Zielobjekt im strategischen Plan noch nicht im aktuellen Plan des Piloten berücksichtigt ist, wird dieses durch einen blauen Kreis hervorgehoben und mit der Meldung „NEXT TARGET TO ENGAGE“ angezeigt (vgl. Abbildung 6-4). Die Anzeige erfolgt für fünf Sekunden.




**Abbildung 6-4 Vorschlag des nächsten Missionsschritts**

- **Anzeige von Risiko- und Waffenstufe**
  Der PAA analysiert den aktuellen Plan des Piloten hinsichtlich Risiko und eingesetzter Wirkmittel (z. B. HARMs) und stellt diese Information farbcodiert (grün, gelb, rot) im Tasking-Interface dar (vgl. Abbildung 6-5). zu sehen. Die Bewertung basiert auf den in Abschnitt 4.2.4 beschriebenen Bewertungsfunktionen.




**Abbildung 6-5 Risiko-/Waffenstufe des aktuellen Plans des Piloten**

### 6.2.2 Dialoge und Handlungsoptionen bei Umgebungsänderung

Der PAA reagiert auf Veränderungen in der taktischen Lage mit situationsabhängigen Assistenzmeldungen. Die Art der Interaktion hängt von der aktiven Assistenzstufe ab (vgl. Kapitel 4.3.1).

- **Kritische Situationen:**
  Bei unmittelbarer Bedrohung eines Teammitglieds schlägt der PAA auf mittlerer Stufe z. B. das Hinzufügen eines HARM-Auftrags vor („ADD HARM ON S9?“), den der Pilot annehmen oder ablehnen kann. Auf hoher Stufe wird die Aufgabe automatisch delegiert, der Pilot kann sie bestätigen oder rückgängig machen (vgl. Abbildung 6-6).

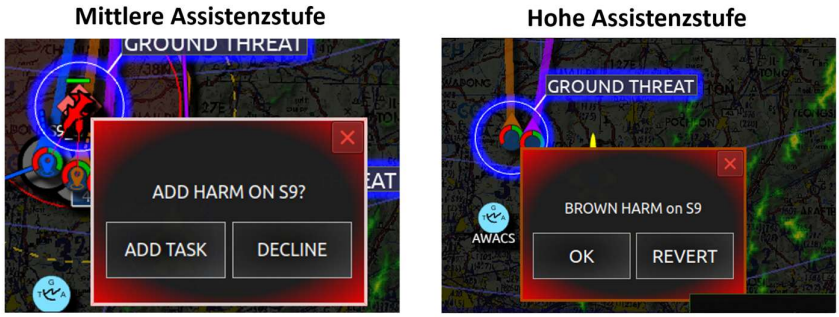



**Abbildung 6-6 Assistenzmeldung des PAA bei unmittelbarer Gefahr. Links bei mittlerer Assistenzstufe und rechts bei hoher Assistenzstufe**

- **Änderung der Teamstruktur**
  Wird ein UAV zerstört, informiert der PAA den Piloten. Auf mittlerer Stufe kann dieser entscheiden, ob er die Aufgaben selbst neu verteilt oder dies dem PAA überlässt. Auf hoher Stufe erfolgt die Neuverteilung automatisch, der Pilot wird lediglich informiert (vgl. Abbildung 6-7).

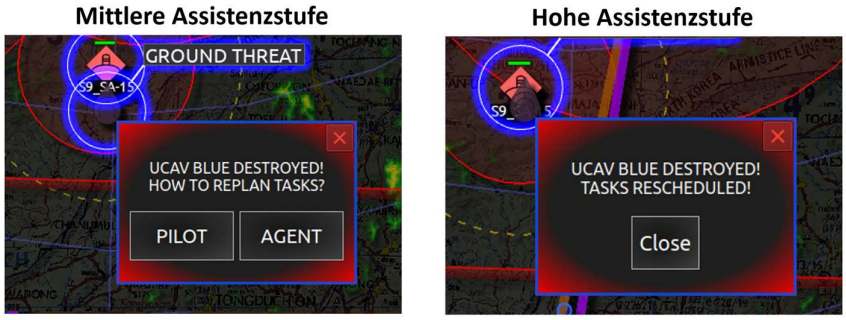



**Abbildung 6-7 Assistenzmeldung des PAA bei Verlust eines Teammitglieds. Links bei mittlerer Assistenzstufe und rechts bei hoher Assistenzstufe**

- **Nicht mehr notwendige Aufgaben**
  Erkennt der PAA, dass Aufgaben im Plan auf ein Zielobjekt verweisen, das nicht mehr aktiv ist (z. B. durch abgeschaltetes Radar), schlägt er deren Entfernung vor. Auf mittlerer Stufe kann der Pilot dies bestätigen oder ablehnen, auf hoher Stufe werden die Aufgaben direkt gelöscht, mit Option zur Wiederherstellung (vgl. Abbildung 6-8).

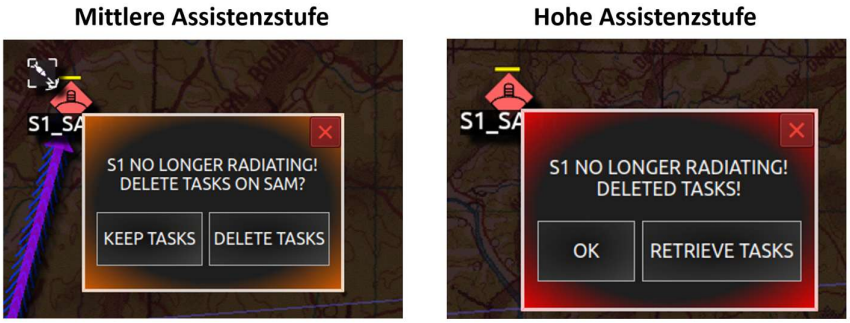



**Abbildung 6-8 Assistenzmeldung des PAA bei nicht mehr notwendigen Aufgaben. Links bei mittlerer Assistenzstufe und rechts bei hoher Assistenzstufe**

### 6.2.3 Dialoge und Handlungsoptionen auf Grundlage von Planänderungen und zyklischer Planüberprüfung

Neben der Reaktion auf Umgebungsänderungen (vgl. 6.2.2) bietet der PAA auch Assistenz bei Planänderungen durch den Piloten sowie im Rahmen zyklischer Planüberprüfungen (vgl. Kapitel 4.3.2). Die Art der Assistenz hängt wiederum von der aktiven Assistenzstufe ab.

- **Nicht notwendige Aufgaben:**
  Erkennt der PAA, dass Aufgaben im Plan nicht zur Zielerreichung beitragen (z. B. weil das Zielobjekt nicht im strategischen Plan enthalten ist), informiert er den Piloten. Auf **mittlerer Stufe** kann dieser entscheiden, ob die Aufgabe gelöscht werden soll („DELETE TASKS ON SAM?“), auf **hoher Stufe** entfernt der PAA die Aufgabe direkt und bietet eine Wiederherstellungsoption an (vgl. Abbildung 6-9).

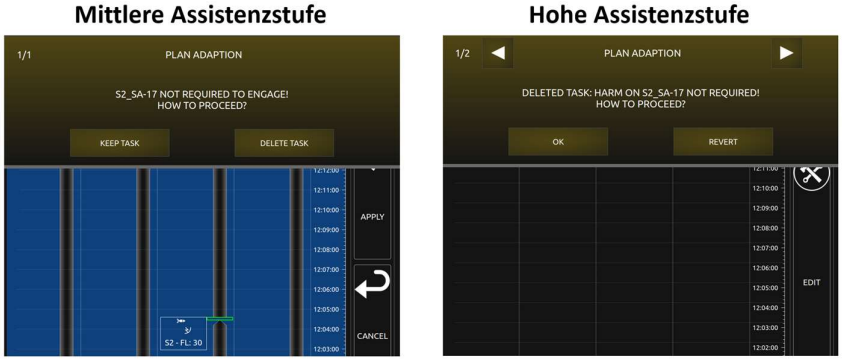



**Abbildung 6-9 Assistenzmeldung des PAA bei nicht notwendigen Aufgaben. Links bei mittlerer Assistenzstufe und rechts bei hoher Assistenzstufe**

- **Aufgabenerweiterung bei risikobehafteter Planung:**
  Plant der Pilot beispielsweise einen einzelnen HARM-Angriff auf eine potente SAM-Stellung (z. B. SA-10 oder SA-17 – vgl. Tabelle 2-3), prüft der PAA, ob diese Maßnahme aus taktischer Sicht ausreichend ist oder ob eine vollständige Taktik – etwa unter Einbeziehung elektronischer Störung (EA) oder SWARM-EA – sinnvoller wäre. Diese Bewertung erfolgt auf Basis der in Kapitel 4.2.4 beschriebenen Bewertungs- und Optimierungskriterien (Risiko, Zeit, Ressourceneinsatz).

  Auf der **mittleren Assistenzstufe** wird der Pilot beim Versuch, den Plan zu bestätigen (vgl. Abbildung 6-10), durch eine Assistenzmeldung darauf hingewiesen, dass die

geplante Maßnahme zu riskant ist („SINGLE TASK ON S1_SA-26 TOO RISKY!“). Der PAA schlägt daraufhin eine Taktikadaption vor („ADAPT TACTIC?“) und bietet dem Piloten drei Optimierungsoptionen an (siehe Abbildung 6-11):

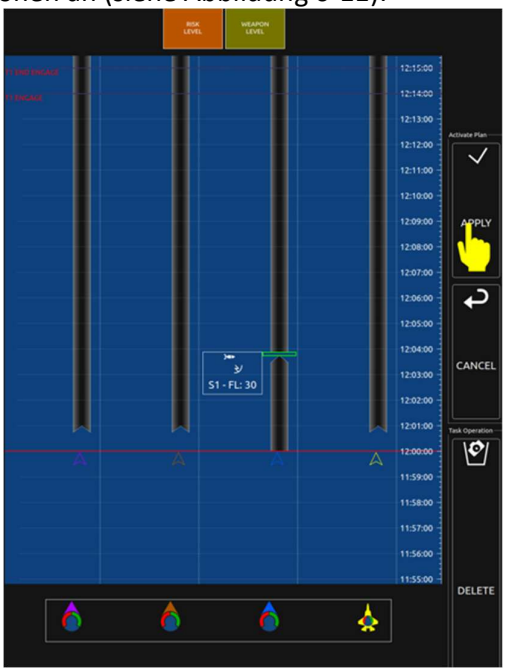



**Abbildung 6-10 Bestätigen eines sehr risikobehafteten Plans**

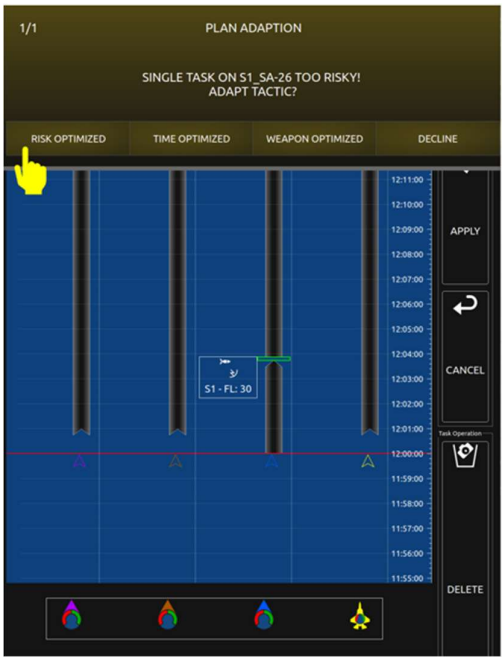



**Abbildung 6-11 Vorschlag zur Taktikadaption bei mittleren Assistenzstufe**

- **RISK OPTIMIZED:** Minimierung des Gefährdungspotenzials für das Team,
- **TIME OPTIMIZED:** schnellstmögliche Zielerreichung,
- **WEAPON OPTIMIZED:** ressourcenschonender Mitteleinsatz.

Entscheidet sich der Pilot für eine Option, wird der optimierte Plan im Tasking-Interface angezeigt (vgl. Abbildung 6-12).

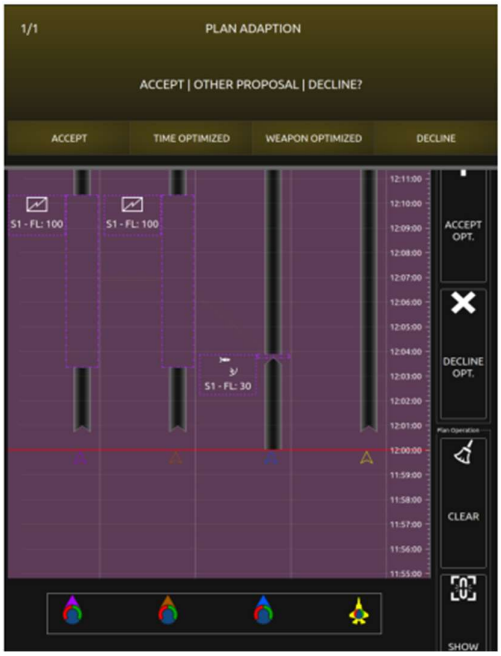



**Abbildung 6-12 Anzeige des risikooptimierten Plans**

Der Hintergrund wechselt in den Optimierungsmodus (lila-rötlich), und der Pilot kann die vorgeschlagene Taktik annehmen („ACCEPT“) oder ablehnen („DECLINE“). Alternativ kann er eine andere Optimierungsart wählen.

Auf der **hohen Assistenzstufe** erfolgt die Erweiterung automatisch. Der PAA wählt basierend auf der aktuellen Lage und Ressourcenverfügbarkeit eine geeignete Taktik aus und ergänzt den Plan entsprechend. Der Pilot wird über die Änderung informiert („TASK: HARM ON S1 EXTENDED TO: SEAD_EH“) und kann diese entweder bestätigen („OK“) oder über „REVERT“ zum ursprünglichen Plan zurückkehren (vgl. Abbildung 6-13).




**Abbildung 6-13 Automatische Aufgabenerweiterung bei hoher Assistenzstufe**

Diese Funktionalität stellt sicher, dass risikobehaftete Einzelentscheidungen des Piloten durch den PAA erkannt und durch robuste, taktisch fundierte Alternativen

ersetzt oder ergänzt werden – ohne die Entscheidungsfreiheit des Piloten einzuschränken.

- **Planerweiterung zur Missionszielerreichung**
  Wenn der PAA erkennt, dass der aktuelle Plan des Piloten nicht auf die Erreichung des strategischen Missionsziels ausgerichtet ist – etwa weil ein Zielobjekt noch nicht berücksichtigt wurde oder die verbleibende Zeit knapp wird –, schlägt er eine geeignete Taktik zur Zielerreichung vor. Die Auswahl erfolgt auf Basis des strategischen Plans sowie der in Kapitel 4.2 beschriebenen Bewertungs- und Optimierungsmodelle. Eine Beispielmeldung ist in Abbildung 6-14 zu sehen.

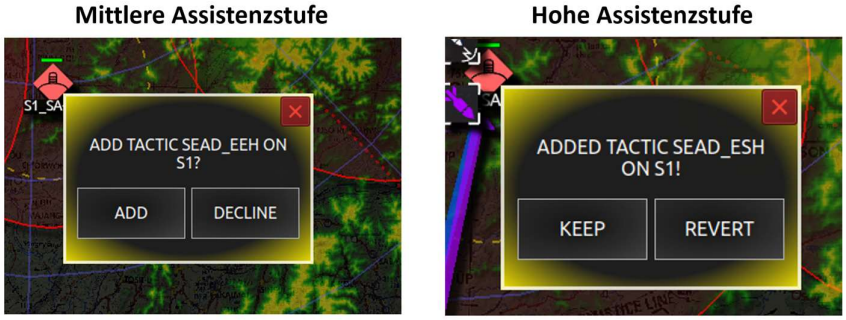



**Abbildung 6-14 Assistenzmeldung des PAA zur Planerweiterung zur Missionszielerreichung. Links bei mittlerer Assistenzstufe und rechts bei hoher Assistenzstufe**

Auf der **mittleren Assistenzstufe** wird dem Piloten eine entsprechende Assistenzmeldung angezeigt (vgl. Abbildung 6-14, links), z. B. „ADD TACTIC SEAD_EEH ON S1?“. Der Pilot kann die vorgeschlagene Taktik über „ADD“ in seinen Plan übernehmen oder über „DECLINE“ ablehnen.

Auf der **hohen Assistenzstufe** fügt der PAA die Taktik automatisch in den Plan ein und informiert den Piloten über die Änderung (z. B. „ADDED TACTIC SEAD_ESH ON S1!“). Der Pilot kann die Änderung über „KEEP“ bestätigen oder über „REVERT“ zum vorherigen Plan zurückkehren (vgl. Abbildung 6-14, rechts).

- **Planoptimierungen**
  Im Rahmen der zyklischen Planüberprüfung analysiert der PAA kontinuierlich, ob der aktuelle Plan hinsichtlich Risiko, Ressourceneinsatz oder Missionszeit optimiert werden kann (vgl. Kapitel 4.3.2). Wird Optimierungspotenzial festgestellt, erfolgt eine entsprechende Assistenzmeldung (vgl. Abbildung 6-15).

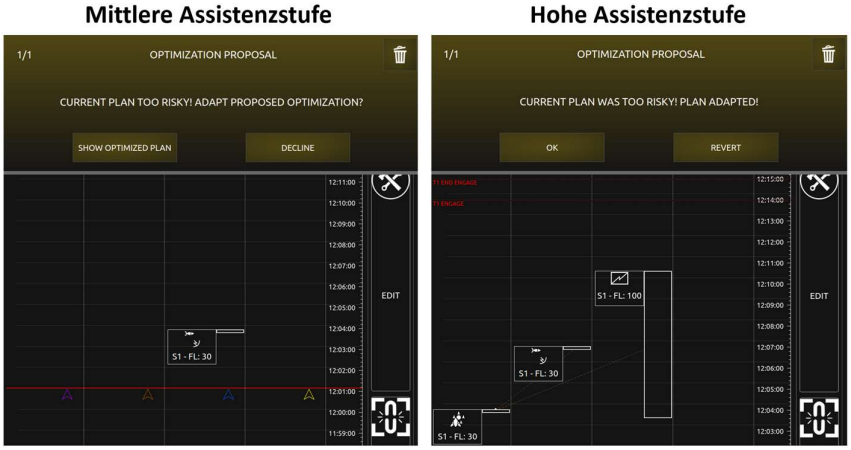



**Abbildung 6-15 Assistenzmeldung des PAA zur Planoptimierung. Links bei mittlerer Assistenzstufe und rechts bei hoher Assistenzstufe**

Auf der **mittleren Assistenzstufe** wird der Pilot z. B. mit der Meldung „CURRENT PLAN TOO RISKY! ADAPT PROPOSED OPTIMIZATION?“ informiert. Er kann sich den optimierten Plan über „SHOW OPTIMIZED PLAN“ anzeigen lassen oder die Optimierung ablehnen („DECLINE“). Entscheidet er sich für die Anzeige, wechselt das Tasking-Interface in den Optimierungsmodus (vgl. Abbildung 6-12), in dem der neue Plan visualisiert wird. Der Pilot kann diesen dann annehmen oder erneut ablehnen.

Auf der **hohen Assistenzstufe** führt der PAA die Optimierung direkt durch und informiert den Piloten über den Grund und die durchgeführte Änderung, z. B. „CURRENT PLAN WAS TOO RISKY! PLAN ADAPTED!“ (vgl. Abbildung 6-15, rechts). Der Pilot kann den angepassten Plan über „OK“ akzeptieren oder über „REVERT“ zum ursprünglichen Plan zurückkehren.

Diese Mechanismen ermöglichen es dem PAA, den Missionsplan kontinuierlich an die aktuelle Lage anzupassen und gleichzeitig dem Piloten die Kontrolle über kritische Entscheidungen zu belassen – abgestimmt auf die gewählte Assistenzstufe.

## 6.3 Methodik und erhobene Daten zur Assistenzvalidierung

Im Experiment wurden subjektive und objektive Daten erhoben, um WL, SA, Benutzerfreundlichkeit, Vertrauen und Interaktionsverhalten zu analysieren. Die subjektiven Daten stammen aus standardisierten sowie eigens entwickelten Fragebögen, Debriefings und Freitextangaben. Die objektiven Daten wurden aus Blickbewegungs-, Interaktions- und Missionslogs der Simulationsumgebung gewonnen. Durch die Kombination beider Datenarten ergibt sich eine ganzheitliche Sicht auf Nutzererfahrung und Systemeffektivität.

### 6.3.1 Workload

Mentale WL beschreibt die Aktivierung begrenzter kognitiver Ressourcen bei der Bearbeitung zeitkritischer Aufgaben. Sie wird durch externe (z. B. Umweltfaktoren) und interne Einflüsse (z. B. Aufmerksamkeit, Anstrengung) bestimmt (Longo et al., 2022). Als multidimensionales Konstrukt ist WL zentral im HFE, insbesondere in der Luftfahrt.

Zur Messung wurde der NASA Task Load Index (TLX) verwendet (Hart & Staveland, 1988). Dieser Fragebogen bewertet WL anhand von sechs Dimensionen:

- Mentale Beanspruchung (mental demand)
- Körperliche Beanspruchung (physical demand)
- Leistung (performance)
- Aufwand (effort)
- Frustration (frustration)

Die Dimensionen werden paarweise verglichen (15 Paare), um individuelle Gewichtungen (0–5) zu ermitteln. Anschließend bewertet der Proband jede Dimension auf einer Skala von 0 (gering) bis 20 (hoch), wobei die Leistungsskala invertiert ist. Der TLX-Score berechnet sich wie folgt (Hart & Staveland, 1988):

$$TLX - Score = \frac{1}{15}\sum_{i=1}^{6}(g_i * h_i)$$

Dabei steht $\mathbf{g_i}$ für die Gewichtung (zwischen 0 und 5) und $\mathbf{h_i}$ für die Intensität der jeweiligen Dimension (zwischen 0 und 20).

Obwohl der TLX subjektiv ist und Interpretationsspielraum lässt, überzeugt er durch einfache Anwendung und wurde daher im Experiment eingesetzt. WL und SA sind eng verwandt, jedoch konzeptionell zu unterscheiden.

### 6.3.2 Situationsbewusstsein

SA ist ein zentrales Konzept im Human Factors Engineering (HFE) der Luftfahrt und beschreibt das situationsbezogene Bewusstsein eines Piloten. Nach (Endsley, 1988) umfasst SA:

*„[…] perception of the elements in the environment within a volume of time and space, the comprehension of their meaning, and the projection of their status in the near future" („[…] Wahrnehmung der Elemente in der Umgebung innerhalb eines bestimmten Zeit- und Raumbereichs, das Verständnis ihrer Bedeutung und die Vorhersage ihres Zustands in der nahen Zukunft").*

Daraus ergeben sich drei Ebenen (Endsley, 2021):

1. **Wahrnehmung** (Ebene 1)
2. **Verständnis** (Ebene 2)
3. **Vorhersage** (Ebene 3)

Vereinfacht: SA ist „how well a person understands what is currently going on"(Bolton et al., 2022). Ihre Bedeutung ergibt sich v. a. aus sicherheitsrelevanten Aspekten wie Entscheidungsfindung, Fehlervermeidung und Kommunikation (Endsley, 1995a; Endsley, 1999; Endsley, 2001).

*Messmethoden*

**Situation Awareness Global Assessment Technique** (SAGAT) (Endsley, 2021; Endsley et al., 1998), unterbricht ein Szenario, um Fragen zur aktuellen Situation zu stellen. Nachteile:

mögliche Beeinträchtigung der Leistung und Fokus auf Erinnerungsvermögen statt SA (Endsley, 2017a).

**Situation Present Assessment Method** (SPAM) (Durso et al., 1998) stellt während der Aufgabe kontextbezogene Fragen. Sie misst, ob Teilnehmer wissen, wo Informationen zu finden sind. Die Methode gilt als weniger invasiv, kann aber bei geringer WL verzerrte Ergebnisse liefern (Endsley, 2021; Pierce, 2012).

Ein Vergleich zwischen SAGAT und SPAM zeigte, dass beide Methoden die Leistung ähnlich gut vorhersagen können, aber SPAM als weniger sensitiv und invasiver in Bezug auf die WL gilt. Studien deuten darauf hin, dass SPAM die SA in Phasen geringerer WL systematisch erfassen könnte, was die Ergebnisse verfälscht(Endsley, 2021).

**Situation Awareness Rating Technique** (SART) (Taylor, 2011) ist ein Fragebogen zur subjektiven SA-Einschätzung nach einem Versuch. Er umfasst 10 Fragen in drei Bereichen:

- **Demand** (Instabilität, Variabilität, Komplexität)
- **Supply** (Erregung, Konzentration, Aufmerksamkeitsteilung, mentale Kapazität)
- **Understanding** (Informationsqualität, -quantität, Vertrautheit)

Der SART-Score berechnet sich wie folgt:

$$SART - Score = \sum Understanding + \sum Supply - \sum Demand$$

**Kritik:** (Braarud, 2021) sieht in „Demand“ und „Supply“ eher WL-Komponenten als SA-Merkmale. (Endsley et al., 1998) zeigten, dass der SART-Score stärker mit Vertrauen als mit objektiver SA korreliert.

Aufgrund der Nachteile von SAGAT und SPAM wurde im Experiment auf diese Methoden verzichtet. Trotz Kritik wurde SART als praktikable Methode zur SA-Erfassung gewählt.

### 6.3.3 Benutzerfreundlichkeit

Benutzerfreundlichkeit (Usability) beschreibt die Eignung eines Systems für einen bestimmten Zweck (Brooke, 1996). Sie hängt stark vom Nutzungskontext und der Zielgruppe ab – ein System kann für eine Person sehr benutzerfreundlich sein, für eine andere jedoch nicht. Laut ISO 9241-11 umfasst Usability drei zentrale Dimensionen: **Effektivität**, **Effizienz** und **Zufriedenheit** (Brooke, 1996). Zur Erfassung dieser Dimensionen wurden im Experiment drei modifizierte Fragebögen eingesetzt:

Die **System Usability Scale** (SUS) ist ein kompakter Fragebogen mit 10 Aussagen, die auf einer Likert-Skala bewertet werden. Die Aussagen sind teils positiv, teils negativ formuliert, um Verzerrungen zu vermeiden(Brooke, 1996). Die Methode liefert eine schnelle Ersteinschätzung, ist jedoch anfällig für den **Central Tendency Bias** (Douven, 2018). Im Experiment wurde eine 7-stufige Skala verwendet.

Der **User Experience Questionnaire** (UEQ) basiert auf 26 Gegensatzpaaren (z. B. langsam – schnell), die auf einer 7-stufigen Skala bewertet werden. Die Paare sind sechs Dimensionen zugeordnet: **Attraktivität**, **Effizienz**, **Klarheit**, **Zuverlässigkeit**, **Anregung** und **Neuheit** (Laugwitz et al., 2008). Der UEQ liefert differenzierteres Feedback als die SUS.

Der **Computer System Usability Questionnaire** (CSUQ) wurde von IBM entwickelt und umfasst 19 Aussagen, ebenfalls auf einer 7-stufigen Skala. Er basiert auf dem Post Study System Usability Questionnaire (PSSUQ), unterscheidet sich jedoch durch leicht angepasste Formulierungen. Während der PSSUQ für Studien konzipiert wurde, ist der CSUQ breiter einsetzbar (Lewis, 1995).

### 6.3.4 Vertrauen in Automation

Um das Vertrauen der Probanden in automatisierte Systeme zu messen, wurde der TiA Fragebogen nach (Körber, 2018) angewendet. Dieser Fragebogen umfasst sechs Subskalen, die verschiedene Vertrauensaspekte wie Zuverlässigkeit/Kompetenz, Verständnis/Vorhersagbarkeit, Vertrautheit, Absicht der Entwickler und allgemeine Vertrauensbereitschaft abdecken. Teilnehmende werden aufgefordert, ihre Zustimmung zu spezifischen Aussagen bezüglich dieser Dimensionen auf einer Likert-Skala zu bewerten. Besonders die invertierten Items müssen für eine präzise Vertrauensbewertung umkodiert werden. Die Nutzung und Analyse des TiA zielen darauf ab, die Wahrnehmung und das Vertrauen der Nutzer in automatisierte Technologien zu erfassen, was eine tiefgreifende Beurteilung des Vertrauens in Automatisierung ermöglicht.

### 6.3.5 Selbsterstellte Fragebögen

Neben den erwähnten etablierten Fragebögen und Methoden kamen auch eigens erstellte Fragebögen zum Einsatz, um gezielte Fragen zu den Assistenzfunktionen des PAA zu stellen. Diese umfassten offene Fragen, solche auf einer 7-stufigen Likert-Skala, Multiple-Choice-Fragen sowie Fragen, die auf einer Skala von 1 bis 10 bewertet werden sollten. Die spezifischen Fragen werden in der Auswertung der Experimente (siehe Kapitel 6.6) detailliert aufgeführt.

### 6.3.6 Subjektive Daten

Die subjektiven Daten wurden mithilfe verschiedener Fragebögen erhoben. Nach der ersten Experimentalmission ohne Assistenz durch den PAA kamen der **NASA-TLX** zur Erfassung der WL und der **SART-Fragebogen** zur Messung der SA zum Einsatz. Nach den assistierten Missionen erhielten die Piloten einen Fragebogen zur jeweiligen Mission. Zunächst wurden Probandennummer und Missionsbezeichnung abgefragt, gefolgt von allgemeinen Fragen zu den Fähigkeiten des PAA (siehe Abbildung 6-16).

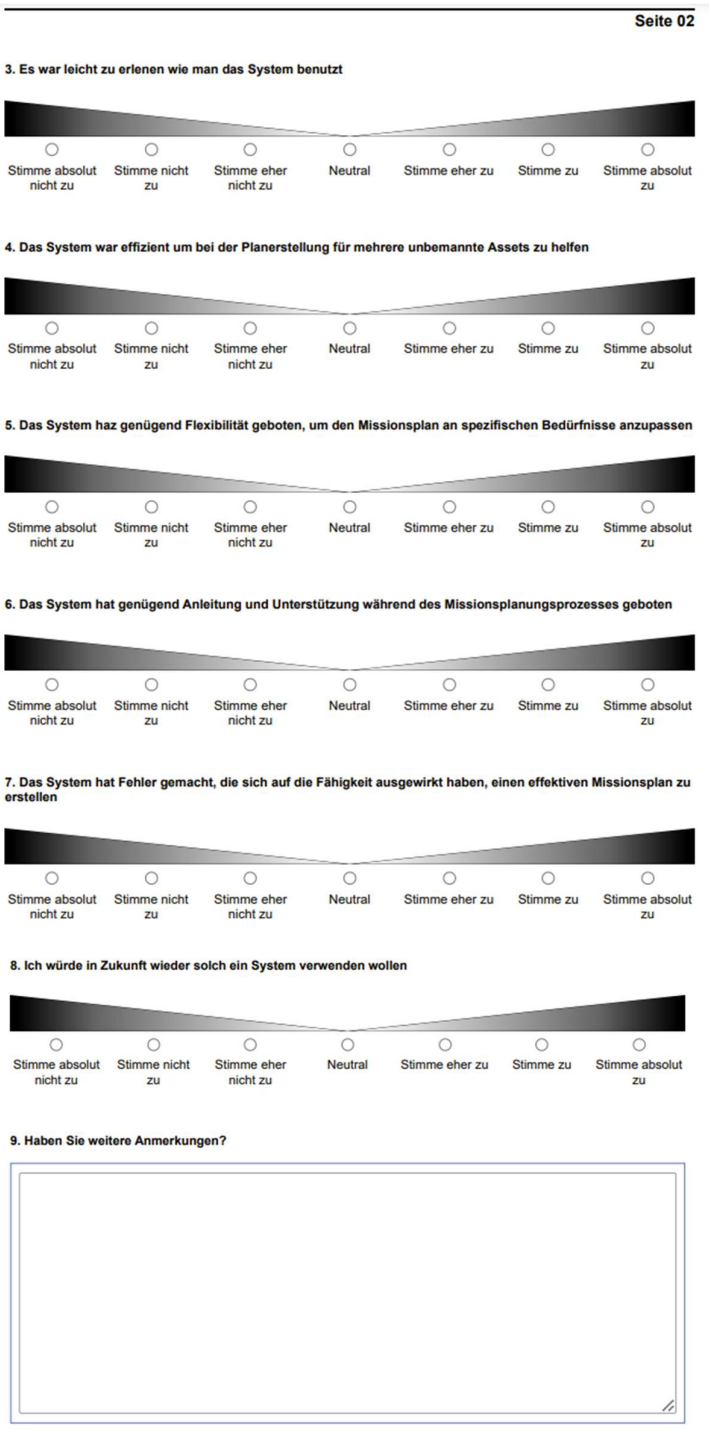



**Abbildung 6-16 Allgemeine Fragen zum PAA**

Im Anschluss enthielt der Fragebogen die standardisierten Instrumente **CSUQ** und **SUS** zur Bewertung der allgemeinen Benutzerfreundlichkeit, jeweils auf einer 7-stufigen Likert-Skala. Danach folgten erneut **SART**, **NASA-TLX** und **UEQ**, sowie der **TiA-Fragebogen** und offene Fragen zur Gesamtmission. Der vollständige Fragebogen ist in Anhang E dokumentiert.

Während der Analyse der Missionsaufzeichnungen wurde das Video an Kommunikationsstellen mit dem PAA pausiert. An diesen Punkten füllten die Piloten einen

**Debriefing-Fragebogen** aus, der Probandennummer, Missionsbezeichnung, Zeitstempel und eine Beschreibung des Ereignisses erfasste (siehe Abbildung 6-17).

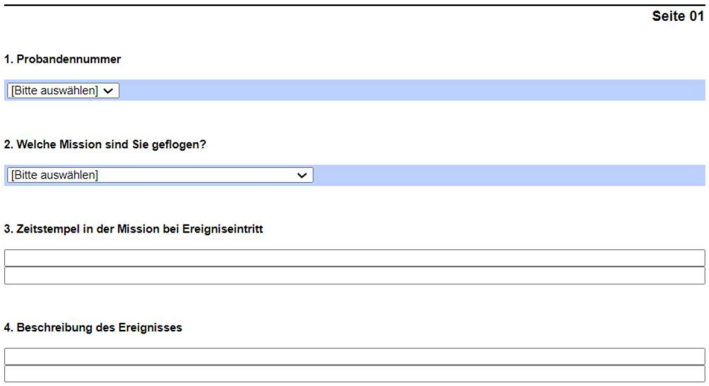



**Abbildung 6-17 Debriefing Fragebogenteil zur Erfassung des Ereignisses**

Es folgten Likert-Skalen-Fragen zur Bewertung des PAA in der jeweiligen Situation sowie eine Multiple-Choice-Frage zum gewünschten Assistenzgrad (Abbildung 6-18).

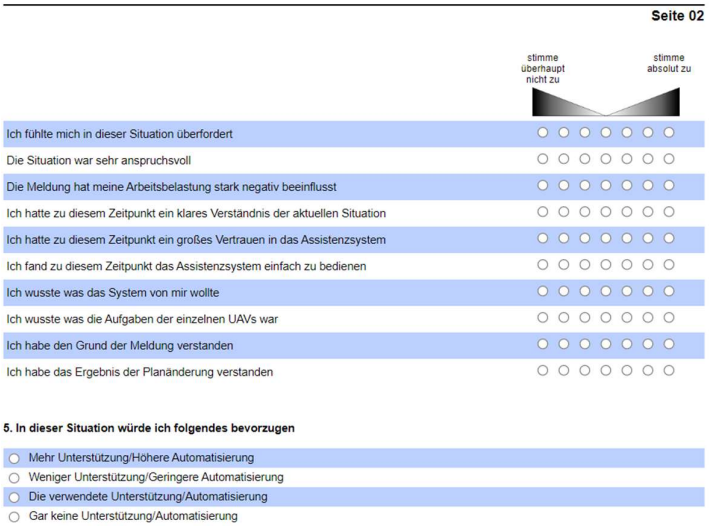



**Abbildung 6-18 Debriefing Fragebogenteil mit speziellen Fragen zu der aktuellen Situation**

Darüber hinaus enthielt der Fragebogen einen weiteren **SART**, Freitextfragen zu WL, SA, Vertrauen, Benutzerfreundlichkeit sowie zu Wünschen und Anpassungen. Abschließend wurden erneut **SUS**, **UEQ** und **TiA** zur aktuellen Situation ausgefüllt (siehe Anhang F).

Nach Abschluss der letzten Mission bearbeiteten die Probanden einen abschließenden, eigens entwickelten Fragebogen zur Bewertung der drei Assistenzstufen des PAA – **mittel**, **hoch** und **situationsangepasst** (im Fragebogen als „Ausgewogene Assistenz“ bezeichnet). Bewertet wurden die Aspekte **Vertrauen**, **SA**, **WL**, **Akzeptanz** und **Benutzerfreundlichkeit** auf einer 10-stufigen Skala. Zusätzlich konnten Einschätzungen in Textfeldern ergänzt werden (siehe Abbildung 6-19 und in Anhang G).

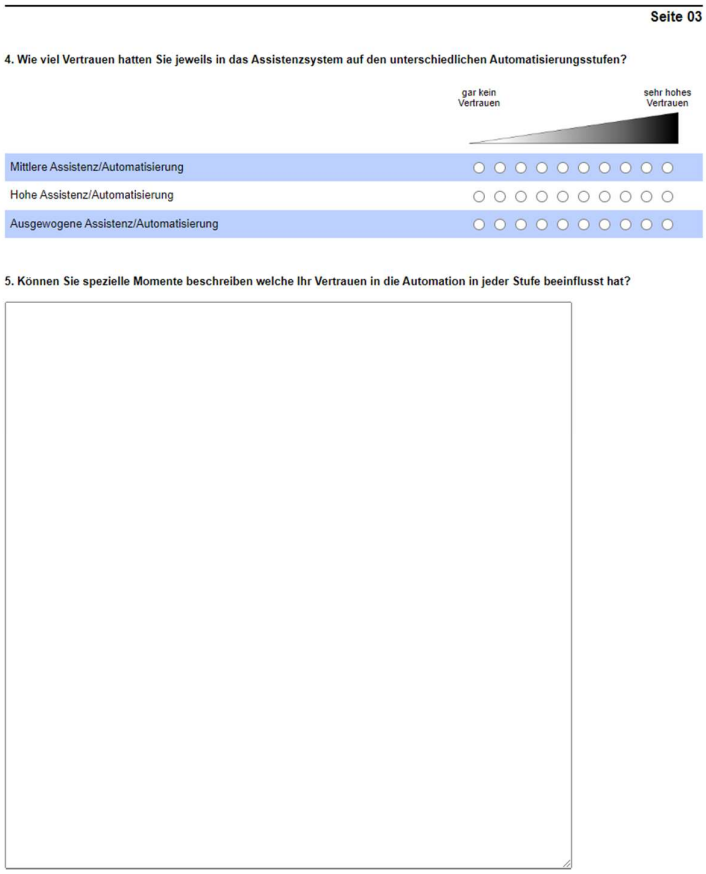



**Abbildung 6-19 Ausschnitt des Abschlussfragebogens zur Bewertung aller drei Assistenzstufen**

### 6.3.7 Objektive Daten

Zur objektiven Datenerhebung standen in der Simulationsumgebung mehrere Instrumente zur Verfügung. Das **Blickbewegungssystem** (vgl. Kapitel 2.4.1) erfasste Fixierungen des Piloten auf Cockpit-Objekte. Zusätzlich lieferten alle interaktiven Elemente auf den MHDD- und SHDD-Displays semantische Informationen über Objektart, Interaktion, Zeitstempel, Verlässlichkeit und Objekt-ID.

Ein Beispiel für die Analyse dieser Daten zeigt Abbildung 6-20, in der markiert ist, wann ein Assistenzobjekt erstmals zuverlässig wahrgenommen wurde. Abbildung 6-21 zeigt den Zeitpunkt der Bearbeitung durch Knopfdruck.

| seTimeStamp | obsName | reliability | interactionType | relatedObjectId |
|---|---|---|---|---|
| 86.753.906.000 | AssistanceWidgetEvent_ | 1.0 | Gaze | 00000000-00f4-9140-0000-000000c88140 |
| 86.753.906.000 | AssistanceWidgetEvent_ | 0.6889 | Gaze | 00000000-00cc-9140-0000-000000a08240 |
| 86.753.906.000 | AssistanceWidgetEvent_LEFT | 0.7683 | Gaze | 00000000-00cc-9140-0000-000000a08240 |
| 86.753.906.000 | AssistanceWidgetEvent_LEFT | 0.6241 | Gaze | 00000000-00f4-9140-0000-000000c88140 |
| 86.753.906.000 | AssistanceWidgetEvent_REVERT | 0.4746 | Gaze | 003b7f89-0000-80bf-0000-00000000f0bf |

**Abbildung 6-20 Ausschnitt Analyse Datei der Blickbewegungs- und Interaktionsdaten. Hier Markierung erstes "gesehen" der Meldung für einen Piloten**

| seTimeStamp | obsName | reliability | interactionType | relatedObjectId |
|---|---|---|---|---|
| 98.187.500.000 | AssistanceWidgetEvent_ | 0.6889 | Gaze | 10e99c07-0000-0000-0000-000000608940 |
| 98.187.500.000 | AssistanceWidgetEvent_ | 0.7683 | Gaze | 00c30b07-0000-0000-0000-000000608940 |
| 98.187.500.000 | AssistanceWidgetEvent_ | 0.7683 | Gaze | 50cb7207-0000-0000-0000-000000608940 |
| 98.218.750.000 | AssistanceWidgetEvent_ | 0.6151 | Gaze | 10d99b07-0000-0000-0000-000000608940 |
| 98.218.750.000 | AssistanceWidgetEvent_ | 0.7683 | Gaze | 102d1503-0000-0000-0000-000000608940 |
| 98.218.750.000 | AssistanceWidgetEvent_ | 0.8888 | Gaze | 807cf106-0000-0000-0000-000000608940 |
| 98.218.750.000 | AssistanceWidgetEvent_KEEP | 1.0 | Tap | 003b7f89-0000-80bf-0000-00000000f0bf |

**Abbildung 6-21 Ausschnitt Analyse Datei der Blickbewegungs- und Interaktionsdaten. Hier Markierung "bearbeitet" der Meldung für einen Piloten**

Auch alle vom PAA generierten **Assistenzmeldungen** wurden erfasst. Diese enthalten Zeitstempel, Meldungstyp und Anzeigeort (z. B. MHDD oder SHDD). Der **typeEnum** identifiziert die Meldung eindeutig (siehe Abbildung 6-22).

| currentTimeStamp | type | typeEnum |
|---|---|---|
| 81.230.469 | MapDialogObject | PLAN_PROPOSAL_NEXT_LOGICAL_TARGET |
| 90.839.844 | SHDDNotification | PLANNER_RISK_REDUCED |

**Abbildung 6-22 Ausschnitt der Analysedatei der Assistenzmeldungen**

Diese Daten ermöglichen vielfältige Analysen, etwa zur **Reaktionszeit**: Wie lange dauerte es vom Senden bis zum Wahrnehmen oder Bearbeiten einer Meldung? Da die Zeitstempel in Mikrosekunden (Assistenzmeldungen) bzw. Nanosekunden (Blickbewegungsdaten) angegeben sind, war eine Umrechnung erforderlich (vgl. Abbildung 6-23).

| Type | Meldung | Meldung gesendet | Meldung gesehen | Meldung bearbeitet | Delta(gesendet-gesehen) | Delta(bearbeitet - gesehen) | Delta(bearbeitet - gesendet) |
|---|---|---|---|---|---|---|---|
| PLAN_PROPOSAL_NEXT_LOGICAL_TARGET | ADDED TACTIC | 81.230.469 | 86.332.031 | 98.218.750 | 5,10 | 11,89 | 16,99 |

**Abbildung 6-23 Ausschnitt Auswertung der Analyse Datei. Zeitstempel in [µs] der Simulationszeit und Zeitdifferenzberechnungen in [s]**

Darüber hinaus wurde erfasst, wie viele Meldungen pro Assistenzstufe und Pilot generiert, angenommen oder abgelehnt wurden und wie lange deren Bearbeitung dauerte. Die Simulationsumgebung basiert auf **ROS2** (vgl. Abschnitt 2.4.1), was eine **Wiedergabe der Missionen** ermöglicht. Diese Funktion erlaubt eine detaillierte Analyse der Missionsdurchführung, z. B. ob die Missionszielzeit eingehalten wurde, ob es Abweichungen in der Ingress-Phase gab oder wie viele UAVs verloren gingen. Insbesondere die Auswertung der Ingress-Distanz ermöglicht die objektive Beurteilung, ob taktisch relevante Nebenbedingungen der MUM-T-Missionsführung eingehalten wurden und inwieweit der PAA den Piloten bei deren Umsetzung unterstützen konnte (siehe Abbildung 6-24).

| | | | | |
|---|---|---|---|---|
| **Bemerkungen** | | | | |
| 2 uav verloren | | | | |
| | | **GRUND** | | |
| **Missionsziel erreicht** | nein | Zielzeit nicht eingehalten | | |
| | | | | |
| | | **Zeit start [s]** | **Zeit ende [s]** | **Ingress Phase ende [s]** |
| **Distanzen eingehalten** | nein | 220 | 695 | 695 |

**Abbildung 6-24 Ausschnitt der Auswertung der Analyse der Wiedergabe der Missionsaufnahme für einen Piloten**

## 6.4 Experimentalablauf

Das Experiment wurde vollständig im Kampfflugzeugsimulator (vgl. Kapitel 2.4) im Rahmen der Experimentalkampagne zum Projekt **OpFoCo** (siehe Kapitel 5.1) durchgeführt. Nach einem eineinhalbtägigen Training (vgl. Abbildung 5-1) wurden den Piloten die Funktionsweise des PAA sowie typische Unterstützungssituationen anhand von Beispielen erläutert.

Es folgten zwei Trainingsmissionen mit **mittlerer** und **hoher Assistenzstufe**. Auf ein Training mit **situationsangepasster Assistenz** wurde verzichtet, da deren Interaktionen identisch zu den anderen Stufen sind. Die Auslösebedingungen wurden jedoch ausführlich erklärt. Anschließend begannen die vier Experimentalmissionen (zur Reihenfolge der Durchführung vgl. Abbildung 6-25).

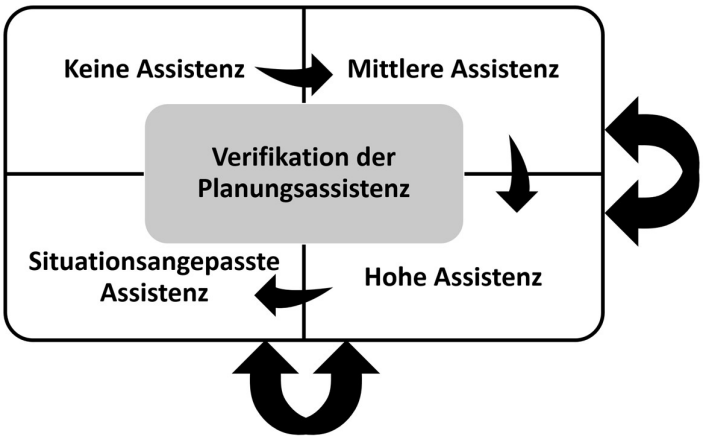



**Abbildung 6-25 Übersicht der Experimentalmissionen und deren Reihenfolge der Durchführung**

Die erste Mission wurde stets **ohne Assistenz** durchgeführt und diente als **Baseline** zur Bewertung der Effekte der Automatisierung. Die Bedeutung dieser Kontrollbedingung umfasst (Kaber & Endsley, 1997; Parasuraman & Manzey, 2010; Silknitter et al., 1999):

- **Benchmarking der Leistung**: Vergleich der Leistung mit und ohne Automatisierung.
- **Identifizierung der Auswirkungen der Automatisierung**: Bewertung von Verbesserungen oder Verschlechterungen.
- **Kontrolle für externe Faktoren**: Sicherstellung interner Validität.
- **Erleichterung der statistischen Analyse**: Ermöglicht z. B. Kovarianzanalyse.
- **Verständnis von Benutzeranpassung und Lerneffekten**: Erkenntnisse über Nutzeranpassung an Automatisierung.

Nach der Baseline-Mission wurden **NASA-TLX** und **SART** ausgefüllt, um WL und SA ohne Assistenz zu erfassen. Es folgten Missionen mit **mittlerer**, **hoher** und **situationsangepasster Assistenz**, deren Reihenfolge zwischen den Probanden variiert wurde. Diese Variation dient der (Christensen et al., 2014):

- **Minimierung von Reihenfolgeeffekten**: z. B. Vermeidung von Übungs- oder Ermüdungseinflüssen.
- **Reduzierung von Verzerrungen**: keine Bevorzugung einzelner Bedingungen.
- **Verbesserte Verallgemeinerbarkeit**: Ergebnisse sind breiter übertragbar.

Alle Missionen wurden aufgezeichnet. Nach jeder Mission füllten die Piloten einen Fragebogen zur jeweiligen Mission aus. Parallel wurde die Aufzeichnung an einem anderen Arbeitsplatz analysiert. An Stellen mit PAA-Interaktion wurde pausiert, und die Piloten beantworteten einen situationsspezifischen Fragebogen.

Nach der letzten Mission und dem abschließenden Interview folgte ein **Gesamtfragebogen**, der alle drei Assistenzstufen bewertete und die Präferenzen der Piloten erfasste.

## 6.5 Experimentalmissionen

m Folgenden werden die vier Experimentalmissionen beschrieben. Um **Lerneffekte** zu vermeiden (Shapiro, 2004) , wurden Positionen von Zielobjekten und feindlichen Stellungen leicht variiert, ohne die Missionsschwierigkeit zu verändern. Abbildung 6-26 zeigt die verfügbaren Wirkmittel.

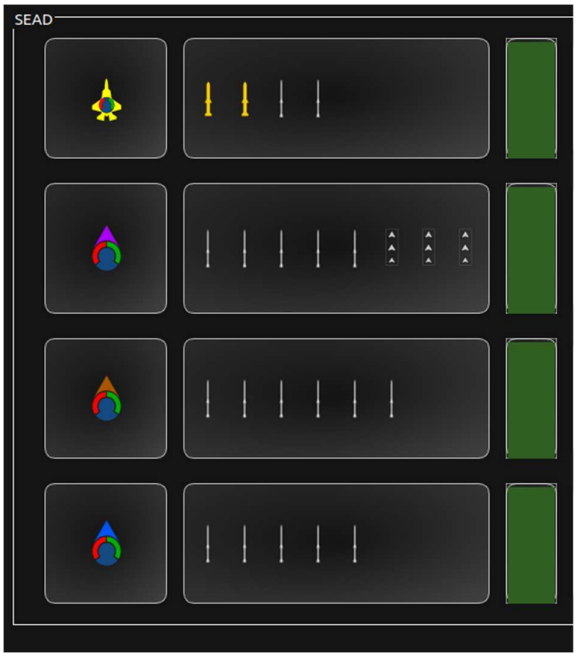



**Abbildung 6-26 Verfügbare Wirkmittel in allen Experimentalmissionen**

Die bemannte Einheit war mit zwei GBUs und zwei HARMs ausgestattet. Das lila und das blaue UAV verfügten jeweils über fünf HARMs, wobei das lila UAV zusätzlich drei SWARM-Slots hatte. Das braune UAV war mit sechs HARMs bestückt.

*Missionsziel und Nebenaufgaben*

Das Hauptziel bestand darin, das Zielobjekt nach Aufklärung und Bestätigung im manuellen Anflug zwischen **12:14:00 und 12:15:30 Uhr Simulationszeit** zu bekämpfen. Die Simulation startete um 12:00:00 Uhr, mit einer maximalen Missionsdauer von 17 Minuten. Aktionen nach 12:15:30 Uhr wurden nicht ausgewertet.

Zusätzlich mussten die Piloten während der **Ingress-Phase** 5–15 nautische Meilen (9,26–27,78 km) hinter den UAVs bleiben.

Das Distanzkriterium wurde gewählt, um eine realitätsnahe taktische Nebenbedingung des MUM-T-Szenarios abzubilden. Während der Ingress-Phase sollte die bemannte Führungsplattform in einem definierten Abstand hinter den UAVs bleiben, damit deren Schutz- und Aufklärungsfunktion erhalten bleibt. Dieses Kriterium wurde den Piloten bereits im Mission Briefing explizit vorgegeben und in die Gesamtbewertung des Missionserfolgs einbezogen. Es diente damit als objektives Maß für die taktisch korrekte Umsetzung der Missionsführung und für die unterstützende Wirkung des PAA.

Das Ende der Ingress-Phase wurde durch das Erreichen des Erkennungsbereichs der **S5_SA-17-Stellung** (vgl. Abbildung 6-27 - Abbildung 6-30) definiert, deren Position in allen Missionen konstant blieb. **Missionserfolg** wurde anhand folgender Kriterien bewertet:

- Zielobjekt im Zeitfenster ausgeschaltet.
- Einhaltung der Ingress-Distanz.
- Zeitpunkt des Ingress-Endes.

*Mission 1: Keine Assistenz*

Abbildung 6-27 zeigt die Ausgangslage der Experimentalmission ohne aktive Unterstützung durch den PAA. Links ist die Ansicht im Szenario-Editor dargestellt, rechts die Sicht des Piloten auf dem MHDD im Cockpit.

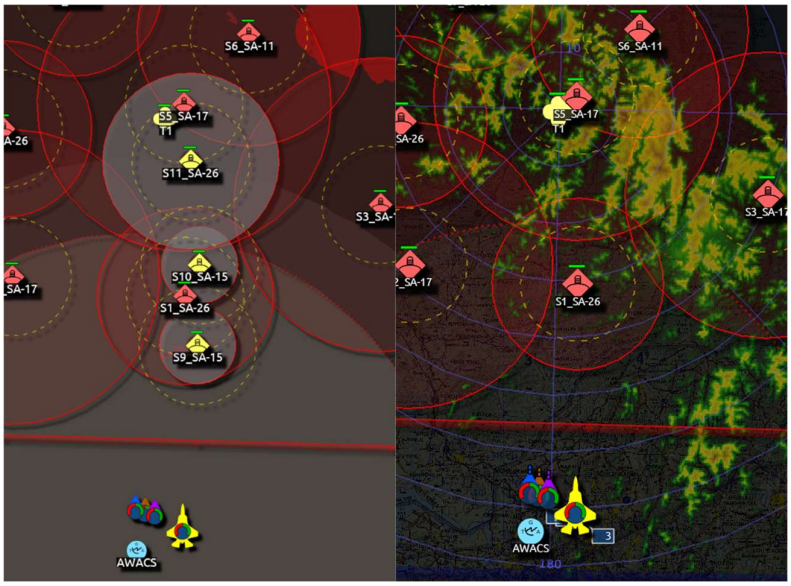



**Abbildung 6-27 Ausgangslage der Experimentalmission ohne Assistenz. Links Ansicht des Szenario-Editors und rechts Ansicht innerhalb des Cockpits**

Der Szenario-Editor dient zur Erstellung der Experimentalmissionen und bietet eine erweiterte Ansicht für den Ersteller. Die gelb markierten SAM-Stellungen (z. B. S9_SA-15, S10_SA-15) sind zu Beginn der Mission weder dem Piloten noch dem PAA bekannt. Sie erscheinen erst, wenn ein Teammitglied in deren Erkennungsbereich eindringt. Die Stellung S11_SA-26 wird erst dann sichtbar, wenn die Position S1_SA-26 erfolgreich bekämpft wurde. Das Zielobjekt, das in allen Missionen identisch ist, wird durch das gelb dargestellte Wolkensymbol T1 repräsentiert.

*Mission 2: Mittlere Assistenz*

Abbildung 6-28 zeigt die Ausgangslage mit aktivierter mittlerer Assistenzstufe.

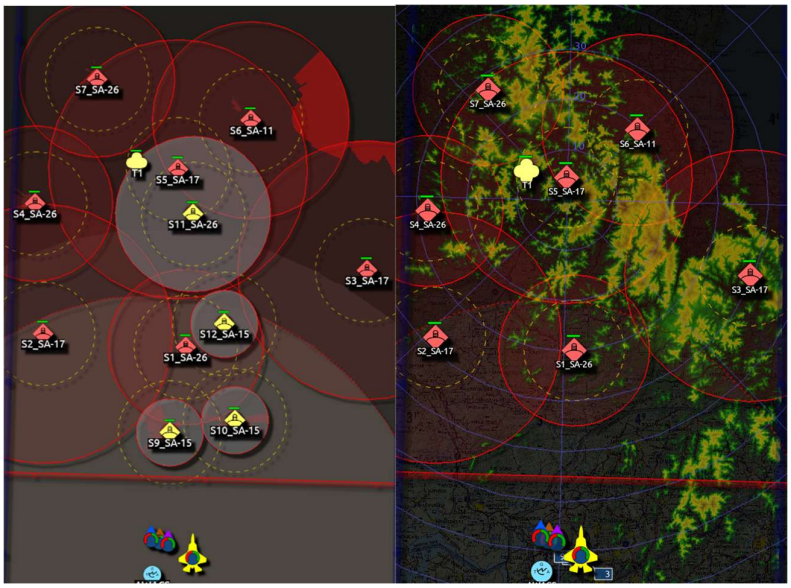



**Abbildung 6-28 Ausgangslage der Experimentalmission mit mittlerer Assistenz. Links Ansicht des Szenario-Editors und rechts Ansicht innerhalb des Cockpits**

Die SAM-Stellungen S9_SA-15, S10_SA-15 und S12_SA-15 erscheinen, sobald ein Teammitglied in deren Erkennungsbereich eindringt. Der PAA bietet in dieser Stufe gezielte Unterstützung, etwa durch Hinweise auf Bedrohungen oder taktische Empfehlungen, ohne jedoch vollständig zu übernehmen.

*Mission 3: Hohe Assistenz*

Abbildung 6-29 zeigt die Ausgangslage mit hoher Assistenz.

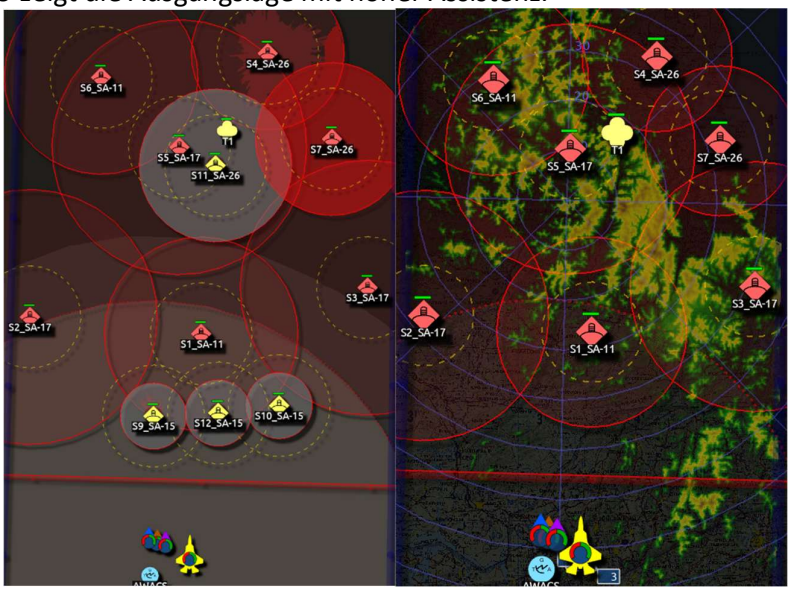



**Abbildung 6-29 Ausgangslage der Experimentalmission mit hoher Assistenz. Links Ansicht des Szenario-Editors und rechts Ansicht innerhalb des Cockpits**

Die Bedrohungen (S9_SA-15, S10_SA-15, S12_SA-15) erscheinen wie zuvor bei Eintritt in den Erkennungsbereich. Der PAA übernimmt in dieser Stufe deutlich mehr Aufgaben, etwa durch

automatische Vorschläge zur Zielpriorisierung oder Handlungsempfehlungen, die der Pilot bestätigen kann.

*Mission 4: Situationsangepasste Assistenz*

Abbildung 6-30 zeigt die Ausgangslage mit situationsangepasster Assistenz.

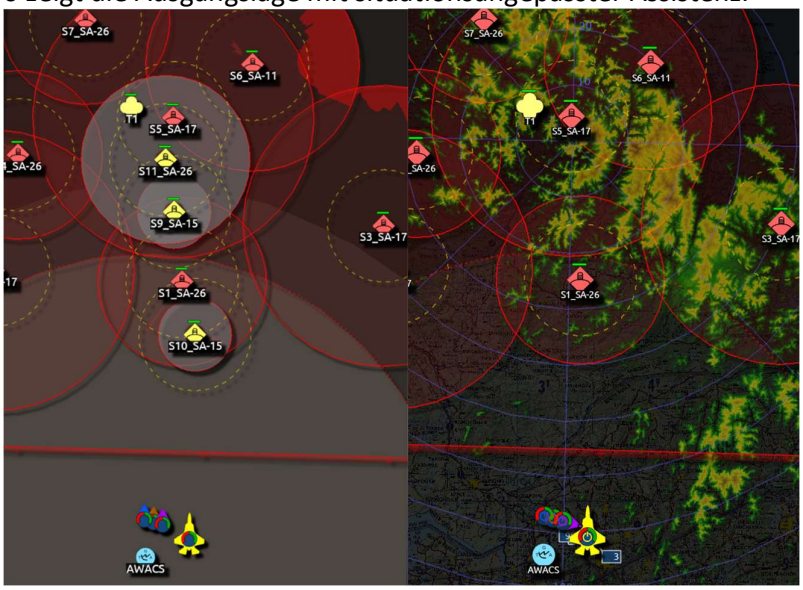



**Abbildung 6-30 Ausgangslage der Experimentalmission mit situationsangepasster Assistenz. Links Ansicht des Szenario-Editors und rechts Ansicht innerhalb des Cockpits**

Die SAM-Stellungen S9_SA-15 und S10_SA-15 erscheinen ebenfalls bei Eintritt in deren Erkennungsbereich. Die Assistenzstufe wird dynamisch je nach Situation angepasst.

## 6.6 Experimentalergebnisse

Dieses Kapitel präsentiert die Ergebnisse des Experiments zur Validierung der Assistenzfähigkeiten des PAA. Zunächst werden die Daten zur Zielerreichung und zu den Nebenaufgaben vorgestellt. Anschließend folgen die Leistungskennzahlen zur Bewertung der Effektivität und Effizienz der Interaktion zwischen Pilot und PAA. Daraufhin werden die Ergebnisse zur mentalen WL und zur SA analysiert. Im Anschluss werden die Resultate der Fragebögen zur Benutzerfreundlichkeit und Bedienbarkeit des Systems dargestellt. Abschließend erfolgt eine Auswertung des TiA-Fragebogens sowie der Akzeptanz des PAA während der Missionsdurchführung. Ergänzend wird eine qualitative Analyse der Freitextantworten und des subjektiven Feedbacks vorgenommen, bevor alle Ergebnisse zusammengefasst werden.

### 6.6.1 Missionserfolg

Abbildung 6-31 zeigt den Missionserfolg aller Piloten über vier Missionen, Abbildung 6-32 die Einhaltung der Ingress-Distanzen. Die Einhaltung der Ingress-Distanz wurde dabei als eigenständiges Bewertungskriterium herangezogen, da sie neben der Zielerreichung eine anwendungsnahe taktische Nebenanforderung des MUM-T-Szenarios abbildet und damit zusätzliche Rückschlüsse auf die Effektivität des PAA bei der Unterstützung von Teamkoordination und taktischer Missionsführung erlaubt.

| | P1 | P2 | P3 | P4 | P5 | P6 | P8 | P9 | P10 | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| Missions-erfolg | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 1 | 1 | 0 | 0 | Keine Assistenz |
| | 0 | 1 | 0 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | Mittlere Assistenz |
| | 0 | 0 | 0 | 0 | 1 | 1 | 1 | 0 | 1 | Hohe Assistenz |
| | 0 | 0 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | Situationsangepasste Assistenz |

**Abbildung 6-31 Heat Map zur Darstellung des Missionserfolgs für alle Piloten und Assistenzstufen (0 = kein Erfolg, 1 = Erfolg)**

| | P1 | P2 | P3 | P4 | P5 | P6 | P8 | P9 | P10 | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| Distanz eingehalten | 1 | 0 | 1 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | Keine Assistenz |
| | 0 | 0 | 1 | 1 | 1 | 0 | 0 | 0 | 0 | Mittlere Assistenz |
| | 1 | 0 | 1 | 1 | 1 | 0 | 0 | 0 | 1 | Hohe Assistenz |
| | 0 | 0 | 1 | 1 | 1 | 0 | 0 | 0 | 0 | Situationsangepasste Assistenz |

**Abbildung 6-32 Heat Map zur Darstellung der eingehaltenen Distanzen für alle Piloten und Assistenzstufen (0 = Distanzen nicht eingehalten, 1 = Distanzen eingehalten)**

In der Referenzmission ohne PAA-Unterstützung erreichten nur 2 von 9 Piloten das Ziel im vorgegebenen Zeitfenster, ebenso viele hielten die geforderte Distanz zu den UAVs ein. Mit **mittlerer Assistenz** stieg die Erfolgsquote auf 7 von 9, wobei 3 Piloten die Distanz einhielten. Bei **hoher Assistenz** sank die Erfolgsquote auf 4, jedoch hielten 5 Piloten die Distanz ein. Die **situationsangepasste Assistenz** führte wie die mittlere zu 7 erfolgreichen Missionen, aber ebenfalls nur 3 Piloten hielten die Distanz vollständig ein.

Hauptursache für Misserfolg war meist die **Überschreitung des Zeitlimits**. In zwei Fällen wurde ein Pilot durch eine SAM-Stellung abgeschossen.

Diese Ergebnisse zeigen, dass insbesondere mittlere und situationsangepasste Assistenz die Erfolgsrate deutlich steigern konnten.

Abbildung 6-33 zeigt die Dauer der Nichteinhaltung der Ingress-Distanz:

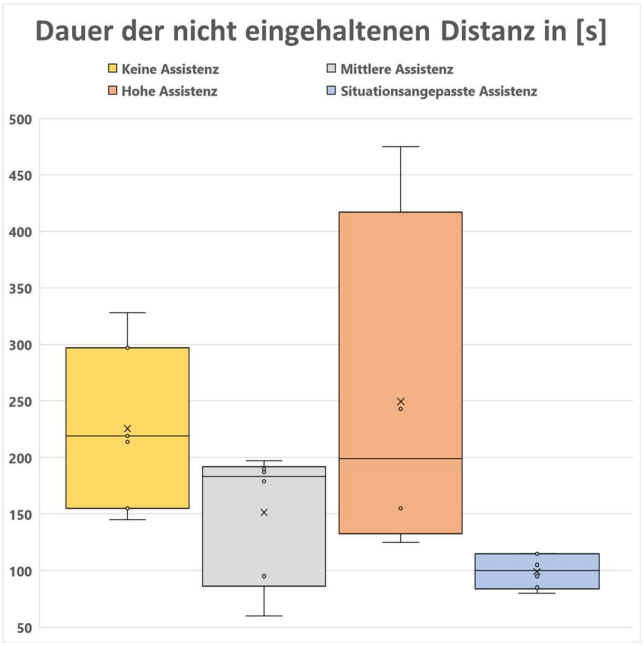



**Abbildung 6-33 Boxplot zur Dauer der nicht eingehaltenen Distanz zu den UAVs in [s]**

- **Keine Assistenz:** Ø 225,4 s (Min: 145 s, Max: 328 s)
- **Mittlere Assistenz:** Ø 151,3 s (Min: 60 s, Max: 197 s)
- **Hohe Assistenz:** Ø 249,5 s (Min: 125 s, Max: 475 s)
- **Situationsangepasste Assistenz:** Ø 99,2 s (Min: 80 s, Max: 115 s)

Obwohl bei hoher Assistenz mehr Piloten die Distanz einhielten, war die Dauer der Abweichung bei den übrigen deutlich länger. Ursache war oft, dass Änderungen im Missionsplan nicht rechtzeitig bemerkt wurden – ein Punkt, der auch in den Freitextantworten mehrfach genannt wurde.

Abbildung 6-34 zeigt die Zeitpunkte des Endes der Ingress-Phase:

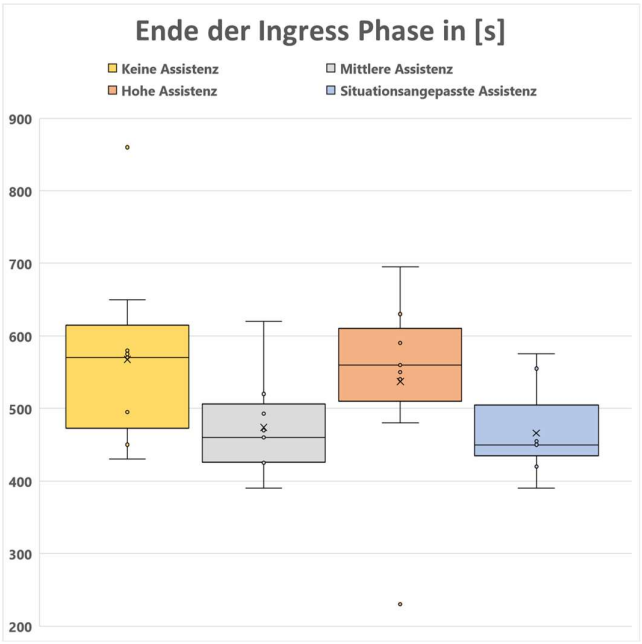



**Abbildung 6-34 Boxplot zum Ende der Ingress Phase in [s]**

- **Keine Assistenz:** Ø 567,4 s (Min: 430 s, Max: 860 s)
- **Mittlere Assistenz:** Ø 473,9 s (Min: 390 s, Max: 620 s)
- **Hohe Assistenz:** Ø 537,2 s (Min: 230 s, Max: 695 s)
- **Situationsangepasste Assistenz:** Ø 466,1 s (Min: 390 s, Max: 575 s)

Die mittlere und situationsangepasste Assistenz führten zu einer deutlich schnelleren Beendigung der Ingress-Phase. Bei hoher Assistenz war keine klare Verbesserung gegenüber der Referenzmission erkennbar.

Insgesamt korrelieren die Ergebnisse zur Ingress-Zeit und Distanzabweichung stark mit dem Missionserfolg (vgl. Abbildung 6-31). Die besten Ergebnisse wurden mit mittlerer und situationsangepasster Assistenz erzielt.

### 6.6.2 Performance-Indikatoren der Interaktion

Abbildung 6-35 zeigt die Anzahl der vom PAA generierten (vgl. 6.2.2 und 6.2.3), bearbeiteten und angenommenen Assistenzmeldungen – getrennt nach Lageänderungen und Plananpassungen.

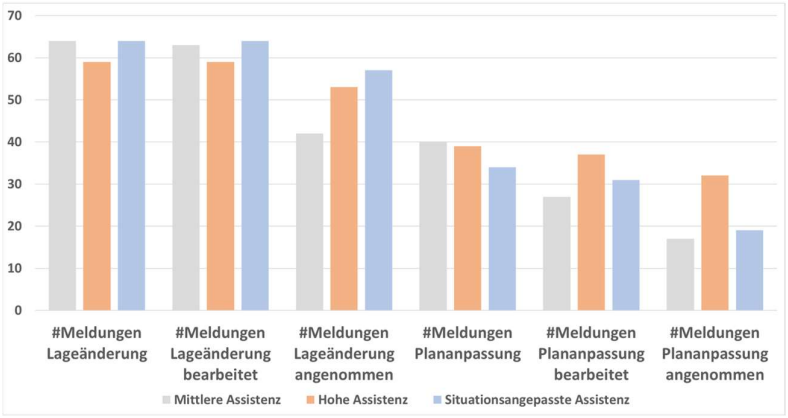



**Abbildung 6-35 Balkengrafik für die Anzahl der Meldungen, der Anzahl der bearbeiteten und Anzahl der angenommenen Meldungen bzgl. Lageänderung oder Plananpassungen**

*Meldungen bei Lageänderung*

Diese beziehen sich auf Situationen gemäß dem Abschnitt 6.2.2. Bei allen drei Assistenzstufen wurde eine ähnliche Anzahl an Meldungen generiert:

- **Mittlere und situationsangepasste Assistenz:** je 64
- **Hohe Assistenz: 59**

Im Mittel bearbeiteten die Piloten alle Meldungen. Die Annahmequoten lagen bei:

- **Mittlere Assistenz:** 62,5 % (Ø 7 generiert, 7 bearbeitet, 4,7 angenommen)
- **Hohe Assistenz:** 90 % (Ø 6,6 generiert/bearbeitet, 5,9 angenommen)
- **Situationsangepasst:** 89 % (Ø 7,1 generiert/bearbeitet, 6,3 angenommen)

Ein Pilot lehnte auf mittlerer Assistenzstufe alle Meldungen ab, da er bewusst einen riskanteren Weg wählte („Ich wollte sehen, wie das System reagiert“). Ohne diesen Ausreißer läge die Annahmequote bei über 80 %.

*Meldungen bei Plananpassung*

Diese beziehen sich auf die in Kapitel 6.2.3 beschriebenen Dialoge. Auch hier war die Anzahl der generierten Meldungen ähnlich:

- **Mittlere Assistenz:** 40
- **Hohe Assistenz: 39**
- **Situationsangepasst:** 34

Die **mittlere Assistenzstufe** zeigte:

- Ø 4,4 generierte, 3 bearbeitete, 1,9 angenommene Meldungen
- Bearbeitungsquote: 67,5 %
- Annahmequote: 63 %

Ein Pilot bearbeitete keine der 11 Meldungen, da er sie nicht wahrgenommen hatte.

Bei der **hohen Assistenzstufe:**

- Ø 4,3 generiert, 4,1 bearbeitet, 3,6 angenommen
- Bearbeitungsquote: 94,9 %
- Annahmequote: 86,5 %

Bei der **situationsangepassten Assistenz:**

- Ø 3,8 generiert, 3,4 bearbeitet, 2,1 angenommen
- Bearbeitungsquote: 91,2 %
- Annahmequote: 61,3 %

Die hohe Annahmequote bei der **hohen Assistenz** erklärt sich dadurch, dass die Piloten hier nur das Ergebnis bewerten mussten, während bei mittlerer und situationsangepasster Assistenz zusätzliche Schritte zur Prüfung und Bestätigung erforderlich waren.

Bei der **mittleren** und **situationsangepassten Assistenz** mussten die Piloten zunächst bestätigen, dass sie den vom PAA vorgeschlagenen Plan sehen wollten. Anschließend erfolgte eine Prüfung auf Sinnhaftigkeit und Machbarkeit. Diese zusätzlichen Schritte führten zu längeren Bearbeitungszeiten, da die Piloten den neuen Plan mit ihrem eigenen vergleichen und bewerten mussten. Einige lehnten Plananpassungen ab, da ihnen die Prüfung zu zeitaufwendig erschien – in mehreren Fällen wurden die Vorschläge jedoch kurz darauf manuell umgesetzt, was auf inhaltliche Übereinstimmung mit dem PAA-Plan hindeutet.

Tabelle 6-1 zeigt die Mittelwerte und Standardabweichungen der Zeitdifferenzen für Meldungen aufgrund von Lageänderungen:

**Tabelle 6-1 Zeitdifferenzen gesendet/gesehen/bearbeitet für Meldungen aufgrund von Lageänderung**

| Assistenzstufe | Δ (gesendet-gesehen) [s] | Δ (bearbeitet-gesehen) [s] | Δ (bearbeitet-gesendet) [s] |
|---|---|---|---|
| **Mittlere** | 2,95 ± 4,39 | 4,97 ± 8,89 | 7,92 ± 10,15 |
| **Hohe** | 3,18 ± 9,15 | 3,63 ± 3,15 | 6,81 ± 9,40 |
| **Situationsangepasst** | 2,74 ± 4,55 | 4,25 ± 4,40 | 6,99 ± 6,89 |

Die Mittelwerte liegen bei allen Stufen nahe beieinander. Auffällig ist jedoch die höhere Streuung bei der mittleren Assistenz, insbesondere beim Intervall „bearbeitet–gesehen“. Dies deutet auf eine größere Varianz im Bearbeitungsverhalten hin, was durch die komplexeren Dialoge und Prüfprozesse auf dieser Stufe erklärbar ist (vgl. Kapitel 6.2.3).

Tabelle 6-2 zeigt die Zeitdifferenzen für Meldungen aufgrund von Plananpassungen:

**Tabelle 6-2 Zeitdifferenzen gesendet/gesehen/bearbeitet für Meldungen aufgrund von Plananpassungen**

| Assistenzstufe | Δ (gesendet-gesehen) [s] | Δ (bearbeitet-gesehen) [s] | Δ (bearbeitet-gesendet) [s] |
|---|---|---|---|
| **Mittlere** | 1,77 ± 4,01 | 10,33 ± 9,96 | 12,10 ± 10,45 |
| **Hohe** | 4,13 ± 5,27 | 7,25 ± 11,49 | 11,38 ± 13,59 |
| **Situationsangepasst** | 2,36 ± 2,65 | 13,09 ± 19,43 | 15,45 ± 19,64 |

Hier zeigt sich ein klareres Bild: Die **Bearbeitungszeit** war bei mittlerer und besonders bei situationsangepasster Assistenz deutlich höher als bei hoher Assistenz. Grund dafür ist, dass bei mittlerer und situationsangepasster Assistenz die Piloten aktiv in die Bewertung und Auswahl der Plananpassung eingebunden waren, während bei hoher Assistenz die Änderungen automatisch durchgeführt wurden und nur noch bestätigt werden mussten (vgl. Abschnitt 6.2.3).

Die **beste Performance** hinsichtlich Bearbeitungszeit und Annahmequote zeigte der PAA bei Plananpassungen auf der **hohen Assistenzstufe**. Allerdings ist zu berücksichtigen, dass diese Stufe durch die geringere Interaktion strukturell im Vorteil war. Zudem hatte ein Pilot auf mittlerer Assistenzstufe keine einzige Meldung bearbeitet, da er sie nicht wahrgenommen hatte – was die Statistik verzerrt.

Trotz der höheren Effizienz der hohen Assistenzstufe zeigen die Ergebnisse der Fragebögen zu **Benutzerfreundlichkeit und Vertrauen** (vgl. Kapitel 6.6.3 und 6.6.5) ein differenzierteres Bild: Die mittlere und situationsangepasste Assistenz wurden dort insgesamt positiver bewertet.

### 6.6.3 Benutzerfreundlichkeit des Planungsassistenzagenten

Dieses Kapitel stellt die Ergebnisse zur Benutzerfreundlichkeit des PAA dar. Es werden die Auswertungen des **UEQ**, **CSUQ** und **SUS** erläutert sowie allgemeine Rückmeldungen zur Bedienbarkeit diskutiert.

*Auswertung UEQ Fragebogen*

Abbildung 6-36 – Abbildung 6-39 zeigen die Ergebnisse in den Dimensionen **Effizienz**, **Klarheit**, **Zuverlässigkeit** und **Nützlichkeit**, jeweils nach Assistenzstufen sortiert.

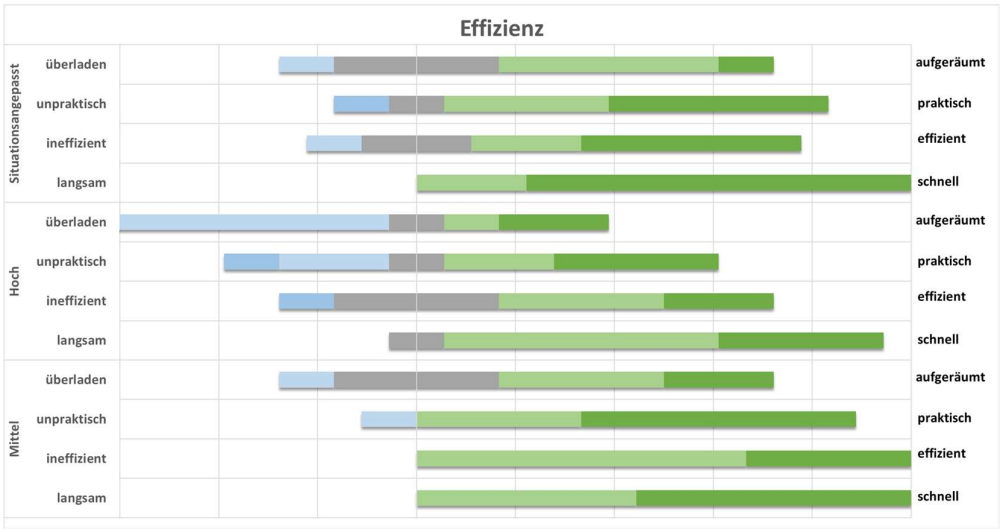



**Abbildung 6-36 Auswertung UEQ: Effizienz**

- **Effizienz:**
  Die **mittlere Assistenzstufe** erhielt durchweg die besten Bewertungen (z. B. „praktisch“, „schnell“, „aufgeräumt“), dicht gefolgt von der **situationsangepassten Assistenz**. Die **hohe Assistenzstufe** wurde hingegen als weniger effizient wahrgenommen – trotz ihrer objektiv schnelleren Bearbeitungszeiten (vgl. Abschnitt 6.6.2).

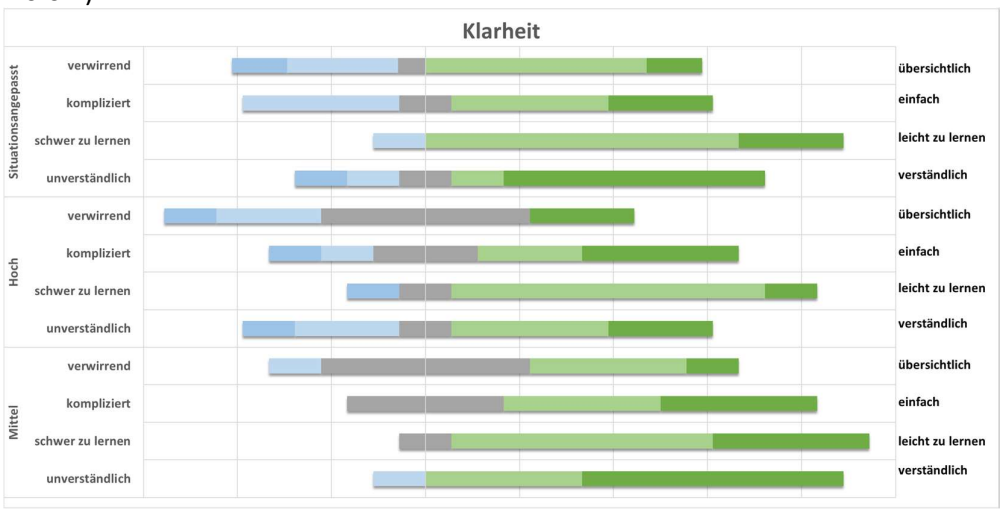



**Abbildung 6-37 Auswertung UEQ: Klarheit**

- **Klarheit:**
  Auch hier schnitt die mittlere Assistenzstufe am besten ab. Einige Piloten berichteten jedoch, dass bei umfangreichen Plänen oder Optimierungsvorschlägen (z. B. zur Risikostufe) die Übersicht verloren ging. Die hohe Assistenzstufe wurde als weniger transparent empfunden, insbesondere wenn der PAA eigenständig Änderungen vornahm.

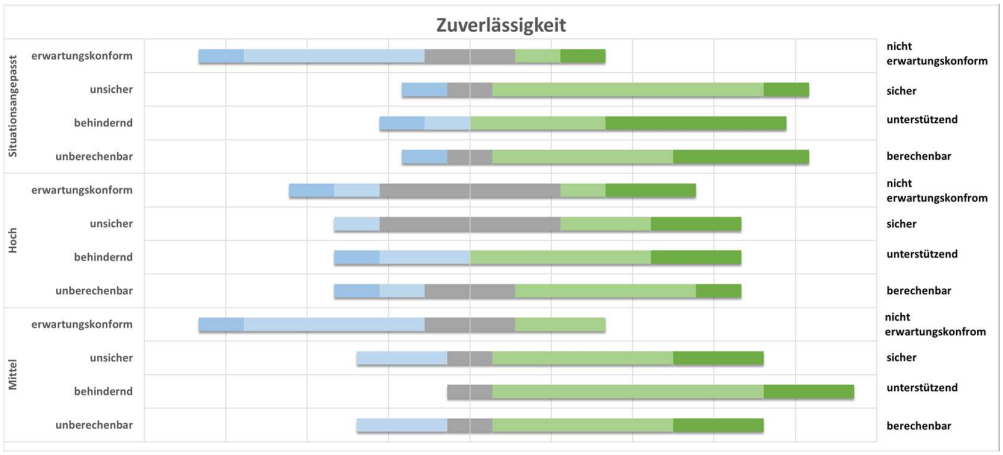



**Abbildung 6-38 Auswertung UEQ: Zuverlässigkeit**

- **Zuverlässigkeit:**
  Die mittlere und situationsangepasste Assistenz wurden als **erwartungskonform**, **sicher** und **unterstützend** bewertet. Dies ist besonders relevant für Systeme in sicherheitskritischen Umgebungen. Die hohe Assistenzstufe wurde hier etwas kritischer gesehen.

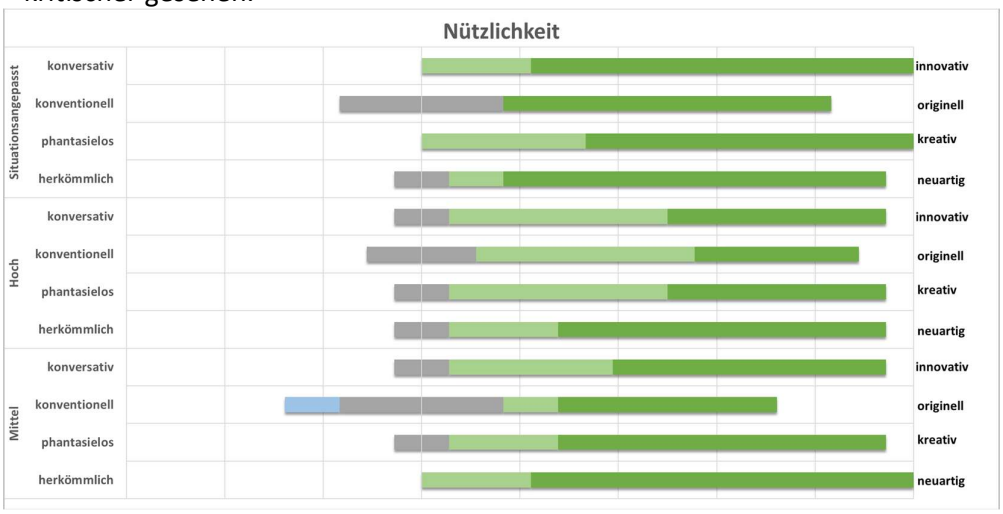



**Abbildung 6-39 Auswertung UEQ: Nützlichkeit**

- **Nützlichkeit:**
  Alle Assistenzstufen wurden als **innovativ**, **originell** und **kreativ** wahrgenommen. Ein Pilot bewertete die mittlere Stufe leicht konservativer mit dem Hinweis: „Ich hab das ja jetzt schon zwei Mal benutzt.“

Die mittlere und situationsangepasste Assistenzstufe wurden insgesamt am positivsten bewertet. Die hohe Assistenzstufe zeigte Verbesserungspotenzial hinsichtlich Klarheit und Effizienz. Die Ergebnisse deuten auf eine gute Integration des PAA in die Arbeitsabläufe der Piloten hin.

*Auswertung CSUQ Fragebogen*

Die vollständige Auswertung ist in den Anhängen T bis V dokumentiert.

- **Allgemeine Bedienbarkeit:**
  Der PAA wurde auf allen Stufen als **leicht bedienbar** und **hilfreich** für die Auftragserfüllung bewertet. Einige Piloten fühlten sich bei der Nutzung – insbesondere bei mittlerer und hoher Assistenz – anfangs weniger wohl. Dieses Empfinden besserte sich jedoch im Verlauf der Missionsdurchführungen.
- **Elernbarkeit:**
  Besonders die mittlere Assistenzstufe wurde als **leicht zu erlernen** und **schnell produktiv nutzbar** eingeschätzt. Die hohe und situationsangepasste Assistenz erhielten ebenfalls gute, aber leicht schwächere Bewertungen.
- **Interface und Informationsdarstellung:**
  Die Gestaltung und Informationsaufbereitung des Interfaces wurden überwiegend positiv bewertet – insbesondere bei der mittleren Assistenzstufe. Bei der Frage nach **klaren Problemlösungshinweisen** und **Fehlerkorrekturmöglichkeiten** waren die Meinungen gemischt.

Die Piloten bewerteten den PAA insgesamt als **einfach zu bedienen**, **effizient** und **gut in ihre Arbeitsabläufe integrierbar**. Besonders die **mittlere Assistenzstufe** erhielt durchweg die höchsten Zustimmungswerte – sie wurde als **benutzerfreundlich**, **leicht erlernbar** und **effektiv** wahrgenommen. Das Vertrauen in das System wuchs mit zunehmender Nutzung.

Die Gestaltung und Informationsaufbereitung des Interfaces wurde ebenfalls positiv hervorgehoben. Die benötigten Informationen waren für die meisten Piloten **leicht zugänglich** und **hilfreich** bei der Auftragsdurchführung.

Allerdings gab es **geteilte Meinungen** zur Klarheit der Problemlösungshinweise und zur Möglichkeit, **Fehler einfach zu korrigieren**. Diese Aspekte wurden auf allen Assistenzstufen als **verbesserungswürdig** eingestuft.

Um die **Akzeptanz und Zufriedenheit** weiter zu steigern, sollten insbesondere die **Transparenz der Assistenzmeldungen**, die **Nachvollziehbarkeit von Planänderungen** sowie die **Fehlerkorrekturmöglichkeiten** systematisch verbessert werden – unabhängig von der gewählten Assistenzstufe.

*Auswertung SUS Fragebogen*

Abbildung 6-40 und Abbildung 6-41 zeigen die Ergebnisse des SUS-Fragebogens zur allgemeinen Benutzerfreundlichkeit des PAA.

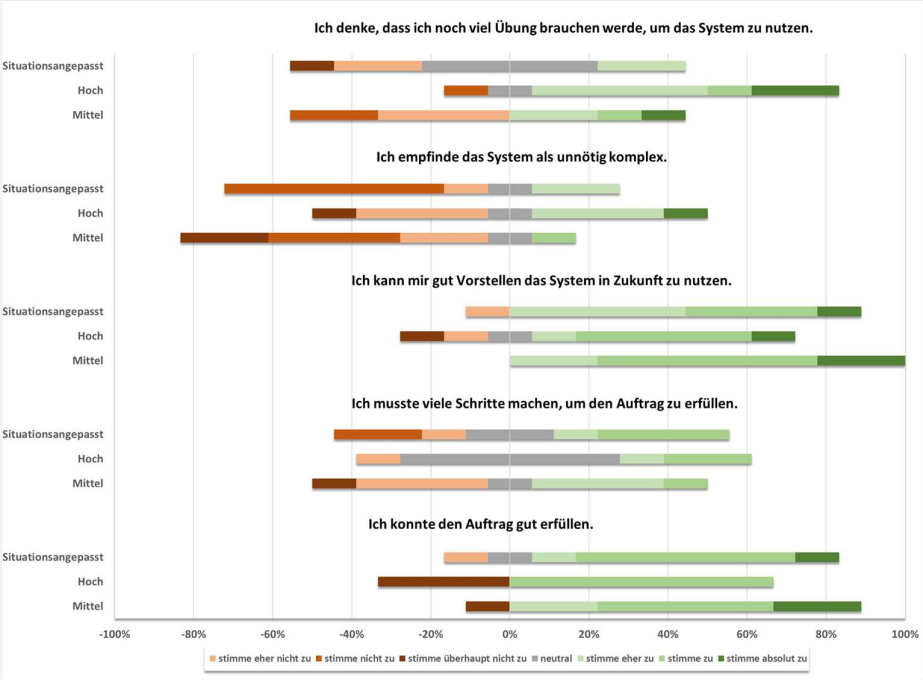



**Abbildung 6-40 Auswertung SUS Teil 1**

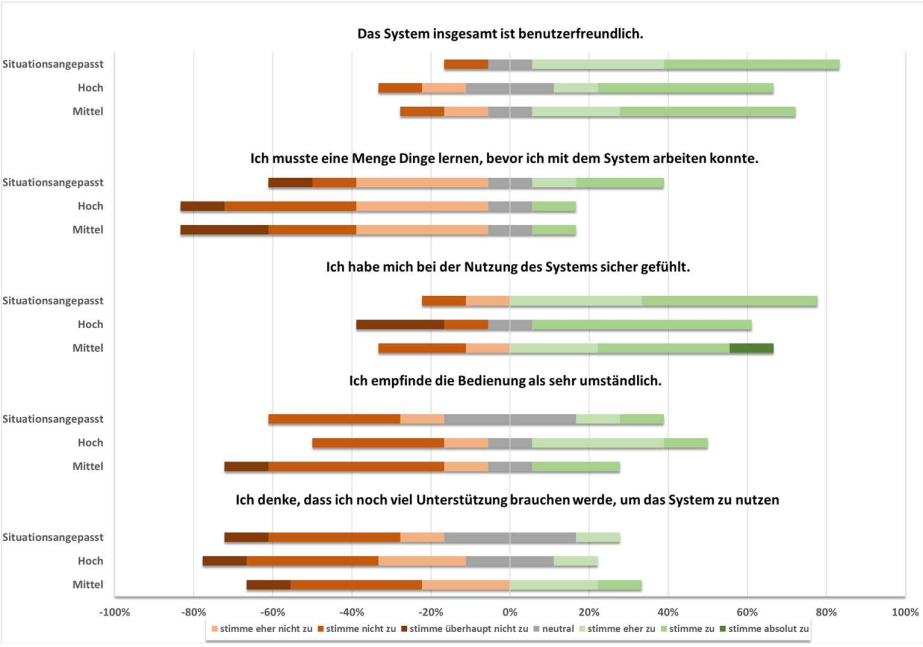



**Abbildung 6-41 Auswertung SUS Teil 2**

- Insgesamt wurde der PAA auf allen drei Assistenzstufen als **benutzerfreundlich** bewertet.
- Die Aussage „Ich denke, dass ich noch viel Übung brauchen werde, um das System zu nutzen“ erhielt bei der **hohen Assistenzstufe** die höchste Zustimmung. Dies deutet darauf hin, dass automatisierte Systeme generell eine gewisse Einarbeitung erfordern.
- Die **mittlere** und **situationsangepasste Assistenzstufe** wurden nicht als unnötig komplex empfunden.

- Die Aussage „Ich musste viele Schritte machen, um den Auftrag zu erfüllen“ wurde bei mittlerer und situationsangepasster Assistenz häufiger bestätigt – was mit den zusätzlichen Interaktionsschritten bei Plananpassungen (vgl. Abschnitt 6.2.3) übereinstimmt.
- Die **hohe Assistenzstufe** wurde hier neutral bewertet, da sie meist nur eine Bestätigung erforderte.

Trotz dieser Unterschiede waren sich fast alle Piloten einig, dass sie den PAA auch in Zukunft nutzen möchten und sich bei der Bedienung **sicher fühlten**. Die Mehrheit war zudem der Meinung, dass sie **nicht viel Unterstützung** benötigen würden, um das System zu verwenden.

Der SUS-Fragebogen bestätigt eine insgesamt **hohe Benutzerfreundlichkeit**, wobei die effektive Nutzung – insbesondere bei hoher Automatisierung – **gewisse Übung** erfordert.

*Auswertung allgemeiner Fragebogen zur Benutzerfreundlichkeit und Planverständnis*

Abbildung 6-42 zeigt die Ergebnisse eines Fragebogens, der das **Verständnis der Planänderungen** und der **Assistenzmeldungen** durch den PAA untersuchte.

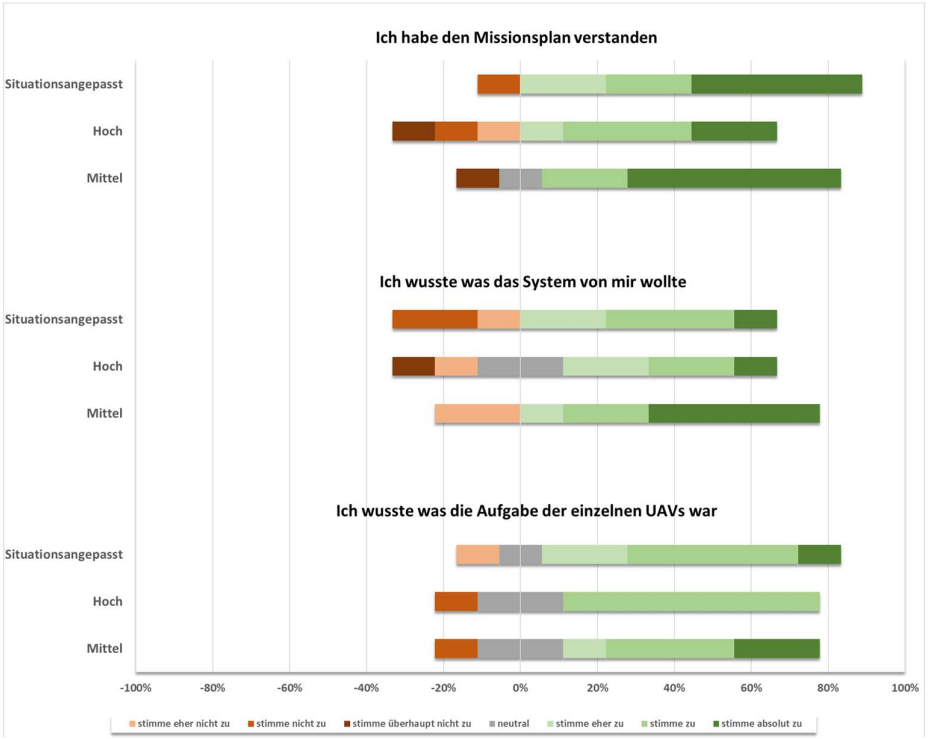



**Abbildung 6-42 Auswertung allgemeiner Fragebogen zur Benutzerfreundlichkeit und Planverständnis**

- Besonders auf der **mittleren Assistenzstufe** war den Piloten klar, welche Änderungen vorgenommen wurden, welche Absicht der PAA verfolgte und welche Aufgaben den UAVs zugewiesen waren.
- Bei der **hohen** und **situationsangepassten Assistenz** war dies nicht immer der Fall. Grund: geringere Kommunikationstiefe – insbesondere bei automatischen Änderungen ohne vorherige Rücksprache (vgl. Abschnitt 6.2.3).

Abbildung 6-43 zeigt die abschließende Bewertung der **Benutzerfreundlichkeit auf einer Skala von 1 bis 10**:

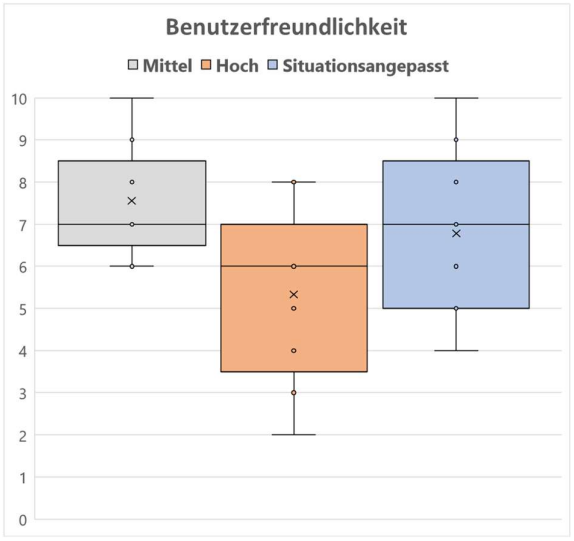



**Abbildung 6-43 Auswertung allgemeine Benutzerfreundlichkeit**

- Die **mittlere** und **situationsangepasste Assistenzstufe** erhielten die besten Bewertungen.
- Die **hohe Assistenzstufe** schnitt am schlechtesten ab – was mit der geringeren Transparenz und Kommunikation korrespondiert.
- Diese Ergebnisse stimmen mit den Bewertungen zum **Missionserfolg** (vgl. Abschnitt 6.6.1) überein, bei denen die mittlere und situationsangepasste Assistenz ebenfalls am besten abschnitten.

Die mittlere Assistenzstufe überzeugte durch **klare Kommunikation** und **gutes Planverständnis**, während die hohe Assistenzstufe durch ihre reduzierte Interaktion als weniger benutzerfreundlich wahrgenommen wurde.

### 6.6.4 Workload und Situationsbewusstsein

Abbildung 6-44 zeigt die Ergebnisse des **NASA-TLX** (links) zur WL und des **SART-Fragebogens** (rechts) zur SA.

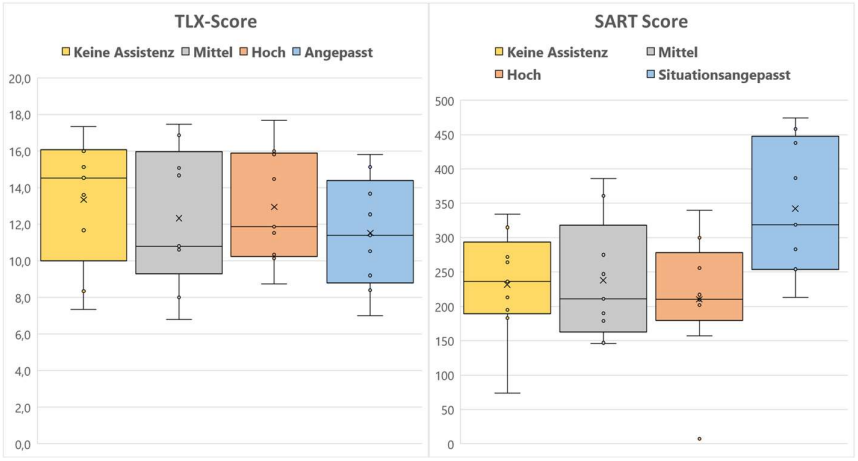



**Abbildung 6-44 Auswertung des NASA-TLX (links) und SART Fragebogens (rechts)**

Die **NASA-TLX-Auswertung** zeigt, dass keine der Assistenzstufen die wahrgenommene WL im Vergleich zur Mission ohne Assistenz signifikant reduzieren konnte. Dies deutet auf den insgesamt hohen Schwierigkeitsgrad der Missionen hin – ein Eindruck, der auch in Freitextantworten und Interviews bestätigt wurde.

Im Gegensatz dazu zeigt die **SART-Auswertung** eine deutliche Verbesserung des Situationsbewusstseins bei der **mittleren** und insbesondere der **situationsangepassten Assistenzstufe**. Trotz gleichbleibender WL konnten die Piloten mit Unterstützung des PAA ihr SA-Niveau besser aufbauen und aufrechterhalten. Bei der **hohen Assistenzstufe** lag der SART-Score hingegen unter dem Wert der Mission ohne Assistenz – was auf eine geringere Einbindung der Piloten in den Entscheidungsprozess hindeutet (vgl. Abschnitt 6.6.1).

Abbildung 6-45 zeigt ergänzend die subjektive Einschätzung der **wahrgenommenen WL** (links) und der **Fähigkeit zur Aufrechterhaltung der SA** (rechts), basierend auf einer Skala von 1 bis 10.

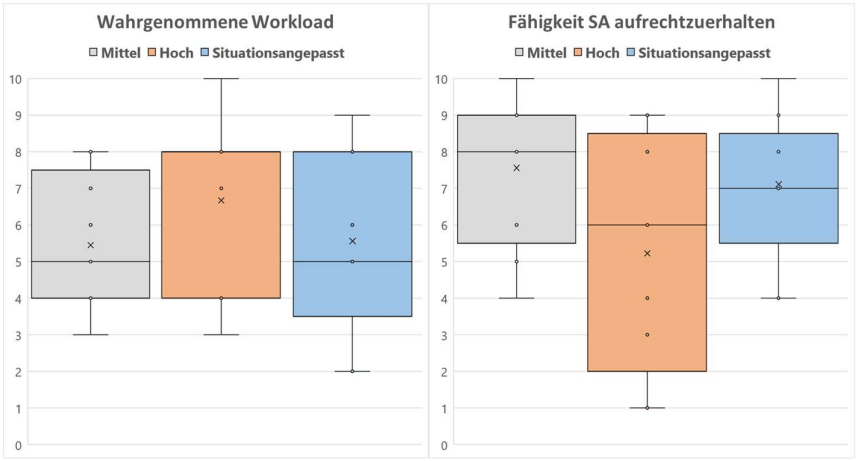



**Abbildung 6-45 Auswertung der Fragebögen zur wahrgenommenen Workload und der Fähigkeit die SA aufrechtzuerhalten**

Auch hier zeigt sich:

- Die **WL** wurde auf allen Stufen als hoch empfunden, mit leicht erhöhten Werten bei der hohen Assistenzstufe.
- Die **SA** wurde bei mittlerer und situationsangepasster Assistenz am besten bewertet. Die strukturierte Führung durch Planoptimierungsschritte (vgl. Abschnitt 6.2.3) half den Piloten, den Überblick zu behalten und die Planlogik besser zu verstehen.

Diese Einschätzungen wurden durch **Freitextantworten** und **Blickbewegungsanalysen** gestützt, die zeigten, dass die aktive Einbindung in den Entscheidungsprozess das Situationsbewusstsein förderte – insbesondere bei mittlerer und situationsangepasster Assistenz.

### 6.6.5 Vertrauen, Akzeptanz und bevorzugte Assistenzstufe

Die Ergebnisse des **TiA-Fragebogens** (Anhänge W – Z) zeigen, dass die Piloten dem PAA insgesamt ein **hohes Vertrauen** entgegenbrachten. Am höchsten war dieses Vertrauen bei der **mittleren Assistenzstufe**, gefolgt von der **situationsangepassten** und schließlich der **hohen Assistenzstufe**.

Auf allen Stufen stimmten die Piloten mehrheitlich zu, dass der PAA die Situation korrekt einschätzen, zuverlässig arbeiten und komplexe Aufgaben übernehmen konnte. Kritischer wurde jedoch die **kontinuierliche Information über den Systemzustand** bewertet – insbesondere bei der hohen Assistenzstufe. Dies deutet auf **Verbesserungsbedarf in der Kommunikation und Darstellung von Assistenzmeldungen** hin.

Abbildung 6-46 und Abbildung 6-47 zeigen die Ergebnisse zur **allgemeinen Akzeptanz** des PAA.

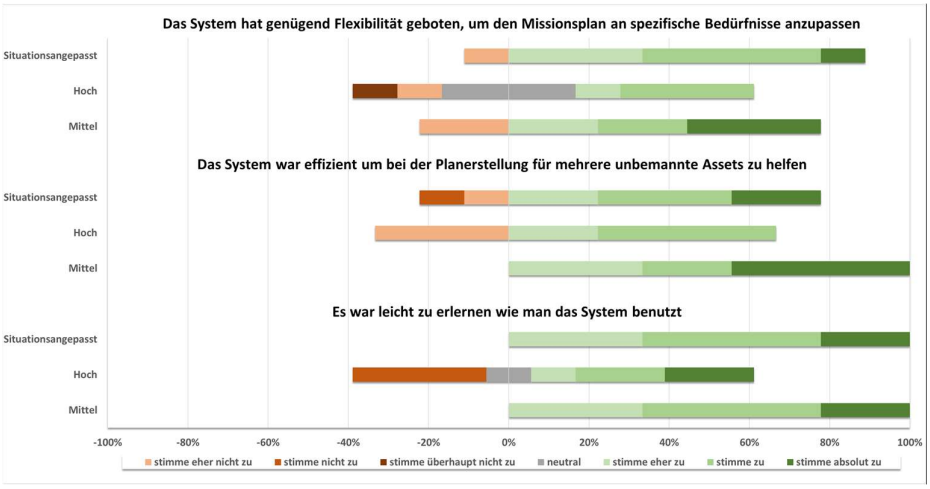



**Abbildung 6-46 Auswertung allgemeiner Fragebogen zur Akzeptanz des PAA Teil 1**

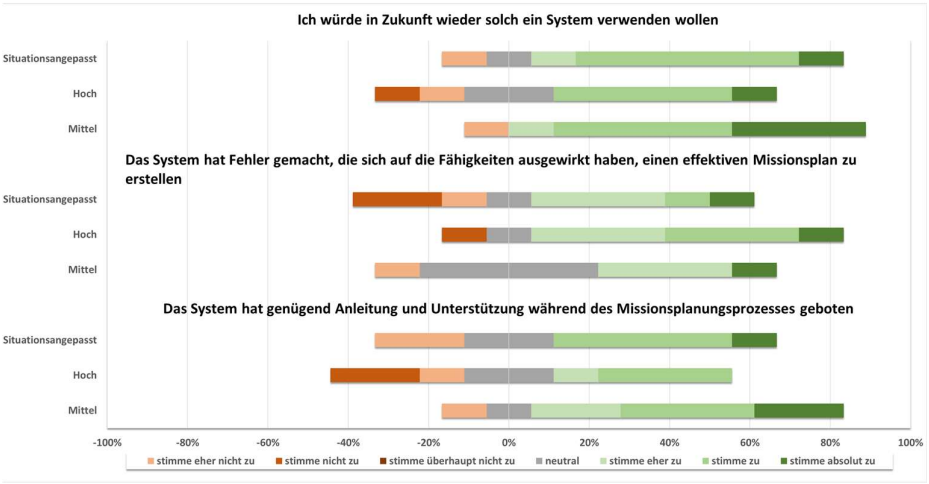



**Abbildung 6-47 Auswertung allgemeiner Fragebogen zur Akzeptanz des PAA Teil 2**

Besonders die **mittlere Assistenzstufe** erhielt hohe Zustimmung hinsichtlich **Erlernbarkeit**, **Effizienz** und **Flexibilität** bei Plananpassungen. Auf allen Stufen äußerten die Piloten grundsätzlich die Bereitschaft, ein System wie den PAA auch zukünftig nutzen zu wollen. Gleichzeitig wurde jedoch – insbesondere bei der hohen Assistenz – angemerkt, dass der PAA gelegentlich **Fehler machte**, die die Planqualität beeinträchtigten.

Abbildung 6-48 verdeutlicht, dass Vertrauen und Akzeptanz stark mit den Ergebnissen aus den Bereichen **Benutzerfreundlichkeit**, **Workload**, **Situational Awareness** und **Missionserfolg** (vgl. Kapitel 6.6.1 – 6.6.4) korrelieren.

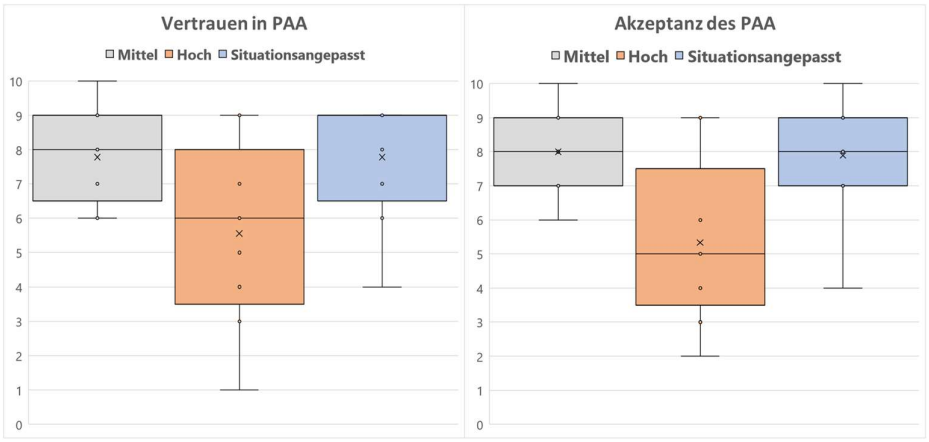



**Abbildung 6-48 Auswertung der Fragebögen zum Vertrauen in den PAA (links) und der Akzeptanz des PAA (rechts)**

Die mittlere und situationsangepasste Assistenzstufe schnitten hier durchweg am besten ab. Die hohe Assistenzstufe wurde zwar als entlastend empfunden, aber auch als weniger transparent und kontrollierbar.

Abbildung 6-49 zeigt die **bevorzugte Assistenzstufe**.

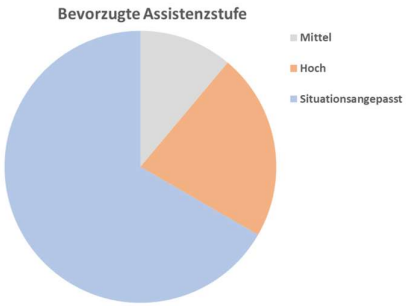



**Abbildung 6-49 Auswertung zur bevorzugten Assistenzstufe**

Zwei Drittel der Piloten entschieden sich für die **situationsangepasste Assistenz** – im Einklang mit den positiven Bewertungen in den anderen Kategorien. Überraschend war, dass einige Piloten trotz der besseren Erfolgsraten bei mittlerer Assistenz die **hohe Assistenzstufe bevorzugten**. Diese Entscheidung wurde damit begründet, dass sie sich auf die automatisierten Entscheidungen des PAA verlassen konnten und sich nicht mit den einzelnen Optimierungsschritten auseinandersetzen mussten. Die **geringere Interaktion** wurde hier als Vorteil empfunden.

### 6.6.6 Subjektives Feedback und Freitextantworten

Die Auswertung der offenen Fragen zeigt ein differenziertes Bild der Wahrnehmung der Assistenzstufen durch die Piloten:

- **Mittlere Assistenzstufe:** Wurde geschätzt, da sie den Piloten die Möglichkeit bot, vorgeschlagene Pläne vor der Umsetzung zu prüfen. Diese Transparenz stärkte das Vertrauen in das System.

- **Hohe Assistenzstufe:** Führte bei einigen Piloten zu Vertrauensverlust, da Änderungen automatisch vorgenommen wurden und Entscheidungsprozesse schwer nachvollziehbar waren.

*Auswirkungen auf SA*

- Die **mittlere Assistenz** förderte die SA, da alle Aktionen eine Bestätigung erforderten und die Piloten aktiv eingebunden waren.
- Die **hohe Assistenz** reduzierte die SA, da viele Prozesse im Hintergrund abliefen und nicht transparent kommuniziert wurden.

*Auswirkungen auf WL*

- **Hohe Automatisierung** erhöhte teilweise die WL, da Piloten Zeit benötigten, um Systemverhalten und Planänderungen nachzuvollziehen.
- Eine **ausgewogene Assistenz** wurde hingegen als entlastend empfunden und half, die WL zu reduzieren.

*Wahrnehmung der Anpassungsfähigkeit*

- Die **situationsangepasste Assistenz** wurde meist als nützlich wahrgenommen, da sie flexibel auf die Lage reagierte.
- **Hohe Automatisierung** wurde hingegen gelegentlich als störend empfunden, wenn unerwünschte Änderungen vorgenommen wurden.

*Verbesserungsvorschläge*

- Viele Piloten wünschten sich eine **manuelle Eingriffsmöglichkeit**, z. B. durch einen Override-Button.
- Zudem wurde eine **bessere Übersichtlichkeit und Nachvollziehbarkeit** bei der Aufgabenplanung angeregt.

Die Mehrheit der Piloten bevorzugte eine **ausgewogene Automatisierung**, die **klare Informationen bietet** und **manuelle Kontrolle ermöglicht**. Die hohe Assistenzstufe wurde zwar als entlastend, aber auch als **weniger transparent** und **weniger vertrauenswürdig** wahrgenommen. Die mittlere Assistenzstufe förderte das Situationsbewusstsein, konnte jedoch durch die zusätzlichen Interaktionsschritte die WL erhöhen.

### 6.6.7 Zusammenfassung

In diesem Experiment wurden die Assistenzfähigkeiten des PAA auf drei Stufen untersucht. Anhand von Fragebögen sowie der Analyse von Missions- und Nebenzielerreichung wurden die Assistenzstufen umfassend bewertet.
Die Ergebnisse zeigen, dass ohne Assistenz nur wenige Piloten die Missionsziele fristgerecht und vollständig erreichten. Mit mittlerer und situationsangepasster Assistenz stieg der Missionserfolg deutlich. Die hohe Assistenzstufe hingegen führte häufig zu Verzögerungen, da Systemänderungen von den Piloten nicht rechtzeitig erkannt wurden.

Die Anzahl der generierten Meldungen war auf allen Stufen ähnlich, jedoch variierte die Akzeptanzrate. Die mittlere Stufe wies die niedrigste Akzeptanz auf, teils durch bewusste Ablehnung eines Piloten. Bei Plananpassungen war die Annahmequote bei hoher Assistenz am höchsten, da weniger Überprüfung nötig war. Die mittlere Stufe erforderte mehr Kontrolle, was zu längeren Bearbeitungszeiten führte.

In Bezug auf Benutzerfreundlichkeit schnitten mittlere und situationsangepasste Assistenz am besten ab. Die hohe Stufe zeigte Schwächen, insbesondere bei der Darstellung von Meldungen. Viele Piloten berichteten, dass sie Meldungen zu spät oder gar nicht wahrnahmen, besonders bei komplexen Plänen.

Der NASA-TLX-Score zeigte keine signifikante Reduktion der WL durch Assistenz. Der SART-Score hingegen belegte eine verbesserte SA bei mittlerer und situationsangepasster Assistenz. Die hohe Stufe schnitt hier sogar schlechter ab als keine Assistenz.

Laut TiA-Fragebogen hatten die Piloten insgesamt hohes Vertrauen in den PAA, besonders bei mittlerer Assistenz. Kritik gab es an der Systemtransparenz und Darstellung der Assistenzmeldungen. Die Akzeptanz war bei mittlerer Stufe am höchsten. Trotz hoher Akzeptanz wurden auch Fehler des PAA genannt, die bei hoher Assistenz die Planung beeinträchtigten.

Insgesamt korrelieren Missionserfolg, Benutzerfreundlichkeit und Vertrauen stark. Zwei Drittel der Piloten bevorzugten die situationsangepasste Assistenz, da sie den Automatisierungsgrad und die Ergebnisse positiv bewerteten. Einige bevorzugten dennoch die hohe Stufe wegen des geringeren Interaktionsaufwands.

Die Ergebnisse zeigen, dass mittlere und situationsangepasste Assistenzstufen den größten positiven Einfluss auf Missionserfolg, SA, Vertrauen und Akzeptanz hatten. Keine Stufe reduzierte jedoch die WL signifikant. Die hohe Assistenzstufe zeigte gemischte Resultate und geringere Akzeptanz. Insgesamt bevorzugten die Piloten eine ausgewogene Automatisierung mit klarer Informationsdarstellung und manuellen Eingriffsmöglichkeiten.

# 7 Zusammenfassung und Ausblick

In dieser Arbeit wurde das Konzept, die Integration in einen Kampfflugzeugsimulator und die experimentelle Untersuchung eines kognitiven Mixed-Initiative-Planungsagenten vorgestellt. Ziel dieses Planungsassistenzsystems ist es, den Nutzer – in diesem Fall die Piloten eines Kampfflugzeugs – bei der Missionsvor- und -umplanung während des Einsatzes in einem Team aus bemannten und unbemannten Einheiten zu unterstützen. Diese Unterstützung umfasst beispielsweise das Vorschlagen von Planalternativen, Planoptimierungen und das Einfügen bzw. Entfernen von Aufgaben im Plan des Piloten. Daraus ergeben sich spezifische Systemeigenschaften wie Eigeninitiative und die Verfolgung des Arbeitsziels. Dieses Planungsassistenzsystem erfordert keine Bedienung durch den Nutzer und ist ihm nicht hierarchisch untergeordnet, sondern steht ihm kooperativ und gleichberechtigt zur Seite.

Damit der Planungsagent diesen Aufgaben gerecht werden kann, benötigt er ähnliche planerische Fähigkeiten wie ein Mensch. Da klassische hybride Planungsmethoden bei hochdynamischen Problemen – wie sie bei militärischen Luftoperationen auftreten – an ihre Grenzen stoßen, wurde beschlossen, die Erstellung von Missionsplänen und die daraus resultierenden Assistenzfälle auf mehreren Ebenen zu verteilen und verschiedene Lösungsansätze zu kombinieren. Hierbei kommen klassische KI-Planungsmethoden und Algorithmen, modellbasierte Ansätze, Optimierungs- und Suchalgorithmen sowie Scheduling zum Einsatz.

Der Planungsagent und seine Kommunikationsfähigkeiten wurden in einem Kampfflugzeugsimulator integriert, getestet und in einer mehrwöchigen Experimentalkampagne ausgiebig evaluiert. Hierbei wurden zwei Experimente durchgeführt: eines zur Validierung der Planungsfähigkeiten des Planungsagenten und eines zur Überprüfung der Assistenzfähigkeiten sowie der zugehörigen Kommunikation mit den Piloten im Cockpit. Die Ergebnisse zeigten, dass das System valide und erfolgreich durchführbare Missionspläne erstellen kann. Auch die Assistenz- und Kommunikationsfähigkeiten des Planungsagenten erhielten eine sehr positive Bewertung. Der Einsatz des Planungsagenten konnte die Erfolgsrate und das Situationsbewusstsein der Piloten bei der Missionsdurchführung deutlich steigern.

Es gab auch kritische Rückmeldungen, was Potenzial für Verbesserungen und weitere Forschung im Bereich der kognitiven Missionsplanungsassistenz aufzeigt. Eine Möglichkeit besteht darin, die Planungsfähigkeiten des Systems durch lernende Verfahren zu verbessern und anzupassen, um beispielsweise die zu geringe Berücksichtigung der Bewegungsfreiheit im Zielgebiet des Teams zu beheben. Durch Reinforcement Learning könnte dem Planungsagenten beigebracht werden, welche Pläne bzw. Aktionen mit Belohnung oder Bestrafung versehen werden, um so die gewünschten Aspekte bei der Planung besser zu berücksichtigen (Moerland et al., 2022). Darüber hinaus gibt es Verbesserungspotenzial bei der Darstellung und Salienz einzelner Meldungen und der Kommunikation des Assistenzsystems mit dem Piloten.

Eine Möglichkeit zur Weiterentwicklung des hier vorgestellten Planungsassistenzagenten ist die Erweiterung der Unterstützung von einem Bediener auf zwei oder mehr Bediener. Ein erstes Konzept zum sogenannten Cloud-Based-Planning wurde in (Maier & Schulte, 2022) vorgestellt und in (Maier & Schulte, 2023) evaluiert. Hierbei haben mehrere Piloten

gleichzeitigen und gleichberechtigten Zugriff auf alle verfügbaren unbemannten Teammitglieder. Das Ergebnis war, dass das Konzept des Cloud-Based-Planning an sich zielführend und vielversprechend sein kann, jedoch die Umsetzung verbessert werden muss und dieses Konzept noch in den Köpfen der Piloten verankert werden muss. Ein neues Darstellungs- und Interaktionskonzept wird in (Knieper, 2024) vorgestellt. Dieses Konzept sieht mehrere Schritte vor, darunter eine Erweiterung von der Führung der unbemannten Teammitglieder und der Planerstellung durch Task-Based Guidance zu Effect-Based Guidance. Ein Effekt stellt hierbei den physischen und verhaltensbezogenen Zustand eines dar, welcher durch eine oder mehrere Handlungen oder einen anderen Effekt verursacht wird (Curtis E. Lemay Center, 2016). Dabei werden nicht einzelne Aufgaben oder Taktiken an das Team delegiert, sondern Effekte, die auf ein bestimmtes Objekt wirken sollen. Der Bediener wählt hierbei ein Zielobjekt, den gewünschten Effekt und die Art der Optimierung (risiko-, zeit-, ressourcen- oder allgemeinoptimiert). Die Auswahl der entsprechenden Taktiken, Einzelaufgaben und Abhängigkeiten zwischen den Aufgaben wird dabei vom Planungsassistenzagenten getroffen. Dieses Interaktions- und Darstellungskonzept wurde mit fünf Piloten der deutschen Luftwaffe diskutiert und verfeinert. In Kombination mit den Fähigkeiten des Planungsassistenzagenten, der für Multi-User-Planung und Multi-User-Assistenz erweitert werden muss, stellt dies ein vielversprechendes und zielführendes Konzept zur Realisierung des Cloud-Based-Plannings dar.

Die Anwendung eines solchen Planungsassistenzsystems ist auch in anderen Bereichen denkbar, beispielsweise in der Koordination und dem Einsatz von Rettungskräften im Katastrophenschutz. Durch die Berücksichtigung von Echtzeitdaten, wie der Ausbreitung eines Feuers oder den Auswirkungen einer Überschwemmung, könnte ein Agent die Allokation von Ressourcen wie Feuerwehrautos, Krankenwagen und Rettungsteams optimieren, um einen effizienten Einsatz der Ressourcen und die Sicherheit des Personals zu gewährleisten. In (Schurr et al., 2005) wird der Einsatz von Multi-Agenten-Systemen im Katastrophenmanagement untersucht. Eine angepasste Version des hier vorgestellten Planungsassistenzsystems könnte auch autonome Fahrzeugflotten, die für Mitfahr- oder Lieferdienste eingesetzt werden, nutzen. Das Assistenzsystem würde das Routing, die Aufgabenzuweisung und die Einsatzplanung unter Berücksichtigung der Verkehrsbedingungen, der Fahrzeugverfügbarkeit und der Betriebsrisiken verwalten, um die Effizienz und Sicherheit der Dienste zu verbessern. In (Li et al., 2023) werden Einblicke in die Nutzung von autonomen Systemen für das Verkehrsmanagement gegeben.

# Literaturverzeichnis

Abbott, T.S. (1993) Functional categories for future flight deck designs. NASA Technical Memorandum NASA-TM-109005. Hampton, VA: NASA Langley Research Center.

Allen, J. & Ferguson, G. (2002) Human-Machine Collaborative Planning. In: Proceedings of the Third International NASA Workshop on Planning and Scheduling for Space, Houston, TX, 27-29 October 2002.

Allen, J.E., Guinn, C.I. & Horvitz, E. (1999) Mixed-initiative interaction. IEEE Intelligent Systems and Their Applications, 14 (5), pp. 14-23. https://doi.org/10.1109/5254.796083

Alter, K.W. & Regal, D.M. (1992) Definition of the 2005 flight deck environment. NASA Contractor Report NASA-CR-4479. Hampton, VA: NASA Langley Research Center.

Anderson, M. (ed.) (2013) Contemporary Ergonomics and Human Factors 2013. Boca Raton, FL: CRC Press / Taylor & Francis. 468 pp.

Bainbridge, L. (1983) Ironies of automation. Automatica, 19 (6), pp. 775-779. https://doi.org/10.1016/0005-1098(83)90046-8.

Bautz, J. (2023) Erweiterung situationsadaptiver Assistenz um des Situationsbewusstsein des Piloten zur Planung von MUM-T Missionen. Masterarbeit, Technische Universität München.

Behymer, K., Rothwell, C., Ruff, H., Patzek, M., Calhoun, G., Draper, M., ... & Lange, D. (2017). Initial evaluation of the intelligent multi-uxv planner with adaptive collaborative/control technologies (IMPACT) (No. AFRLRHWPTR20170011).

Bellman, R. (1966) Dynamic Programming. Science, 153 (3731), pp.34–37.

Bercher, P., & Biundo, S. (2012). A Heuristic for Hybrid Planning with Preferences. In *FLAIRS*.

Bercher, P., Höller, D., Behnke, G., & Biundo, S. (2016, August). More than a Name? On Implications of Preconditions and Effects of Compound HTN Planning Tasks. In ECAI (pp. 225-233).

Billings, C.E. (1997) Aviation Automation: The Search for a Human-Centered Approach. Mahwah, NJ: Lawrence Erlbaum Associates Publishers. xiv, 355 pp. ISBN 0805821260 / 0805821279.

Bolkcom, C. (2005). Military suppression of enemy air defenses (SEAD): Assessing future needs.

Bolton, M. L., Biltekoff, E., & Humphrey, L. (2021). The level of measurement of subjective situation awareness and its dimensions in the situation awareness rating technique (SART). IEEE Transactions on Human-Machine Systems, 52(6), 1147-1154.

Bourhis, P., Reutter, J. L., Suárez, F., & Vrgoč, D. (2017, May). JSON: data model, query languages and schema specification. In Proceedings of the 36th ACM SIGMOD-SIGACT-SIGAI symposium on principles of database systems (pp. 123-135).

Braarud, P. Ø. (2021). Investigating the validity of subjective workload rating (NASA TLX) and subjective situation awareness rating (SART) for cognitively complex human–machine work. International Journal of Industrial Ergonomics, 86, 103233.

Bradshaw, J.M., Feltovich, P.J., Jung, H., Kulkarni, S., Taysom, W. & Uszok, A. (2004) Dimensions of Adjustable Autonomy and Mixed-Initiative Interaction. In: Nickles, M., Rovatsos, M. & Weiss, G. (eds.) Agents and Computational Autonomy: Potential, Risks, and Solutions. Lecture Notes in Computer Science, vol. 2969. Berlin, Heidelberg: Springer, pp. 17-39.

Brailsford, S. C., Potts, C. N., & Smith, B. M. (1999). Constraint satisfaction problems: Algorithms and applications. European journal of operational research, 119(3), 557-581.

Brand, C., Ganian, R., Inerney, F.M. & Wietheger, S. (2024) A Structural Complexity Analysis of Hierarchical Task Network Planning. Available from: <https://arxiv.org/abs/2401.14174> [Accessed 22 March 2024].

Bray, T., Paoli, J., Sperberg-McQueen, C. M., Maler, E., & Yergeau, F. (1997). Extensible markup language (XML). *World Wide Web Journal*, *2*(4), 27-66.

Briston, R. J., & Liversidge, J. (1979). The Investment Decision Process. In A Practical Approach to Business Investment Decisions (pp. 1-23). London: Palgrave Macmillan UK.

Brooke, J. (1996) SUS: A “Quick and Dirty” Usability Scale. In: Jordan, P.W., Thomas, B., Weerdmeester, B.A. & McClelland, I.L. (eds.) Usability Evaluation in Industry. London: Taylor & Francis, pp. 189-194.

Brucker, P. (2004). Classification of scheduling problems. In *Scheduling Algorithms* (pp. 1-10). Berlin, Heidelberg: Springer Berlin Heidelberg.

Bundeswehr (2024a) Bombe GBU-54. Bundeswehr Ausrüstung und Bewaffnung. Available from: <https://www.bundeswehr.de/de/ausruestung-technik-bundeswehr/ausruestung-bewaffnung/bombe-gbu-54>
[Accessed 29 February 2024].

Bundeswehr (2024b) Fighter Ops: How is air mission planning carried out? Available from: <https://www.bundeswehr.de/en/preparation-and-planning-of-air-war-missions-5637736>
[Accessed 29 February 2024].

Burstein, M. H., & McDermott, D. V. (1996). Issues in the development of human-computer mixed-initiative planning. In Advances in Psychology (Vol. 113, pp. 285-303). North-Holland.

Cesta, A., Cortellessa, G., Oddi, A., & Policella, N. (2004). Studying decision support for MARS EXPRESS planning tasks: A report from the MEXAR experience. In Proceedings of the 4th International Workshop on Planning and Scheduling for Space, IWPSS (Vol. 4, pp. 23-25).

Chen, D., Yoon, H. J., Wan, Z., Alluru, N., Lee, S. W., He, R., ... & Cho, J. H. (2025). Advancing human-machine teaming: Concepts, challenges, and applications. arXiv preprint arXiv:2503.16518.

Chen, D. Z., & Bercher, P. (2022, June). Flexible FOND HTN planning: A complexity analysis. In Proceedings of the International Conference on Automated Planning and Scheduling (Vol. 32, pp. 26-34).

Chen, J. Y., & Barnes, M. J. (2014). Human–agent teaming for multirobot control: A review of human factors issues. IEEE Transactions on Human-Machine Systems, 44(1), 13-29.

Chen, J. Y., Barnes, M. J., Selkowitz, A. R., Stowers, K., Lakhmani, S. G., & Kasdaglis, N. (2016, March). Human-autonomy teaming and agent transparency. In Companion Publication of the 21st International Conference on Intelligent User Interfaces (pp. 28-31).

Chen, J. Y., Quinn, S., Wright, J., Barnes, M., Barber, D., & Adams, D. (2013, March). Human-agent teaming for robot management in multitasking environments. In 2013 8th ACM/IEEE International Conference on Human-Robot Interaction (HRI) (pp. 103-104). IEEE.

Chen, M. (2008). A greedy algorithm with forward-looking strategy. London, UK: INTECH Open Access Publisher.

Chen, Z., Albonico, M., & Malavolta, I. (2023). Automatic extraction of time-windowed ros computation graphs from ros bag files. arXiv preprint arXiv:2305.16405.

Cheng, D. C., & Thawonmas, R. (2004, November). Case-based plan recognition for real-time strategy games. In Proceedings of the Fifth Game-On International Conference (pp. 36-40).

Chiou, E. K., Holder, E., Dolgov, I., McDowell, K., Menthe, L., Roscoe, R. D., & Zaveri, S. (2020, December). Human, ai, robot teaming and the future of work: Barriers and opportunities for advancement. In Proceedings of the Human Factors and Ergonomics Society Annual Meeting (Vol. 64, No. 1, pp. 62-66). Sage CA: Los Angeles, CA: SAGE Publications.

Christensen, L. B., Johnson, B., Turner, L. A., & Christensen, L. B. (2011). Research methods, design, and analysis.

Clarke, J.-P. (2020) Human-machine teaming is key to the future of aerospace. Aerospace America. Available from: <https://aerospaceamerica.aiaa.org/year-in-review/human-machine-teaming-is-key-to-the-future-of-aerospace/> [Accessed 19 May 2025].

Cormen, T. H., Leiserson, C. E., Rivest, R. L., & Stein, C. (2022). Introduction to algorithms. MIT press.

Corn, G. P. (2016). Should the Best Offense Ever Be a Good Defense: The Public Authority to Use Force in Military Operations: Recalibrating the Use of Force Rules in the Standing Rules of Engagement. Vand. J. Transnat'l L., 49, 1.

Cummings, M.L. (2017) Automation bias in intelligent time critical decision support systems. In: Decision making in aviation. Routledge, pp.289–294.

Cummings, M. L., & Bauchwitz, B. (2024). Unreliable pedestrian detection and driver alerting in intelligent vehicles. IEEE Transactions on Intelligent Vehicles.Curtis E. Lemay Center (2016) The Effects-Based Approach to Operations (EBAO). , Air Force Doctrine Publication (AFDP) 3-0 Operations and Planning.

Douven, I. (2018). A Bayesian perspective on Likert scales and central tendency. Psychonomic bulletin & review, 25(3), 1203-1211.

Du, D., Ko, K. I., & Hu, X. (2012). Design and analysis of approximation algorithms (Vol. 62). New York: Springer.

Dudek, M., & Schulte, A. (2022). Meaningful guidance of unmanned aerial vehicles in dynamic environments. In Proceedings of the 1st International Conference on Cognitive Aircraft Systems (Vol. 1, pp. 10-14).

Crutchfield, J., Nikolic, D., & Manning, C. A. (1998). Francis T. Durso, Carla A. Hackworth, Todd R. Truitt. Air Traffic Control Quarterly, 6(1), 1-20.

Edelkamp, S. (2003). Limits and possibilities of PDDL for model checking software. Edelkamp, & Hoffmann (Edelkamp & Hoffmann, 2003).

Edelkamp, S., & Hoffmann, J. (2004). PDDL2. 2: The language for the classical part of the 4th international planning competition. Technical Report 195, University of Freiburg.

Eldakiky, H., & Du, D. H. (2018, March). Key-value pairs allocation strategy for kinetic drives. In 2018 IEEE Fourth International Conference on Big Data Computing Service and Applications (BigDataService) (pp. 17-24). IEEE.

Endsley, M. R. (2021). A systematic review and meta-analysis of direct objective measures of situation awareness: A comparison of SAGAT and SPAM. Human Factors: The Journal of the Human Factors and Ergonomics Society, 63(1), 124-150.

Endsley, M. R. (1988, October). Design and evaluation for situation awareness enhancement. In Proceedings of the Human Factors Society annual meeting (Vol. 32, No. 2, pp. 97-101). Sage CA: Los Angeles, CA: Sage Publications.

Endsley, M. R. (2001, November). Designing for situation awareness in complex systems. In Proceedings of the Second International Workshop on symbiosis of humans, artifacts and environment (pp. 1-14).

Endsley, M. R. (2017a). Direct measurement of situation awareness: Validity and use of SAGAT. In Situational awareness (pp. 129-156). Routledge.

Endsley, M. R. (1995a). Measurement of situation awareness in dynamic systems. Human factors, 37(1), 65-84.

Endsley, M. R. (1999, November). Situation awareness and human error: Designing to support human performance. In Proceedings of the high consequence systems surety conference (pp. 2-9).

Endsley, M. R. (2017b). Toward a theory of situation awareness in dynamic systems. In Situational awareness (pp. 9-42). Routledge.

Endsley, M. R., & Garland, D. J. (Eds.). (2000). Situation awareness analysis and measurement. CRC press.

Endsley, M. R., & Kaber, D. B. (1999). Level of automation effects on performance, situation awareness and workload in a dynamic control task. Ergonomics, 42(3), 462-492.

Endsley, M. R., Selcon, S. J., Hardiman, T. D., & Croft, D. G. (1998, October). A comparative analysis of SAGAT and SART for evaluations of situation awareness. In Proceedings of the human factors and ergonomics society annual meeting (Vol. 42, No. 1, pp. 82-86). Sage CA: Los Angeles, CA: Sage Publications.

Ferguson, G., & Allen, J. F. (1998, July). TRIPS: An integrated intelligent problem-solving assistant. In Aaai/Iaai (pp. 567-572).

Fikes, R., & Nilsson, N. J. (1993). STRIPS, a retrospective. Artificial intelligence, 59(1-2), 227-232.

Flórez, E., Gómez, W., & Bautista, L. (2013). An ant colony optimization algorithm for job shop scheduling problem. arXiv preprint arXiv:1309.5110.

Fredriksen, P.K. (2018) Interaction in Aerial Warfare: The Role of the Mission Commander in Composite Air Operations (COMAO). In: Interaction 'Samhandling' Under Risk: A Step Ahead of the Unforeseen. Cappelen Damm Akademisk/NOASP, pp.481–500.

Friedmann, J. (1967). A conceptual model for the analysis of planning behavior. Administrative Science Quarterly, 225-252.

Ferguson, G., Allen, J. F., & Miller, B. W. (1996, May). TRAINS-95: Towards a Mixed-Initiative Planning Assistant. In AIPS (pp. 70-77).

Georgievski, I., & Aiello, M. (2014). An overview of hierarchical task network planning. arXiv preprint arXiv:1403.7426.

Gerevini, A. E., Saetti, A., Serina, I., & Toninelli, P. (2004). LPG-TD: a fully automated planner for PDDL2. 2 domains. In Proceedings of the ICAPS System demonstration.

Aeronautiques, C., Howe, A., Knoblock, C., McDermott, I. D., Ram, A., Veloso, M., ... & Sun, Y. (1998). Pddl—the planning domain definition language. Technical Report, Tech. Rep.

Fox, M., & Long, D. (2003). PDDL2. 1: An extension to PDDL for expressing temporal planning domains. *Journal of artificial intelligence research*, *20*, 61-124.

Cooper, C. G. (2019). NATO rules of engagement: On ROE, self-defence and the use of force during armed conflict (Vol. 57). Brill.

Hart, P. E., Nilsson, N. J., & Raphael, B. (1968). A formal basis for the heuristic determination of minimum cost paths. IEEE transactions on Systems Science and Cybernetics, 4(2), 100-107.

Hart, S. G., & Staveland, L. E. (1988). Development of NASA-TLX (Task Load Index): Results of empirical and theoretical research. In Advances in psychology (Vol. 52, pp. 139-183). North-holland.

Haslum, P., Lipovetzky, N., Magazzeni, D., Muise, C., Brachman, R., Rossi, F., & Stone, P. (2019). An introduction to the planning domain definition language (Vol. 13, pp. 1-187). Morgan & Claypool Publishers.

Hayes-Roth, B., Hayes-Roth, F., Rosenchein, S. J., & Cammarata, S. (1979). Modeling Planning as an Incremental, Opportunistic Process (No. RANDN1178ONR).

Heilemann, F. (2022). Skalierbare Delegation und adaptive Planungsassistenz zur Führung bemannt-unbemannter Teams: Konzept, Implementierung und Evaluation. Verlag Dr. Hut. Dissertation, Universität der Bundeswehr München.

Heilemann, F., Schmitt, F., & Schulte, A. (2019). Mixed-initiative mission planning of multiple UCAVs from aboard a single seat fighter aircraft. In AIAA Scitech 2019 Forum (p. 2205).

Heilemann, F., & Schulte, A. (2019, January). Interaction concept for mixed-initiative mission planning on multiple delegation levels in multi-UCAV fighter missions. In International Conference on Intelligent Human Systems Integration (pp. 699-705). Cham: Springer International Publishing.

Heilemann, F., & Schulte, A. (2020, January). Time line based tasking concept for MUM-T mission planning with multiple delegation levels. In International Conference on Intelligent Human Systems Integration (pp. 1014-1020). Cham: Springer International Publishing.

Hendler, J. A., Tate, A., & Drummond, M. (1990). AI planning: Systems and techniques. AI magazine, 11(2), 61-61.

Höller, D., Behnke, G., Bercher, P., Biundo, S., Fiorino, H., Pellier, D., & Alford, R. (2020, April). HDDL: An extension to PDDL for expressing hierarchical planning problems. In Proceedings of the AAAI conference on artificial intelligence (Vol. 34, No. 06, pp. 9883-9891).

Hooker, J. N. (2004, September). A hybrid method for planning and scheduling. In International Conference on Principles and Practice of Constraint Programming (pp. 305-316). Berlin, Heidelberg: Springer Berlin Heidelberg.

Hoschka, P. (Ed.). (2021). Computers as assistants: A new generation of support systems. CRC Press.

Iba, W. (2006). Means–Ends Analysis. Encyclopedia of Cognitive Science.

IBM Corp. (2015). IBM ILOG CPLEX Optimization Studio: CPLEX user's manual (Version 12, Release 6).

Jain, V., & Grossmann, I. E. (2001). Algorithms for hybrid MILP/CP models for a class of optimization problems. INFORMS Journal on computing, 13(4), 258-276.

Johnson, D. (2008) Forced entry exercise tests students' planning, execution skills. Joint Base McGuire-Dix-Lakehurst. Available from: <https://www.jbmdl.jb.mil/News/Article-Display/Article/246124/forced-entry-exercise-tests-students-planning-execution-skills/> [Accessed 1 February 2024].

Johnson, M., Bradshaw, J. M., Feltovich, P. J., Jonker, C. M., Van Riemsdijk, M. B., & Sierhuis, M. (2014). Coactive design: Designing support for interdependence in joint activity. Journal of Human-Robot Interaction, 3(1), 43-69.

Joint Chiefs of Staff. (2004). Department of Defense dictionary of military and associated terms (Joint Publication 1-02; as amended through June 9, 2004).

Kaber, D. B., & Endsley, M. R. (1997). Out-of-the-loop performance problems and the use of intermediate levels of automation for improved control system functioning and safety. Process safety progress, 16(3), 126-131.

Kaber, D. B., & Endsley, M. R. (2004). The effects of level of automation and adaptive automation on human performance, situation awareness and workload in a dynamic control task. Theoretical issues in ergonomics science, 5(2), 113-153.

Keller, J. (2022) Lockheed Martin to redesign F-35 panoramic display electronics to blunt effects of component obsolescence. Military+Aerospace Electronics. Available from: <https://www.militaryaerospace.com/sensors/article/14276510/panoramic-display-f35-cockpit-avionics> [Accessed 31 January 2024].

Knieper, M. (2024) Entwicklung eines skalierbaren Konzepts zur simultanen und kooperativen Missionsplanerstellung mehrerer Piloten im Kontext Human-Autonomy-Teaming für moderne militärische Luftoperationen. Masterarbeit, Universität der Bundeswehr München.

Körber, M. (2018, August). Theoretical considerations and development of a questionnaire to measure trust in automation. In Congress of the International Ergonomics Association (pp. 13-30). Cham: Springer International Publishing.

Laugwitz, B., Held, T., & Schrepp, M. (2008, November). Construction and evaluation of a user experience questionnaire. In Symposium of the Austrian HCI and usability engineering group (pp. 63-76). Berlin, Heidelberg: Springer Berlin Heidelberg.

Lee, J. D., & See, K. A. (2004). Trust in automation: Designing for appropriate reliance. Human factors, 46(1), 50-80.

Lewis, J. R. (1995). IBM computer usability satisfaction questionnaires: psychometric evaluation and instructions for use. International Journal of Human-Computer Interaction, 7(1), 57-78.

Li, J., Yu, C., Shen, Z., Su, Z., & Ma, W. (2023). A survey on urban traffic control under mixed traffic environment with connected automated vehicles. Transportation research part C: emerging technologies, 154, 104258.

Lifschitz, V. (2019). Answer set programming (Vol. 3). Cham: Springer.

Lindner, S. (2022). Konzeption, Gestaltung und Evaluation eines Human-Autonomy-Teaming-Systems für militärische Luftoperationen. Verlag Dr. Hut. Dissertation, Univeristät der Bundeswehr München.

Sebastian, L., & Axel, S. (2024, May). Enhancing tactical military mission execution through human-AI collaboration: A view on air battle management systems. In 2024 IEEE 4th International Conference on Human-Machine Systems (ICHMS) (pp. 1-7). IEEE.

Longo, L., Wickens, C. D., Hancock, G., & Hancock, P. A. (2022). Human mental workload: A survey and a novel inclusive definition. Frontiers in psychology, 13, 883321.

Macenski, S., Foote, T., Gerkey, B., Lalancette, C., & Woodall, W. (2022). Robot operating system 2: Design, architecture, and uses in the wild. Science robotics, 7(66), eabm6074.

Maier, S., & Schulte, A. (2022). A Cloud-based approach for synchronous multi-pilot multi-UAV mission plan generation in a MUM-T environment. In AIAA SCITECH 2022 Forum (p. 2345).

Maier, S., & Schulte, A. (2023). Experimental Evaluation of Cloud-Based Synchronous Mult-Pilot Multiuav Mission Plan Generation in a MUM-T Environment. In 22nd International Symposium on Aviation Psychology.

Maier, S., Tschurtschenthaler, K. & Schwerd, S. (2024) Abschlussbericht OpFoCo Projekt M/GSP0/IA012/IA912 Operative Forderung Cockpit-Konfiguration für Multi-UCAV (Unmanned Combat Aerial Vehicles) Fighter Missions. Projektbericht. Professur für Flugmechanik & Flugführung der Univeristät der Bundeswehr München.

Mariampolski, H. (2001). Qualitative market research. SAGE Publications, Inc., https://doi.org/10.4135/9781412985529.

Maymí, F. J., & Thomson, R. (2018, June). Human-machine teaming and cyberspace. In International Conference on Augmented Cognition (pp. 299-315). Cham: Springer International Publishing.

Miller, C., Funk, H., Wu, P., Goldman, R., Meisner, J., & Chapman, M. (2005, September). The Playbook™ approach to adaptive automation. In Proceedings of the human factors and ergonomics society annual meeting (Vol. 49, No. 1, pp. 15-19). Sage CA: Los Angeles, CA: Sage Publications.

Pribram, K. H., Miller, G. A., & Galanter, E. (1960). Plans and the structure of behavior. New York.

Moerland, T. M., Broekens, J., Plaat, A., & Jonker, C. M. (2022). A unifying framework for reinforcement learning and planning. Frontiers in Artificial Intelligence, 5, 908353.

Muggleton, S., & De Raedt, L. (1994). Inductive logic programming: Theory and methods. The Journal of Logic Programming, 19, 629-679.

Nareyek, A., Freuder, E. C., Fourer, R., Giunchiglia, E., Goldman, R. P., Kautz, H. & Tate, A. (2005). Constraints and AI planning. IEEE Intelligent Systems, 20(2), 62-72.

Nau, D. S., Au, T. C., Ilghami, O., Kuter, U., Murdock, J. W., Wu, D., & Yaman, F. (2003). SHOP2: An HTN planning system. Journal of artificial intelligence research, 20, 379-404.

Neumann, K. (1993). Dynamic programming basic concepts and applications. In Optimization in Planning and Operation of Electric Power Systems: Lecture Notes of the SVOR/ASRO Tutorial Thun, Switzerland, October 14–16, 1992 (pp. 31-56). Heidelberg: Physica-Verlag HD.

Fikes, R. E., & Nilsson, N. J. (1971). STRIPS: A new approach to the application of theorem proving to problem solving. Artificial intelligence, 2(3-4), 189-208.

North Atlantic Treaty Organization. (2016, April). Allied joint doctrine for air and space operations (AJP-3.3, Edition B, Version 1). NATO Standardization Office.

Nunnally, J. C. (7). Bernstein, IH (1994). Psychometric theory. New York: McGraw Hill. Pandemic school closures in Switzerland. Int J Psychol, 56(4), 566-576.

Parasuraman, R., & Manzey, D. H. (2010). Complacency and bias in human use of automation: An attentional integration. Human factors, 52(3), 381-410.

Parasuraman, R., & Riley, V. (1997). Humans and automation: Use, misuse, disuse, abuse. Human factors, 39(2), 230-253.

Parasuraman, R., Sheridan, T. B., & Wickens, C. D. (2000). A model for types and levels of human interaction with automation. IEEE Transactions on systems, man, and cybernetics-Part A: Systems and Humans, 30(3), 286-297.

Patten, M. L. (2016). Understanding research methods: An overview of the essentials. Routledge.

Pierce, R. S. (2012). The effect of SPAM administration during a dynamic simulation. Human factors, 54(5), 838-848.

Pinedo, M. (2002). Scheduling: Theory, Algorithms, and Systems.

Qi, C., Wang, D., Muñoz-Avila, H., Zhao, P., & Wang, H. (2017). Hierarchical task network planning with resources and temporal constraints. Knowledge-Based Systems, 133, 17-32.

Quandt, R. (2023). Human-AI Teaming: Review of the NAS Report. Human Factors in Robots, Drones and Unmanned Systems. AHFE.

Rieks, A. (2023) In: AFCEA 2023 BDSV - Bundesverband der Deutschen Sicherheits- und Verteidigungsindustrie. ProPress Verlagsgesellschaft mbH, pp.16–19. Available from: <https://www.behoerden-spiegel.de/wp-content/uploads/2023/05/AFCEA_Magazin_2023.pdf>.

Robb, D. A., Chiyah Garcia, F. J., Laskov, A., Liu, X., Patron, P., & Hastie, H. (2018, October). Keep me in the loop: Increasing operator situation awareness through a conversational multimodal interface. In Proceedings of the 20th ACM International Conference on Multimodal Interaction (pp. 384-392).

Roth, E. M., Hanson, M. L., Hopkins, C., Mancuso, V., & Zacharias, G. L. (2004, September). Human in the loop evaluation of a mixed-initiative system for planning and control of multiple UAV teams. In Proceedings of the Human Factors and Ergonomics Society Annual Meeting (Vol. 48, No. 3, pp. 280-284). Sage CA: Los Angeles, CA: SAGE Publications.

Ruder, S. (2016). An overview of gradient descent optimization algorithms. arXiv preprint arXiv:1609.04747.

Russel, S., Norvig, P., Russell, S.J., Davis, E. & Edwards, D. (2016) Artificial Intelligence: A Modern Approach. Third Edition // Third edition, Global edition. Boston and Columbus and Indianapolis and New York and San Francisco and Upper Saddle River and Amsterdam and Cape Town and Dubai and London and Madrid and Milan and Munich and Paris and Montreal and Toronto and Delhi and Mexico City and Sao Paulo and Sydney and Hong Kong and Seoul and Singapore and Taipei and Tokyo, Pearson Education Limited and Pearson.

Salvendy, G. (Ed.). (2012). Handbook of human factors and ergonomics. John Wiley & Sons.

Schattenberg, B. (2009). Hybrid planning & scheduling (Doctoral dissertation, Ulm, Univ., Diss., 2009).

Schattenberg, B., Weigl, A., & Biundo, S. (2005, September). Hybrid planning using flexible strategies. In Annual Conference on Artificial Intelligence (pp. 249-263). Berlin, Heidelberg: Springer Berlin Heidelberg.

Schmitt, F. (2021). Adaptive Mixed-Initiative Missionsplanung für Multi-Vehikel Szenarien Dissertation, Universität der Bundeswehr München.

Schulte, A. (2019) Cockpit- und UAV-Automatisierung für FCAS Manned-Unmanned Teaming (MUM-T) Missionen. CPM-Forum, pp.64–68.

Schulte, A., & Donath, D. (2019). Human-Autonomy Teaming-an Evolving Interaction Paradigm: A Cognitive Engineering Approach to HAT. In 20th International Symposium on Aviation Psychology (p. 432).

Schulte, A. & Donath, D. (2024) Grundlagen der nutzerzentrierten Entwicklung von Missionsmanagementsystemen für Manned-Unmanned Teaming Missionen. 2. Auflage. ITIS / Universität der Bundeswehr München.

Schulte, A., Heilemann, F., Lindner, S., & Donath, D. (2020, July). Tasking, teaming, swarming: design patterns for human delegation of unmanned vehicles. In International Conference on Applied Human Factors and Ergonomics (pp. 3-9). Cham: Springer International Publishing.

Schurr, N., Marecki, J., Lewis, J. P., Tambe, M., & Scerri, P. (2005). The defacto system: Coordinating human-agent teams for the future of disaster response. In Multi-Agent Programming: Languages, Platforms and Applications (pp. 197-215). Boston, MA: Springer US.

Shapiro, A. M. (2004). How including prior knowledge as a subject variable may change outcomes of learning research. American educational research journal, 41(1), 159-189.

Sheridan, T. B. (2016). Human–robot interaction: status and challenges. Human factors, 58(4), 525-532.

Sheridan, T.B. (2002) Humans and automation: System design and research issues. Human Factors and Ergonomics Society.

Sheridan, T.B. & Verplank, W.L. (1978) W. L. Human and computer control of undersea teleoperators (Tech. Rep.).

Sierhuis, M., Bradshaw, J., Acquisti, A., Van Hoof, R., Jeffers, R., & Uszok, A. (2003). Human-agent teamwork and adjustable autonomy in practice.

Silknitter, K. O., Wisnowski, J. W., & Montgomery, D. C. (1999). The analysis of covariance: a useful technique for analysing quality improvement experiments. Quality and reliability engineering international, 15(4), 303-316.

Strenzke, R., & Schulte, A. (2011, July). Mixed-initiative multi-UAV mission planning by merging human and machine cognitive skills. In International Conference on Engineering Psychology and Cognitive Ergonomics (pp. 608-617). Berlin, Heidelberg: Springer Berlin Heidelberg.

Taylor, R. M. (2017). Situational awareness rating technique (SART): The development of a tool for aircrew systems design. In Situational awareness (pp. 111-128). Routledge.

Uhrmann, J. (2013). Auftragsbasierte Multi-UAV-Führung aus dem Helikoptercockpit durch kognitive Automation (Doctoral dissertation, Universitätsbibliothek der Universität der Bundeswehr).

Uhrmann, J., & Schulte, A. (2011). Task-based guidance of multiple UAV using cognitive automation. In COGNITIVE 2011, The Third International Conference on Advanced Cognitive Technologies and Applications (pp. 47-52).

Uhrmann, J., Strenzke, R., Rauschert, A., Meitinger, C., & Schulte, A. (2009). Mannedunmanned teaming: Artificial cognition applied to multiple UAV guidance. In

NATO RTO SCI-202 Symposium on Intelligent Uninhabited Vehicle Guidance Systems (pp. 1-16).

Weld, D. S. (1999). Recent advances in AI planning. AI magazine, 20(2), 93-93.

Wertheim, O., & Brafman, R. I. (2025). Model-Based AI planning and Execution Systems for Robotics. arXiv preprint arXiv:2505.04493.

Wickens, C. D., Helton, W. S., Hollands, J. G., & Banbury, S. (2021). Engineering psychology and human performance. Routledge.

Wiener, E. L., & Curry, R. E. (1980). Flight-deck automation: Promises and problems. Ergonomics, 23(10), 995-1011.

Wilkins, D. E. (2014). Practical planning: extending the classical AI planning paradigm. Elsevier.

Woods, D. D. (1985). Cognitive technologies: The design of joint human-machine cognitive systems. AI magazine, 6(4), 86-86.

Woods, D. D. (1988). Coping with complexity: the psychology of human behaviour in complex systems. In Tasks, errors, and mental models (pp. 128-148).

Woods, D. D., & Hollnagel, E. (2006). Joint cognitive systems: Patterns in cognitive systems engineering. CRC press.

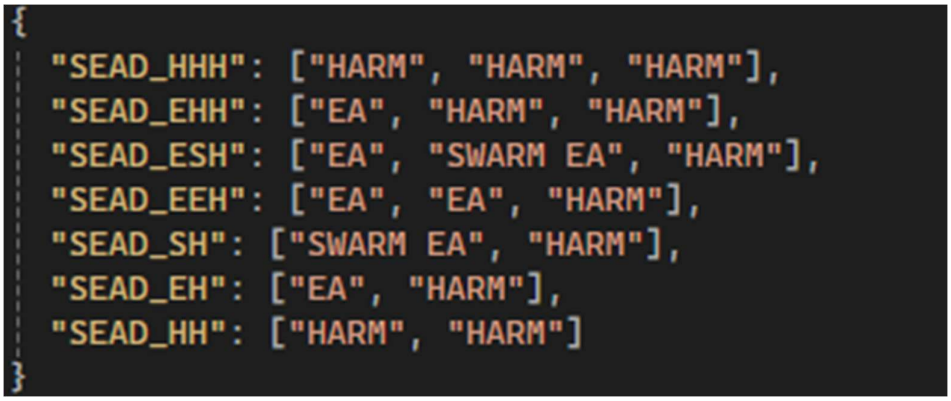
Xiao, Z., Herzig, A., Perrussel, L., Wan, H., & Su, X. (2017, August). Hierarchical task network planning with task insertion and state constraints. In 26th International Joint Conference on Artificial Intelligence (IJCAI 2017) (pp. 4463-4469).

Yang, K., & Cho, K. (2019). Simulated annealing algorithm for wind farm layout optimization: A benchmark study. Energies, 12(23), 4403.

Zaluga, S. J. (2000). The Evolving SAM Threat: Kosovo and Beyond-The 1999 air campaign over Kosovo offers lessons about the current state of the surface-to-air-missile (SAM) threat that may be seriously misunderstood. Journal of Electronic Defense, 23(5), 45-52.

# Anhang

## A Taktiken-Aufgaben Modell



```
{
  "SEAD_HHH": ["HARM", "HARM", "HARM"],
  "SEAD_EHH": ["EA", "HARM", "HARM"],
  "SEAD_ESH": ["EA", "SWARM EA", "HARM"],
  "SEAD_EEH": ["EA", "EA", "HARM"],
  "SEAD_SH": ["SWARM EA", "HARM"],
  "SEAD_EH": ["EA", "HARM"],
  "SEAD_HH": ["HARM", "HARM"]
}
```

# B Ressourcen Modelle


```
{
  "TacticHHH": {
    "Harm": 3,
    "Swarm": 0,
    "EA": 0,
    "UCAVsAtRisk": 3,
    "UCAVsInAction": 3
  },
  "TacticEHH": {
    "Harm": 2,
    "Swarm": 0,
    "EA": 1,
    "UCAVsAtRisk": 2,
    "UCAVsInAction": 3
  },
  "TacticESH": {
    "Harm": 1,
    "Swarm": 1,
    "EA": 1,
    "UCAVsAtRisk": 2,
    "UCAVsInAction": 3
  },
  "TacticEEH": {
    "Harm": 1,
    "Swarm": 0,
    "EA": 2,
    "UCAVsAtRisk": 1,
    "UCAVsInAction": 3
  },
  "TacticSH": {
    "Harm": 1,
    "Swarm": 1,
    "EA": 0,
    "UCAVsAtRisk": 2,
    "UCAVsInAction": 2
  },
  "TacticEH": {
    "Harm": 1,
    "Swarm": 0,
    "EA": 1,
    "UCAVsAtRisk": 1,
    "UCAVsInAction": 2
  },
  "TacticHH": {
    "Harm": 2,
    "Swarm": 0,
    "EA": 0,
    "UCAVsAtRisk": 2,
    "UCAVsInAction": 2
  }
}
```

```
{
  "HarmCost": 5,
  "SwarmCost": 20,
  "EACost": 1,
  "TimeCostHarm": 1,
  "TimeCostSwarm": 1,
  "Risklevel": {
    "CRITICAL": 10000,
    "HIGH": 100,
    "MEDIUM": 70,
    "LOW": 40
  }
}
```

# C Taktiken Modell


```
{
  "SA-11": {
    "EADurationSeconds": 420,
    "EADurationCostValue": 20,
    "StartOffsetHarmToEASeconds": 20,
    "StartOffsetHarmToEACostValue": 2,
    "StartOffsetSwarmToEASeconds": 20,
    "StartOffsetSwarmToEACostValue": 2,
    "StartOffsetHarmToSwarmSeconds": 180,
    "StartOffsetHarmToSwarmCostValue": 20,
    "TacticHHH": {
      "RiskLevel": "CRITICAL"
    },
    "TacticEHH": {
      "RiskLevel": "CRITICAL"
    },
    "TacticESH": {
      "RiskLevel": "LOW"
    },
    "TacticEEH": {
      "RiskLevel": "HIGH"
    },
    "TacticSH": {
      "RiskLevel": "MEDIUM"
    },
    "TacticEH": {
      "RiskLevel": "HIGH"
    },
    "TacticHH": {
      "RiskLevel": "CRITICAL"
    }
  },
  "SA-10A": {
    "EADurationSeconds": 480,
    "EADurationCostValue": 16,
    "StartOffsetHarmToEASeconds": 20,
    "StartOffsetHarmToEACostValue": 2,
    "StartOffsetSwarmToEASeconds": 20,
    "StartOffsetSwarmToEACostValue": 2,
    "StartOffsetHarmToSwarmSeconds": 180,
    "StartOffsetHarmToSwarmCostValue": 25,
    "TacticHHH": {
      "RiskLevel": "CRITICAL"
    },
    "TacticEHH": {
      "RiskLevel": "CRITICAL"
    },
    "TacticESH": {
      "RiskLevel": "LOW"
    },
    "TacticEEH": {
      "RiskLevel": "CRITICAL"
    },
    "TacticSH": {
      "RiskLevel": "MEDIUM"
    },
    "TacticEH": {
      "RiskLevel": "CRITICAL"
    },
    "TacticHH": {
      "RiskLevel": "CRITICAL"
    }
  },
  "SA-14": {
    "EADurationSeconds": 180,
    "EADurationCostValue": 5,
    "StartOffsetHarmToEASeconds": 1,
    "StartOffsetHarmToEACostValue": 0,
    "StartOffsetSwarmToEASeconds": 1,
    "StartOffsetSwarmToEACostValue": 0,
    "StartOffsetHarmToSwarmSeconds": 0,
    "StartOffsetHarmToSwarmCostValue": 0,
    "TacticHHH": {
      "RiskLevel": "LOW"
    },
    "TacticEHH": {
      "RiskLevel": "LOW"
    },
    "TacticESH": {
      "RiskLevel": "CRITICAL"
    },
    "TacticEEH": {
      "RiskLevel": "LOW"
    },
    "TacticSH": {
      "RiskLevel": "CRITICAL"
    },
    "TacticEH": {
      "RiskLevel": "LOW"
    },
    "TacticHH": {
      "RiskLevel": "LOW"
    }
  },
  "SA-15": {
    "EADurationSeconds": 180,
    "EADurationCostValue": 5,
    "StartOffsetHarmToEASeconds": 1,
    "StartOffsetHarmToEACostValue": 0,
    "StartOffsetSwarmToEASeconds": 1,
    "StartOffsetSwarmToEACostValue": 0,
    "StartOffsetHarmToSwarmSeconds": 0,
    "StartOffsetHarmToSwarmCostValue": 0,
    "TacticHHH": {
      "RiskLevel": "LOW"
    },
    "TacticEHH": {
      "RiskLevel": "LOW"
    },
    "TacticESH": {
      "RiskLevel": "CRITICAL"
    },
    "TacticEEH": {
      "RiskLevel": "LOW"
    },
    "TacticSH": {
      "RiskLevel": "CRITICAL"
    },
    "TacticEH": {
      "RiskLevel": "LOW"
    },
    "TacticHH": {
      "RiskLevel": "LOW"
    }
  },
```

```
"SA-17": {
  "EADurationSeconds": 420,
  "EADurationCostValue": 12,
  "StartOffsetHarmToEASeconds": 20,
  "StartOffsetHarmToEACostValue": 2,
  "StartOffsetSwarmToEASeconds": 20,
  "StartOffsetSwarmToEACostValue": 2,
  "StartOffsetHarmToSwarmSeconds": 180,
  "StartOffsetHarmToSwarmCostValue": 25,
  "TacticHHH": {
    "RiskLevel": "CRITICAL"
  },
  "TacticEHH": {
    "RiskLevel": "CRITICAL"
  },
  "TacticESH": {
    "RiskLevel": "LOW"
  },
  "TacticEEH": {
    "RiskLevel": "HIGH"
  },
  "TacticSH": {
    "RiskLevel": "MEDIUM"
  },
  "TacticEH": {
    "RiskLevel": "HIGH"
  },
  "TacticHH": {
    "RiskLevel": "CRITICAL"
  }
},
"SA-26": {
  "EADurationSeconds": 420,
  "EADurationCostValue": 12,
  "StartOffsetHarmToEASeconds": 20,
  "StartOffsetHarmToEACostValue": 2,
  "StartOffsetSwarmToEASeconds": 20,
  "StartOffsetSwarmToEACostValue": 2,
  "StartOffsetHarmToSwarmSeconds": 180,
  "StartOffsetHarmToSwarmCostValue": 25,
  "TacticHHH": {
    "RiskLevel": "HIGH"
  },
  "TacticEHH": {
    "RiskLevel": "HIGH"
  },
  "TacticESH": {
    "RiskLevel": "LOW"
  },
  "TacticEEH": {
    "RiskLevel": "MEDIUM"
  },
  "TacticSH": {
    "RiskLevel": "LOW"
  },
  "TacticEH": {
    "RiskLevel": "MEDIUM"
  },
  "TacticHH": {
    "RiskLevel": "HIGH"
  }
},
```

```
"SA-10B": {
  "EADurationSeconds": 420,
  "EADurationCostValue": 12,
  "StartOffsetHarmToEASeconds": 20,
  "StartOffsetHarmToEACostValue": 2,
  "StartOffsetSwarmToEASeconds": 20,
  "StartOffsetSwarmToEACostValue": 2,
  "StartOffsetHarmToSwarmSeconds": 180,
  "StartOffsetHarmToSwarmCostValue": 25,
  "TacticHHH": {
    "RiskLevel": "CRITICAL"
  },
  "TacticEHH": {
    "RiskLevel": "CRITICAL"
  },
  "TacticESH": {
    "RiskLevel": "HIGH"
  },
  "TacticEEH": {
    "RiskLevel": "HIGH"
  },
  "TacticSH": {
    "RiskLevel": "HIGH"
  },
  "TacticEH": {
    "RiskLevel": "HIGH"
  },
  "TacticHH": {
    "RiskLevel": "CRITICAL"
  }
}
```

# D Fragebogen zur Missionsplanbewertung

der Bundeswehr
Universität München

Kampagne2023MissionPlanning → mpval 09.11.2023, 11:47

**Seite 01**

**1. Probandennummer**

[Bitte auswählen]

**2. Für welche statische Situation haben Sie die Planung durchgeführt?**

[Bitte auswählen]

**Seite 02**

**3. Bewertung automatisiert erstellter Missionsplan**

| | stimme überhaupt nicht zu | | | | | | stimme absolut zu |
|---|---|---|---|---|---|---|---|
| Der automatisierte Plan hat die gesteckten Ziele und Aufgaben erfüllt | ○ | ○ | ○ | ○ | ○ | ○ | ○ |
| Der automatisierte Plan war klar und umfassend | ○ | ○ | ○ | ○ | ○ | ○ | ○ |
| Der automatisiert erstellte Plan war effizient | ○ | ○ | ○ | ○ | ○ | ○ | ○ |
| Der automatisiert erstellte Plan traf angemessene Entscheidungen | ○ | ○ | ○ | ○ | ○ | ○ | ○ |
| Der automatisierte Plan beinhaltete Fehler bzw. ungünstige Entscheidungen | ○ | ○ | ○ | ○ | ○ | ○ | ○ |
| Ich habe ein hohes Vertrauen in den automatisierten Plan | ○ | ○ | ○ | ○ | ○ | ○ | ○ |
| Ich würde in Zukunft wieder solch ein System verwenden wollen | ○ | ○ | ○ | ○ | ○ | ○ | ○ |

**Seite 03**

**4. Welchen von beiden Plänen würden Sie in Bezug auf Resourceneinsatz (eingesetzte Wirkmittel, Anzahl UAVs bei Plandurchführung, ...) bevorzugen?**

Eigener Plan ○ ○ Automatisiert erstellter Plan

**5. Welchen von beiden Plänen würden Sie in Bezug auf Einsatzrisiko (ausgewählte „unterstützende" Aufgaben (EA, Swarm), Flughöhen, UAVs die direkt bedroht sein könnten, ...) bevorzugen?**

Eigener Plan ○ ○ Automatisiert erstellter Plan

**6. Ich würde in Zukunft so ein System zur Missionsvorplanung verwenden wollen**

| Stimme absolut nicht zu | Stimme nicht zu | Stimme eher nicht zu | Neutral | Stimme eher zu | Stimme zu | Stimme absolut zu |
|---|---|---|---|---|---|---|
| ○ | ○ | ○ | ○ | ○ | ○ | ○ |

**Seite 04**

**7. Wie effizient (eingesetzte Resourcen (UAVs, Wirkmittel, ...), Zeit bis zur Zielerfüllung, Vollständigkeit) war der automatisierte Plan im Vergleich zu dem von Ihnen erstellte Plan?**

**Seite 05**

**8. Welche Faktoren sollten Ihrer Meinung nach an dem automatisierten Plan verbessert werden?**

**Seite 06**

**9. Vertrauen in Automation**

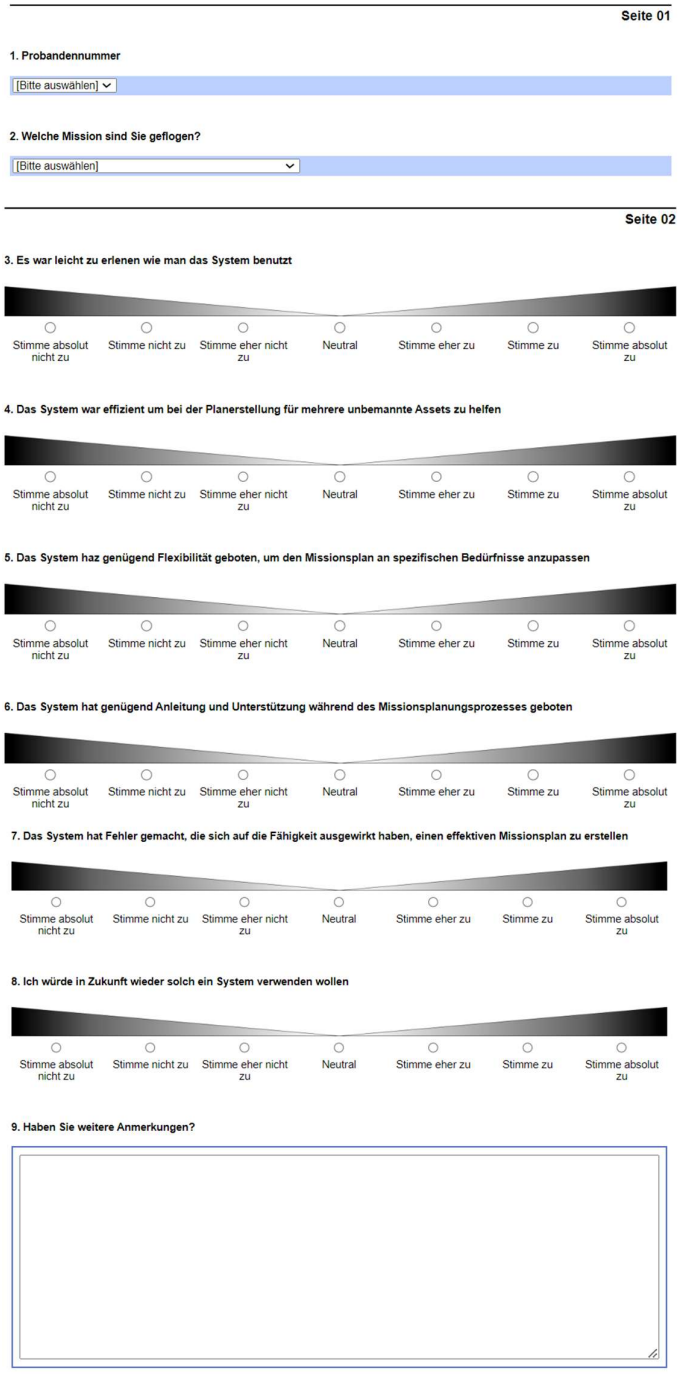
Beachten Sie, dass Sie hier rein die Assistenzfunktionalitäten in Bezug auf die Missionsplanung bewerten sollen

| | stimme überhaupt nicht zu | | | | | | stimme absolut zu |
|---|---|---|---|---|---|---|---|
| Das System ist imstande Situationen richtig einzuschätzen. | ○ | ○ | ○ | ○ | ○ | ○ | ○ |
| Mir war durchgehend klar, in welchem Zustand sich das System befindet. | ○ | ○ | ○ | ○ | ○ | ○ | ○ |
| Ich kenne bereits ähnliche Systeme. | ○ | ○ | ○ | ○ | ○ | ○ | ○ |
| Die Entwickler sind vertrauenswürdig. | ○ | ○ | ○ | ○ | ○ | ○ | ○ |
| Bei unbekannten automatisierten Systemen sollte man eher vorsichtig sein. | ○ | ○ | ○ | ○ | ○ | ○ | ○ |
| Das System arbeitet zuverlässig. | ○ | ○ | ○ | ○ | ○ | ○ | ○ |
| Das System reagiert unvorhersehbar. | ○ | ○ | ○ | ○ | ○ | ○ | ○ |
| Ich vertraue dem System. | ○ | ○ | ○ | ○ | ○ | ○ | ○ |
| Ein Ausfall des Systems ist wahrscheinlich. | ○ | ○ | ○ | ○ | ○ | ○ | ○ |
| Ich konnte nachvollziehen, warum etwas passiert ist. | ○ | ○ | ○ | ○ | ○ | ○ | ○ |
| Ich vertraue einem System eher, als dass ich ihm misstraue. | ○ | ○ | ○ | ○ | ○ | ○ | ○ |
| Das System kann wirklich komplizierte Aufgaben übernehmen | ○ | ○ | ○ | ○ | ○ | ○ | ○ |
| Ich kann mich auf das System verlassen. | ○ | ○ | ○ | ○ | ○ | ○ | ○ |
| Das System könnte stellenweise einen Fehler machen | ○ | ○ | ○ | ○ | ○ | ○ | ○ |
| Zu erkennen, was das System als Nächstes macht, ist schwer. | ○ | ○ | ○ | ○ | ○ | ○ | ○ |
| Ich habe ähnliche Systeme bereits genutzt. | ○ | ○ | ○ | ○ | ○ | ○ | ○ |
| Automatisierte Systeme funktionieren generell gut. | ○ | ○ | ○ | ○ | ○ | ○ | ○ |
| Ich bin überzeugt von den Fähigkeiten des Systems. | ○ | ○ | ○ | ○ | ○ | ○ | ○ |

**Seite 07**

**10. Haben Sie weitere Anmerkungen?**

# E Fragebogen zur Bewertung des PAA nach einer Mission



Seite 01

1. Probandennummer

[Bitte auswählen]

2. Welche Mission sind Sie geflogen?

[Bitte auswählen]

Seite 02

3. Es war leicht zu erlenen wie man das System benutzt

Stimme absolut nicht zu | Stimme nicht zu | Stimme eher nicht zu | Neutral | Stimme eher zu | Stimme zu | Stimme absolut zu

4. Das System war effizient um bei der Planerstellung für mehrere unbemannte Assets zu helfen

Stimme absolut nicht zu | Stimme nicht zu | Stimme eher nicht zu | Neutral | Stimme eher zu | Stimme zu | Stimme absolut zu

5. Das System haz genügend Flexibilität geboten, um den Missionsplan an spezifischen Bedürfnisse anzupassen

Stimme absolut nicht zu | Stimme nicht zu | Stimme eher nicht zu | Neutral | Stimme eher zu | Stimme zu | Stimme absolut zu

6. Das System hat genügend Anleitung und Unterstützung während des Missionsplanungsprozesses geboten

Stimme absolut nicht zu | Stimme nicht zu | Stimme eher nicht zu | Neutral | Stimme eher zu | Stimme zu | Stimme absolut zu

7. Das System hat Fehler gemacht, die sich auf die Fähigkeit ausgewirkt haben, einen effektiven Missionsplan zu erstellen

Stimme absolut nicht zu | Stimme nicht zu | Stimme eher nicht zu | Neutral | Stimme eher zu | Stimme zu | Stimme absolut zu

8. Ich würde in Zukunft wieder solch ein System verwenden wollen

Stimme absolut nicht zu | Stimme nicht zu | Stimme eher nicht zu | Neutral | Stimme eher zu | Stimme zu | Stimme absolut zu

9. Haben Sie weitere Anmerkungen?

**Seite 03**

**10. Bewerten Sie bitte das System.**

| | stimme gar nicht zu | | | | | | stimme voll zu |
|---|---|---|---|---|---|---|---|
| Es war einfach das System zu bedienen. | ○ | ○ | ○ | ○ | ○ | ○ | ○ |
| Ich konnte mit dem System meinen Auftrag schnell erfüllen. | ○ | ○ | ○ | ○ | ○ | ○ | ○ |
| Ich fühlte mich wohl bei der Verwendung des Systems. | ○ | ○ | ○ | ○ | ○ | ○ | ○ |
| Es war einfach dieses System zu erlernen. | ○ | ○ | ○ | ○ | ○ | ○ | ○ |
| Ich glaube, dass ich mit dem System schnell produktiv werde. | ○ | ○ | ○ | ○ | ○ | ○ | ○ |
| Das System gab mir klare Hinweise und Fehlermeldungen, mit denen ich mögliche Probleme gut lösen konnte. | ○ | ○ | ○ | ○ | ○ | ○ | ○ |
| Wenn ich einen Fehler gemacht habe, konnte ich diesen schnell und einfach korrigieren. | ○ | ○ | ○ | ○ | ○ | ○ | ○ |
| Die Informationen für die Nutzung des Systems, welche mir bereitgestellt wurden waren verständlich | ○ | ○ | ○ | ○ | ○ | ○ | ○ |
| Es war leicht Informationen zu finden, die ich benötigte. | ○ | ○ | ○ | ○ | ○ | ○ | ○ |
| Die Informationen konnten mir effektiv helfen den Auftrag zu erfüllen. | ○ | ○ | ○ | ○ | ○ | ○ | ○ |
| Die Aufbereitung der Informationen auf dem Display war verständlich. | ○ | ○ | ○ | ○ | ○ | ○ | ○ |
| Das Interface war ansprechend gestaltet. | ○ | ○ | ○ | ○ | ○ | ○ | ○ |
| Ich habe gerne mit dem Interface gearbeitet. | ○ | ○ | ○ | ○ | ○ | ○ | ○ |
| Das System brachte alle Funktionen mit, die ich erwartet habe. | ○ | ○ | ○ | ○ | ○ | ○ | ○ |
| Insgesamt bin ich mit diesem System zufrieden. | ○ | ○ | ○ | ○ | ○ | ○ | ○ |

**Seite 04**

**11. Bewerten Sie die allgemeine Benutzerfreundlichkeit**

Beachten Sie, dass Sie hier rein die Assistenzfunktionalitäten in Bezug auf die Missionsplanung bewerten sollen

| | stimme überhaupt nicht zu | | | | | | stimme absolut zu |
|---|---|---|---|---|---|---|---|
| Ich konnte den Auftrag gut erfüllen. | ○ | ○ | ○ | ○ | ○ | ○ | ○ |
| Ich musste viele Schritte machen, um den Auftrag zu erfüllen. | ○ | ○ | ○ | ○ | ○ | ○ | ○ |
| Ich kann mir gut Vorstellen das System in Zukunft zu nutzen. | ○ | ○ | ○ | ○ | ○ | ○ | ○ |
| Ich empfinde das System als unnötig komplex. | ○ | ○ | ○ | ○ | ○ | ○ | ○ |
| Ich denke, dass ich noch viel Übung brauchen werde, um das System zu nutzen. | ○ | ○ | ○ | ○ | ○ | ○ | ○ |
| Ich denke, dass ich noch viel Unterstützung brauchen werde, um das System zu nutzen | ○ | ○ | ○ | ○ | ○ | ○ | ○ |
| Ich empfinde die Bedienung als sehr umständlich. | ○ | ○ | ○ | ○ | ○ | ○ | ○ |
| Ich habe mich bei der Nutzung des Systems sicher gefühlt. | ○ | ○ | ○ | ○ | ○ | ○ | ○ |
| Ich musste eine Menge Dinge lernen, bevor ich mit dem System arbeiten konnte. | ○ | ○ | ○ | ○ | ○ | ○ | ○ |
| Das System insgesamt ist benutzerfreundlich. | ○ | ○ | ○ | ○ | ○ | ○ | ○ |
| Ich wusste was die Aufgabe der einzelnen UAVs war | ○ | ○ | ○ | ○ | ○ | ○ | ○ |
| Ich wusste was das System von mir wollte | ○ | ○ | ○ | ○ | ○ | ○ | ○ |
| Ich habe den Missionsplan verstanden | ○ | ○ | ○ | ○ | ○ | ○ | ○ |

**12. Benutzerfreundlichkeit Insgesamt**

| | stimme überhaupt nicht zu | | | | | | stimme absolut zu |
|---|---|---|---|---|---|---|---|
| Das System insgesamt ist benutzerfreundlich. | ○ | ○ | ○ | ○ | ○ | ○ | ○ |

**Seite 05**

**13. Um Ihr situatives Bewusstsein (Situational Awareness) zu erfassen, bewerten Sie die folgenden Aspekte.**

| | sehr klein – sehr groß |
|---|---|
| Wie instabil war die Situation? Hat sich die Situation schnell verändert? | |
| Wie variabel war die Situation? Haben sich viele oder wenige Faktoren geändert? | |
| Wie komplex war die Situation? | |
| Wie groß waren Ihre freien mentale Kapazitäten? | |
| Wie gut konnten Sie sich auf die Aufgabe konzentrieren? | |
| Wie gut konnten Sie Ihre Aufmerksamkeit aufteilen (auf den verschiedenen gesteuerten Bereichen)? | |
| Wie bereit waren Sie für die durchgeführten Aktivitäten? | |
| Wie hoch war die Menge an Informationen, die Sie verarbeiten mussten? | |
| Wie gut waren die Informationen, die Sie erhalten haben? | |
| Wie vertraut waren Sie mit der Situation? | |

**Seite 06**

**14. Welche Beanspruchungsdimension waren für Sie während der Mission bedeutsamer?**
Vergleichen Sie die verschiedenen Beanspruchungsdimensionen und wählen jeweils, die für Sie entscheidendere Dimension aus.

| | | | |
|---|---|---|---|
| Geistige Anforderung | ○ | ○ | Körperliche Anforderung |
| Geistige Anforderung | ○ | ○ | Zeitliche Anforderung |
| Geistige Anforderung | ○ | ○ | erbrachte Leistung |
| Geistige Anforderung | ○ | ○ | Anstrengung |
| Geistige Anforderung | ○ | ○ | Frustration |
| Körperliche Anforderung | ○ | ○ | Zeitliche Anforderung |
| Körperliche Anforderung | ○ | ○ | erbrachte Leistung |
| Körperliche Anforderung | ○ | ○ | Anstrengung |
| Körperliche Anforderung | ○ | ○ | Frustration |
| Zeitliche Anforderung | ○ | ○ | erbrachte Leistung |
| Zeitliche Anforderung | ○ | ○ | Anstrengung |
| Zeitliche Anforderung | ○ | ○ | Frustration |
| erbrachte Leistung | ○ | ○ | Anstrengung |
| erbrachte Leistung | ○ | ○ | Frustration |
| Anstrengung | ○ | ○ | Frustration |

**15. Wie hoch war die Beanspruchung in den einzelnen Dimensionen?**
Bewerten Sie jetzt die Höhe der empfundenen Belastung in den einzelnen Dimensionen.

| | 0 (sehr gering) | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 | 7 | 8 | 9 | 10 | 11 | 12 | 13 | 14 | 15 | 16 | 17 | 18 | 19 | 20 (sehr groß) |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| Geistige Anforderung | ○ | ○ | ○ | ○ | ○ | ○ | ○ | ○ | ○ | ○ | ○ | ○ | ○ | ○ | ○ | ○ | ○ | ○ | ○ | ○ | ○ |
| Körperliche Anforderung | ○ | ○ | ○ | ○ | ○ | ○ | ○ | ○ | ○ | ○ | ○ | ○ | ○ | ○ | ○ | ○ | ○ | ○ | ○ | ○ | ○ |
| Zeitliche Anforderung | ○ | ○ | ○ | ○ | ○ | ○ | ○ | ○ | ○ | ○ | ○ | ○ | ○ | ○ | ○ | ○ | ○ | ○ | ○ | ○ | ○ |
| Anstrengung | ○ | ○ | ○ | ○ | ○ | ○ | ○ | ○ | ○ | ○ | ○ | ○ | ○ | ○ | ○ | ○ | ○ | ○ | ○ | ○ | ○ |
| Frustration | ○ | ○ | ○ | ○ | ○ | ○ | ○ | ○ | ○ | ○ | ○ | ○ | ○ | ○ | ○ | ○ | ○ | ○ | ○ | ○ | ○ |

**16. Wie bewerten Sie, Ihre eigene Performance? Wie gut konnten Sie den Auftrag erfüllen?**
Achten Sie auf die geänderte Skala: Links – perfekte Auftragserfüllung; Rechts – totaler Fehlschlag

| | 20 (sehr gering) | 19 | 18 | 17 | 16 | 15 | 14 | 13 | 12 | 11 | 10 | 9 | 8 | 7 | 6 | 5 | 4 | 3 | 2 | 1 | 0 (sehr groß) |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| Eigene Leistung | ○ | ○ | ○ | ○ | ○ | ○ | ○ | ○ | ○ | ○ | ○ | ○ | ○ | ○ | ○ | ○ | ○ | ○ | ○ | ○ | ○ |

**Seite 07**

**17. Bewerten Sie die Effizienz des Systems**

| | | |
|---|---|---|
| langsam | ○ ○ ○ ○ ○ | schnell |
| ineffizient | ○ ○ ○ ○ ○ | effizient |
| unpraktisch | ○ ○ ○ ○ ○ | praktisch |
| überladen | ○ ○ ○ ○ ○ | aufgeräumt |

**18. Bewerten Sie die Klarheit des Systems**

| | | |
|---|---|---|
| unverständlich | ○ ○ ○ ○ ○ | verständlich |
| schwer zu lernen | ○ ○ ○ ○ ○ | leicht zu lernen |
| kompliziert | ○ ○ ○ ○ ○ | einfach |
| verwirrend | ○ ○ ○ ○ ○ | übersichtlich |

**19. Bewerten Sie die Zuverlässigkeit des Systems**

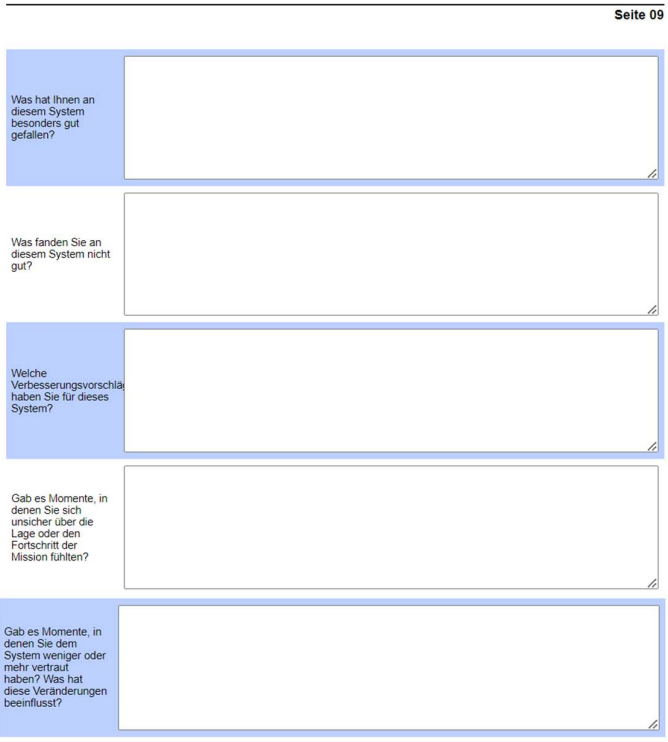
| | | |
|---|---|---|
| unberechenbar | ○ ○ ○ ○ ○ | berechenbar |
| behindernd | ○ ○ ○ ○ ○ | unterstützend |
| unsicher | ○ ○ ○ ○ ○ | sicher |
| erwartungskonform | ○ ○ ○ ○ ○ | nicht erwartungskonform |

**Seite 08**

**21. Vertrauen in Automation**

Beachten Sie, dass Sie hier rein die Assistenzfunktionalitäten in Bezug auf die Missionsplanung bewerten sollen

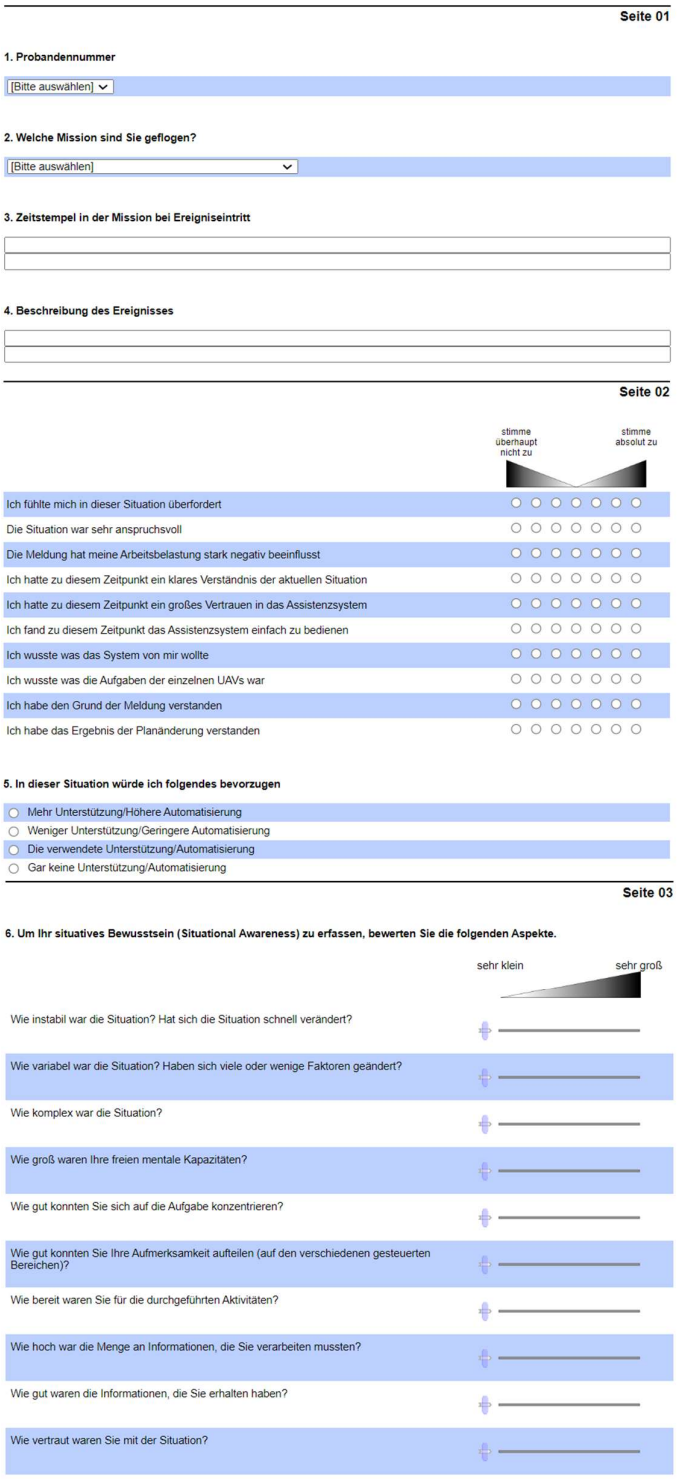
| | stimme überhaupt nicht zu | stimme absolut zu |
|---|---|---|
| Das System ist imstande Situationen richtig einzuschätzen. | ○ ○ ○ ○ ○ ○ ○ | |
| Mir war durchgehend klar, in welchem Zustand sich das System befindet. | ○ ○ ○ ○ ○ ○ ○ | |
| Ich kenne bereits ähnliche Systeme. | ○ ○ ○ ○ ○ ○ ○ | |
| Die Entwickler sind vertrauenswürdig. | ○ ○ ○ ○ ○ ○ ○ | |
| Bei unbekannten automatisierten Systemen sollte man eher vorsichtig sein. | ○ ○ ○ ○ ○ ○ ○ | |
| Das System arbeitet zuverlässig. | ○ ○ ○ ○ ○ ○ ○ | |
| Das System reagiert unvorhersehbar. | ○ ○ ○ ○ ○ ○ ○ | |
| Ich vertraue dem System. | ○ ○ ○ ○ ○ ○ ○ | |
| Ein Ausfall des Systems ist wahrscheinlich. | ○ ○ ○ ○ ○ ○ ○ | |
| Ich konnte nachvollziehen, warum etwas passiert ist. | ○ ○ ○ ○ ○ ○ ○ | |
| Ich vertraue einem System eher, als dass ich ihm misstraue. | ○ ○ ○ ○ ○ ○ ○ | |
| Das System kann wirklich komplizierte Aufgaben übernehmen | ○ ○ ○ ○ ○ ○ ○ | |
| Ich kann mich auf das System verlassen. | ○ ○ ○ ○ ○ ○ ○ | |
| Das System könnte stellenweise einen Fehler machen | ○ ○ ○ ○ ○ ○ ○ | |
| Zu erkennen, was das System als Nächstes macht, ist schwer. | ○ ○ ○ ○ ○ ○ ○ | |
| Ich habe ähnliche Systeme bereits genutzt. | ○ ○ ○ ○ ○ ○ ○ | |
| Automatisierte Systeme funktionieren generell gut. | ○ ○ ○ ○ ○ ○ ○ | |
| Ich bin überzeugt von den Fähigkeiten des Systems. | ○ ○ ○ ○ ○ ○ ○ | |



Seite 09

| | |
|---|---|
| Was hat Ihnen an diesem System besonders gut gefallen? | |
| Was fanden Sie an diesem System nicht gut? | |
| Welche Verbesserungsvorschlä haben Sie für dieses System? | |
| Gab es Momente, in denen Sie sich unsicher über die Lage oder den Fortschritt der Mission fühlten? | |
| Gab es Momente, in denen Sie dem System weniger oder mehr vertraut haben? Was hat diese Veränderungen beeinflusst? | |

# F Debriefing Fragebogen



Seite 01

1. Probandennummer

[Bitte auswählen]

2. Welche Mission sind Sie geflogen?

[Bitte auswählen]

3. Zeitstempel in der Mission bei Ereigniseintritt

4. Beschreibung des Ereignisses

Seite 02

| | stimme überhaupt nicht zu | | | | | | stimme absolut zu |
|---|---|---|---|---|---|---|---|
| Ich fühlte mich in dieser Situation überfordert | ○ | ○ | ○ | ○ | ○ | ○ | ○ |
| Die Situation war sehr anspruchsvoll | ○ | ○ | ○ | ○ | ○ | ○ | ○ |
| Die Meldung hat meine Arbeitsbelastung stark negativ beeinflusst | ○ | ○ | ○ | ○ | ○ | ○ | ○ |
| Ich hatte zu diesem Zeitpunkt ein klares Verständnis der aktuellen Situation | ○ | ○ | ○ | ○ | ○ | ○ | ○ |
| Ich hatte zu diesem Zeitpunkt ein großes Vertrauen in das Assistenzsystem | ○ | ○ | ○ | ○ | ○ | ○ | ○ |
| Ich fand zu diesem Zeitpunkt das Assistenzsystem einfach zu bedienen | ○ | ○ | ○ | ○ | ○ | ○ | ○ |
| Ich wusste was das System von mir wollte | ○ | ○ | ○ | ○ | ○ | ○ | ○ |
| Ich wusste was die Aufgaben der einzelnen UAVs war | ○ | ○ | ○ | ○ | ○ | ○ | ○ |
| Ich habe den Grund der Meldung verstanden | ○ | ○ | ○ | ○ | ○ | ○ | ○ |
| Ich habe das Ergebnis der Planänderung verstanden | ○ | ○ | ○ | ○ | ○ | ○ | ○ |

5. In dieser Situation würde ich folgendes bevorzugen

- ○ Mehr Unterstützung/Höhere Automatisierung
- ○ Weniger Unterstützung/Geringere Automatisierung
- ○ Die verwendete Unterstützung/Automatisierung
- ○ Gar keine Unterstützung/Automatisierung

Seite 03

6. Um Ihr situatives Bewusstsein (Situational Awareness) zu erfassen, bewerten Sie die folgenden Aspekte.

| | sehr klein | sehr groß |
|---|---|---|
| Wie instabil war die Situation? Hat sich die Situation schnell verändert? | | |
| Wie variabel war die Situation? Haben sich viele oder wenige Faktoren geändert? | | |
| Wie komplex war die Situation? | | |
| Wie groß waren Ihre freien mentale Kapazitäten? | | |
| Wie gut konnten Sie sich auf die Aufgabe konzentrieren? | | |
| Wie gut konnten Sie Ihre Aufmerksamkeit aufteilen (auf den verschiedenen gesteuerten Bereichen)? | | |
| Wie bereit waren Sie für die durchgeführten Aktivitäten? | | |
| Wie hoch war die Menge an Informationen, die Sie verarbeiten mussten? | | |
| Wie gut waren die Informationen, die Sie erhalten haben? | | |
| Wie vertraut waren Sie mit der Situation? | | |

Seite 04

**7. Workload**

| | |
|---|---|
| Konnten Sie in dieser Situation Ihre Aufgabe gut bewältigen, oder fühlten Sie sich überfordert? | |
| War die Situation zu anspruchsvoll? Wenn ja, wie könnte die Situation vereinfacht bzw. wie könnte hier besser unterstützt werden? | |
| Wie hat diese Meldung/Vorschlag Ihre Arbeitsbelastung beeinflusst? | |

**8. Situationsbewusstsein**

| | |
|---|---|
| Hatten Sie zu diesem Zeitpunkt ein klares Verständnis für die aktuelle Situation und den Zustand der unbemannten Assets? | |
| Wie hat die Meldung oder Vorschlag des Assistenzsystems Ihr Verständnis der Situation beeinflusst? | |

**9. Vertrauen**

| | |
|---|---|
| Inwiefern haben Sie dem Assistenzsystem vertraut? | |

**10. Benutzerfreundlichkeit**

| | |
|---|---|
| Welche Verbesserungen würden Sie vorschlagen, um die Benutzerfreundlichkeit des Systems zu erhöhen? | |

**11. Allgemeines**

| | |
|---|---|
| Sonstiges bzgl der Interaktion mit dem Assistenzsystem? | |
| Wünsche für Verbesserungen/Funkti | |

**Seite 05**

**12. Bewerten Sie die allgemeine Benutzerfreundlichkeit**

Beachten Sie, dass Sie hier rein die Assistenzfunktionalitäten in Bezug auf die Missionsplanung bewerten sollen

| | stimme überhaupt nicht zu | | | | | | stimme absolut zu |
|---|---|---|---|---|---|---|---|
| Ich konnte den Auftrag gut erfüllen. | ○ | ○ | ○ | ○ | ○ | ○ | ○ |
| Ich musste viele Schritte machen, um den Auftrag zu erfüllen. | ○ | ○ | ○ | ○ | ○ | ○ | ○ |
| Ich kann mir gut Vorstellen das System in Zukunft zu nutzen. | ○ | ○ | ○ | ○ | ○ | ○ | ○ |
| Ich empfinde das System als unnötig komplex. | ○ | ○ | ○ | ○ | ○ | ○ | ○ |
| Ich denke, dass ich noch viel Übung brauchen werde, um das System zu nutzen. | ○ | ○ | ○ | ○ | ○ | ○ | ○ |
| Ich denke, dass ich noch viel Unterstützung brauchen werde, um das System zu nutzen | ○ | ○ | ○ | ○ | ○ | ○ | ○ |
| Ich empfinde die Bedienung als sehr umständlich. | ○ | ○ | ○ | ○ | ○ | ○ | ○ |
| Ich habe mich bei der Nutzung des Systems sicher gefühlt. | ○ | ○ | ○ | ○ | ○ | ○ | ○ |
| Ich musste eine Menge Dinge lernen, bevor ich mit dem System arbeiten konnte. | ○ | ○ | ○ | ○ | ○ | ○ | ○ |
| Das System insgesamt ist benutzerfreundlich. | ○ | ○ | ○ | ○ | ○ | ○ | ○ |
| Ich wusste was die Aufgabe der einzelnen UAVs war | ○ | ○ | ○ | ○ | ○ | ○ | ○ |
| Ich wusste was das System von mir wollte | ○ | ○ | ○ | ○ | ○ | ○ | ○ |
| Ich habe den Missionsplan verstanden | ○ | ○ | ○ | ○ | ○ | ○ | ○ |

**Seite 06**

**13. Bewerten Sie die Effizienz des Systems**

| | | |
|---|---|---|
| langsam | ○ ○ ○ ○ ○ | schnell |
| ineffizient | ○ ○ ○ ○ ○ | effizient |
| unpraktisch | ○ ○ ○ ○ ○ | praktisch |
| überladen | ○ ○ ○ ○ ○ | aufgeräumt |

**14. Bewerten Sie die Klarheit des Systems**

| | | |
|---|---|---|
| unverständlich | ○ ○ ○ ○ ○ | verständlich |
| schwer zu lernen | ○ ○ ○ ○ ○ | leicht zu lernen |
| kompliziert | ○ ○ ○ ○ ○ | einfach |
| verwirrend | ○ ○ ○ ○ ○ | übersichtlich |

**15. Bewerten Sie die Zuverlässigkeit des Systems**

| | | |
|---|---|---|
| unberechenbar | ○ ○ ○ ○ ○ | berechenbar |
| behindernd | ○ ○ ○ ○ ○ | unterstützend |
| unsicher | ○ ○ ○ ○ ○ | sicher |
| erwartungskonform | ○ ○ ○ ○ ○ | nicht erwartungskonform |

**16. Bewerten Sie die Nützlichkeit des Systems.**

| | | |
|---|---|---|
| herkömmlich | ○ ○ ○ ○ ○ | neuartig |
| phantasielos | ○ ○ ○ ○ ○ | kreativ |
| konventionell | ○ ○ ○ ○ ○ | originell |
| konversativ | ○ ○ ○ ○ ○ | innovativ |

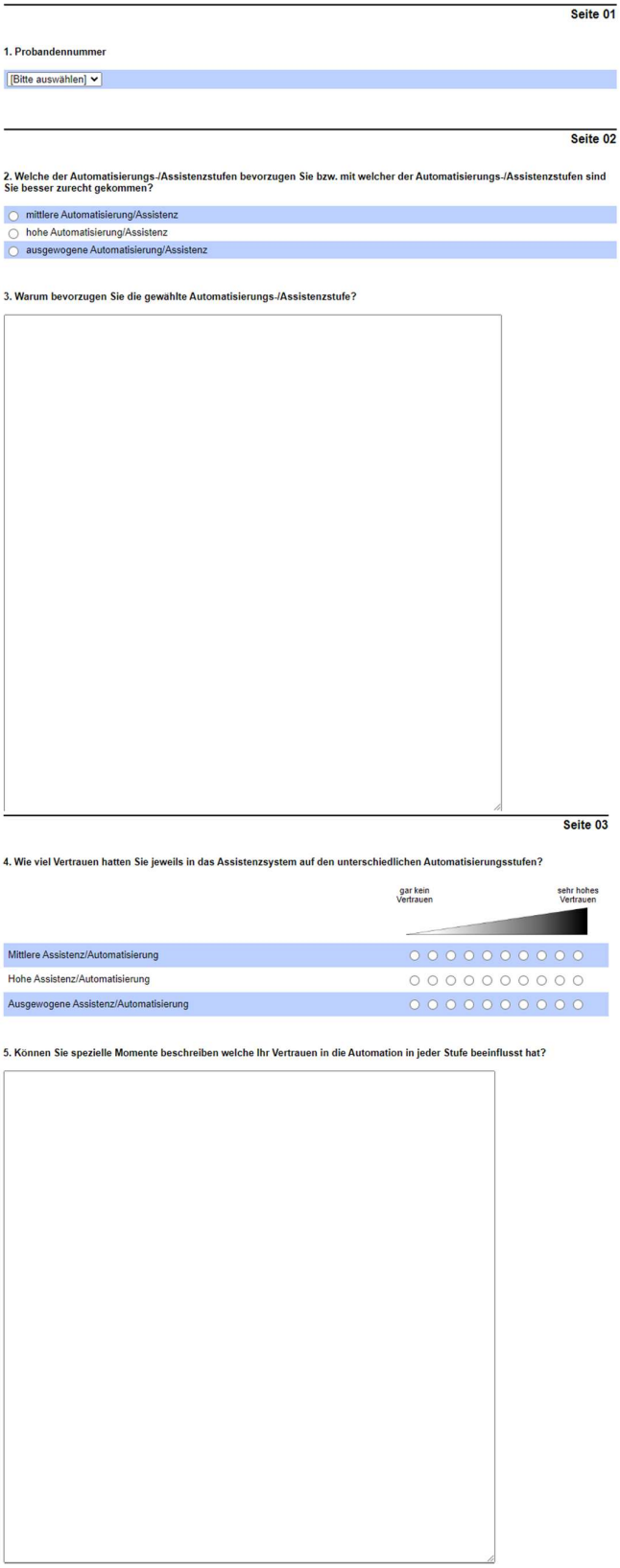
**Seite 07**

**17. Vertrauen in Automation**

Beachten Sie, dass Sie hier rein die Assistenzfunktionalitäten in Bezug auf die Missionsplanung bewerten sollen

| | stimme überhaupt nicht zu ... stimme absolut zu |
|---|---|
| Das System ist imstande Situationen richtig einzuschätzen. | ○ ○ ○ ○ ○ ○ ○ |
| Mir war durchgehend klar, in welchem Zustand sich das System befindet. | ○ ○ ○ ○ ○ ○ ○ |
| Ich kenne bereits ähnliche Systeme. | ○ ○ ○ ○ ○ ○ ○ |
| Die Entwickler sind vertrauenswürdig. | ○ ○ ○ ○ ○ ○ ○ |
| Bei unbekannten automatisierten Systemen sollte man eher vorsichtig sein. | ○ ○ ○ ○ ○ ○ ○ |
| Das System arbeitet zuverlässig. | ○ ○ ○ ○ ○ ○ ○ |
| Das System reagiert unvorhersehbar. | ○ ○ ○ ○ ○ ○ ○ |
| Ich vertraue dem System. | ○ ○ ○ ○ ○ ○ ○ |
| Ein Ausfall des Systems ist wahrscheinlich. | ○ ○ ○ ○ ○ ○ ○ |
| Ich konnte nachvollziehen, warum etwas passiert ist. | ○ ○ ○ ○ ○ ○ ○ |
| Ich vertraue einem System eher, als dass ich ihm misstraue. | ○ ○ ○ ○ ○ ○ ○ |
| Das System kann wirklich komplizierte Aufgaben übernehmen | ○ ○ ○ ○ ○ ○ ○ |
| Ich kann mich auf das System verlassen. | ○ ○ ○ ○ ○ ○ ○ |
| Das System könnte stellenweise einen Fehler machen | ○ ○ ○ ○ ○ ○ ○ |
| Zu erkennen, was das System als Nächstes macht, ist schwer. | ○ ○ ○ ○ ○ ○ ○ |
| Ich habe ähnliche Systeme bereits genutzt. | ○ ○ ○ ○ ○ ○ ○ |
| Automatisierte Systeme funktionieren generell gut. | ○ ○ ○ ○ ○ ○ ○ |
| Ich bin überzeugt von den Fähigkeiten des Systems. | ○ ○ ○ ○ ○ ○ ○ |

# G Fragebogen zur Bewertung aller Assistenzstufen



Seite 01

1. Probandennummer

[Bitte auswählen]

Seite 02

2. Welche der Automatisierungs-/Assistenzstufen bevorzugen Sie bzw. mit welcher der Automatisierungs-/Assistenzstufen sind Sie besser zurecht gekommen?

- mittlere Automatisierung/Assistenz
- hohe Automatisierung/Assistenz
- ausgewogene Automatisierung/Assistenz

3. Warum bevorzugen Sie die gewählte Automatisierungs-/Assistenzstufe?

Seite 03

4. Wie viel Vertrauen hatten Sie jeweils in das Assistenzsystem auf den unterschiedlichen Automatisierungsstufen?

| | gar kein Vertrauen | sehr hohes Vertrauen |
|---|---|---|
| Mittlere Assistenz/Automatisierung | ○ ○ ○ ○ ○ ○ ○ ○ ○ ○ | |
| Hohe Assistenz/Automatisierung | ○ ○ ○ ○ ○ ○ ○ ○ ○ ○ | |
| Ausgewogene Assistenz/Automatisierung | ○ ○ ○ ○ ○ ○ ○ ○ ○ ○ | |

5. Können Sie spezielle Momente beschreiben welche Ihr Vertrauen in die Automation in jeder Stufe beeinflusst hat?

**6. Fanden Sie es in bestimmten Assistenzstufen leichter dem System zu vertrauen? Warum oder warum nicht?**

**Seite 04**

**7. Wie gut konnten Sie Ihr Situationsbewusstsein aufrechterhalten auf den unterschiedlichen Automatisierungsstufen?**

| | überhaupt nicht ... sehr gut |
|---|---|
| Mittlere Assistenz/Automatisierung | ○ ○ ○ ○ ○ ○ ○ ○ ○ ○ |
| Hohe Assistenz/Automatisierung | ○ ○ ○ ○ ○ ○ ○ ○ ○ ○ |
| Ausgewogene Assistenz/Automatisierung | ○ ○ ○ ○ ○ ○ ○ ○ ○ ○ |

**8. Gab es Situationen in welchen das Assistenzsystem Ihr Situationsbewusstsein verbessert oder verschlechtert hat?**

**9. Welche Automationsstufe hat es Ihnen ermöglicht das höchste Situationsbewusstsein zu erhalten und warum?**

**Seite 05**

**10. Wie würden Sie die Akzeptanz für das Assistenzsystem auf den unterschiedlichen Automatisierungsstufen bewerten?**

| | überhaupt nicht | | | | | | | | | sehr gut |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| Mittlere Assistenz/Automatisierung | ○ | ○ | ○ | ○ | ○ | ○ | ○ | ○ | ○ | ○ |
| Hohe Assistenz/Automatisierung | ○ | ○ | ○ | ○ | ○ | ○ | ○ | ○ | ○ | ○ |
| Ausgewogene Assistenz/Automatisierung | ○ | ○ | ○ | ○ | ○ | ○ | ○ | ○ | ○ | ○ |

**11. Welche Faktoren haben Ihre Akzeptanz für das Assistenzsystem auf den unterschiedlichen Automatisierungsstufen beeinflusst?**

Seite 06

**12. Wie würden Sie Ihre Workload in den unterschiedlichen Automatisierungsstufen bewerten?**

| | sehr gering ... sehr hoch |
|---|---|
| Mittlere Assistenz/Automatisierung | ○ ○ ○ ○ ○ ○ ○ ○ ○ ○ |
| Hohe Assistenz/Automatisierung | ○ ○ ○ ○ ○ ○ ○ ○ ○ ○ |
| Ausgewogene Assistenz/Automatisierung | ○ ○ ○ ○ ○ ○ ○ ○ ○ ○ |

**13. Gab es spezielle Situationen in denen Ihre Workload merkbar höher oder niedriger war bei bestimmten Assistenzsstufen?**

**14. Hatten Sie das Gefühl, dass die Assistenz oder das Fehlen davon, einen Einfluss auf Ihre Workload hatte? Bitte geben Sie Beispiele an**

Seite 07

**15. Wie beurteilen Sie die Benutzerfreundlichkeit und die allgemeine Benutzererfahrung auf jeder Assistenzstufe?**

| | sehr gering ... sehr hoch |
|---|---|
| Mittlere Assistenz/Automatisierung | ○ ○ ○ ○ ○ ○ ○ ○ ○ ○ |
| Hohe Assistenz/Automatisierung | ○ ○ ○ ○ ○ ○ ○ ○ ○ ○ |
| Ausgewogene Assistenz/Automatisierung | ○ ○ ○ ○ ○ ○ ○ ○ ○ ○ |

**16. Können Sie signifikante Unterschiede bei der Aufgabendurchführung (z.B. Missionszeit, Genauigkeit, Ressourceneinsatz, etc.) bei den verschiedenen Assistenzstufen benennen?**

**17. Gab es Herausforderungen welche auf den unterschiedlichen Assistenzstufen aufgetreten sind und wie haben Sie diese überwunden?**

18. Gab es spezifische Vorteile oder Nutzen, die mit bestimmten Assistenzstufen verbunden waren?

Seite 08

19. Wie haben Sie die Fähigkeit des Systems wahrgenommen, sich zwischen einem mittleren und einem hohen Automatisierungsgrad in der ausgewogenen Assistenzstufe anzupassen?

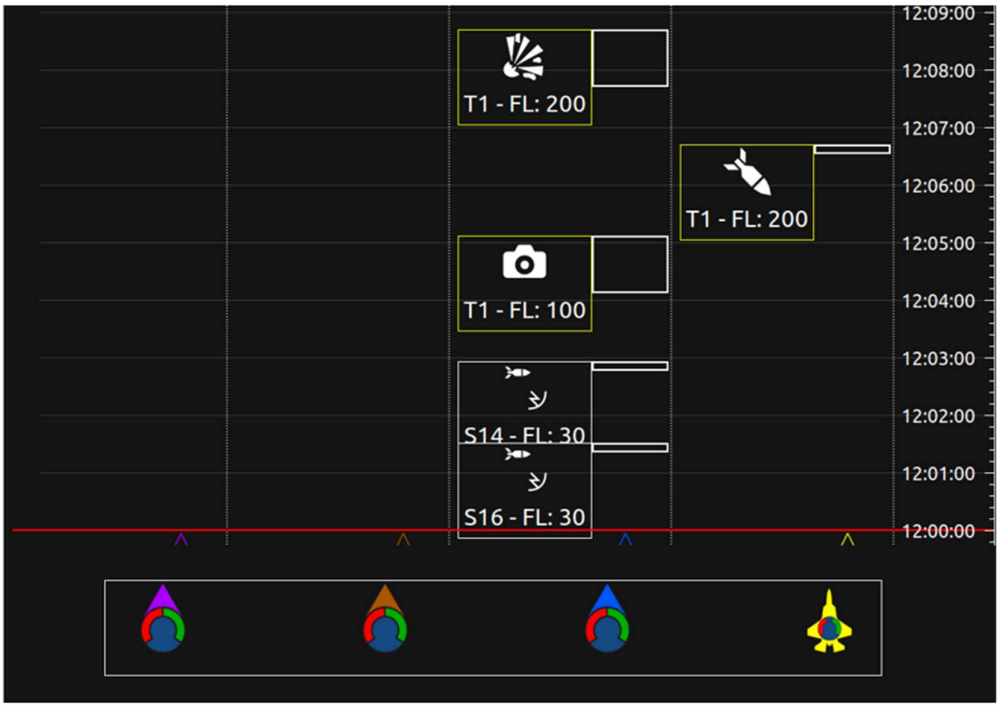
**20. Gab es Fälle, in denen die Anpassungsfähigkeit der Assistenzstufe Ihre Erfahrung positiv oder negativ beeinflusst hat?**

**21. Hatten Sie irgendwelche Bedienschwierigkeiten oder Präferenzen in Bezug der verschiedenen Assistenzstufen?**

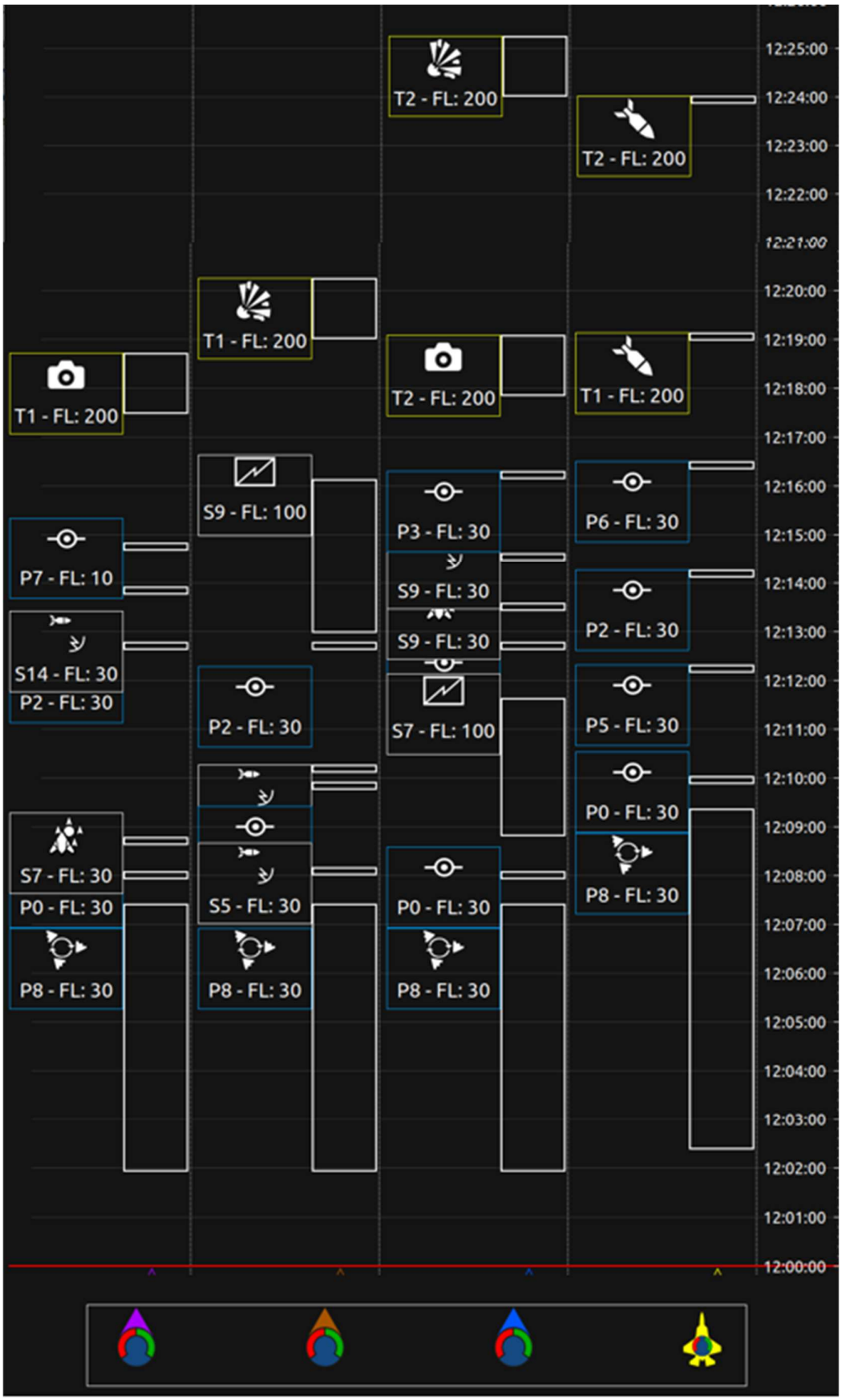
22. Haben Sie Vorschläge wie die unterschiedlichen Assistenzstufen oder die Interaktion im Cockpit verbessert werden kann?

23. Haben Sie sonst noch Punkte die Sie bezüglich der unterschiedlichen Assistenzstufen mitteilen möchten?

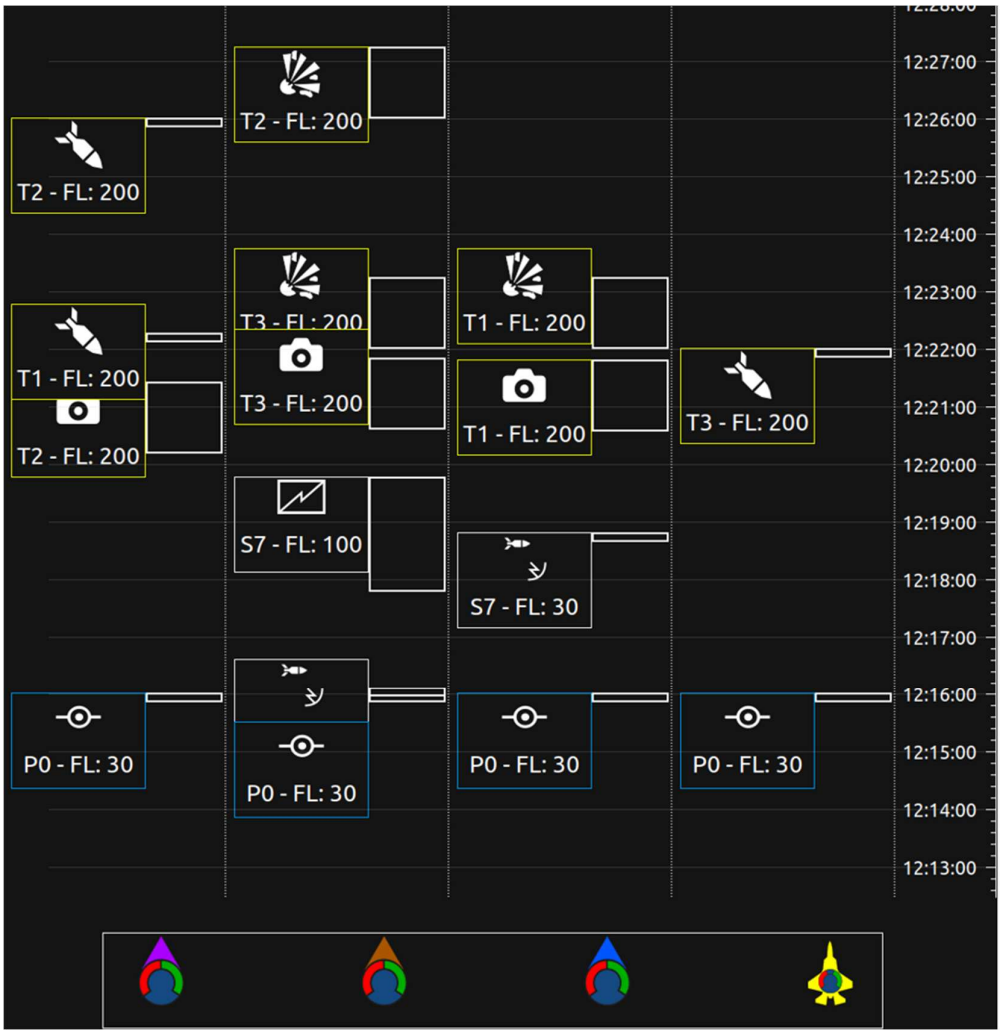
# H Fehlgeschlagener Missionsplan von P1 für S2



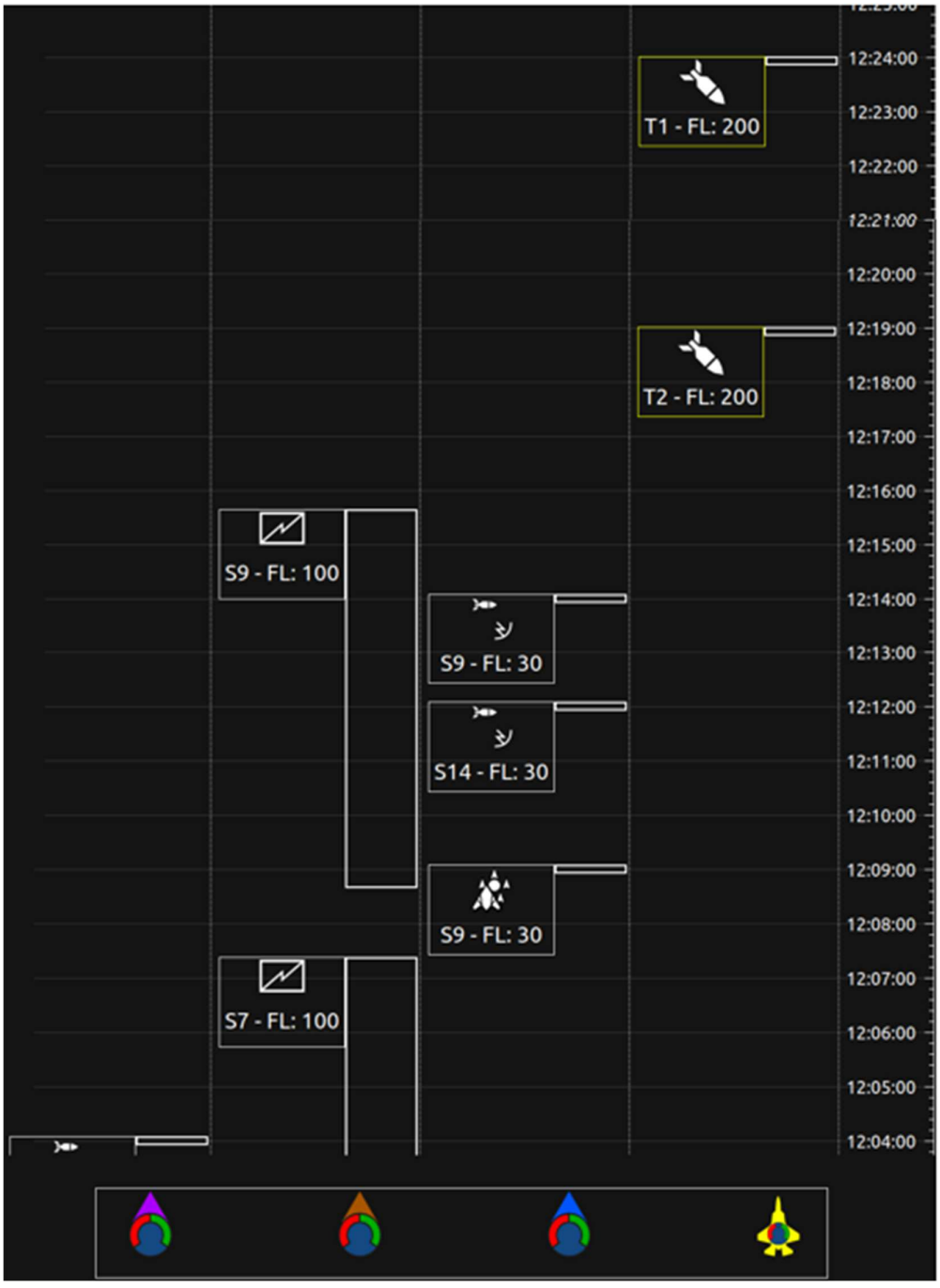
# I Fehlgeschlagener Missionsplan von P4 für S1



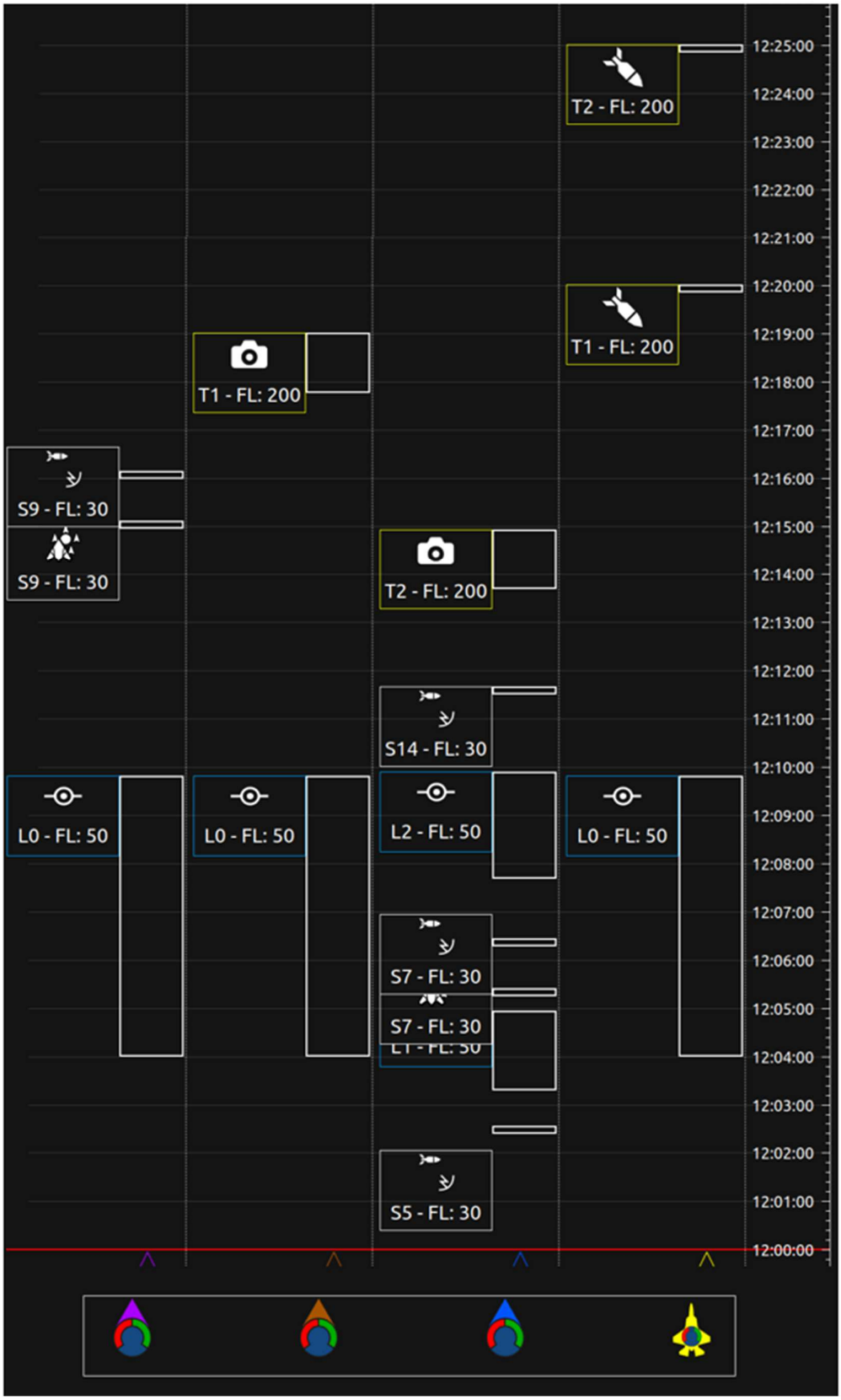
# J Fehlgeschlagener Missionsplan von P4 für S3



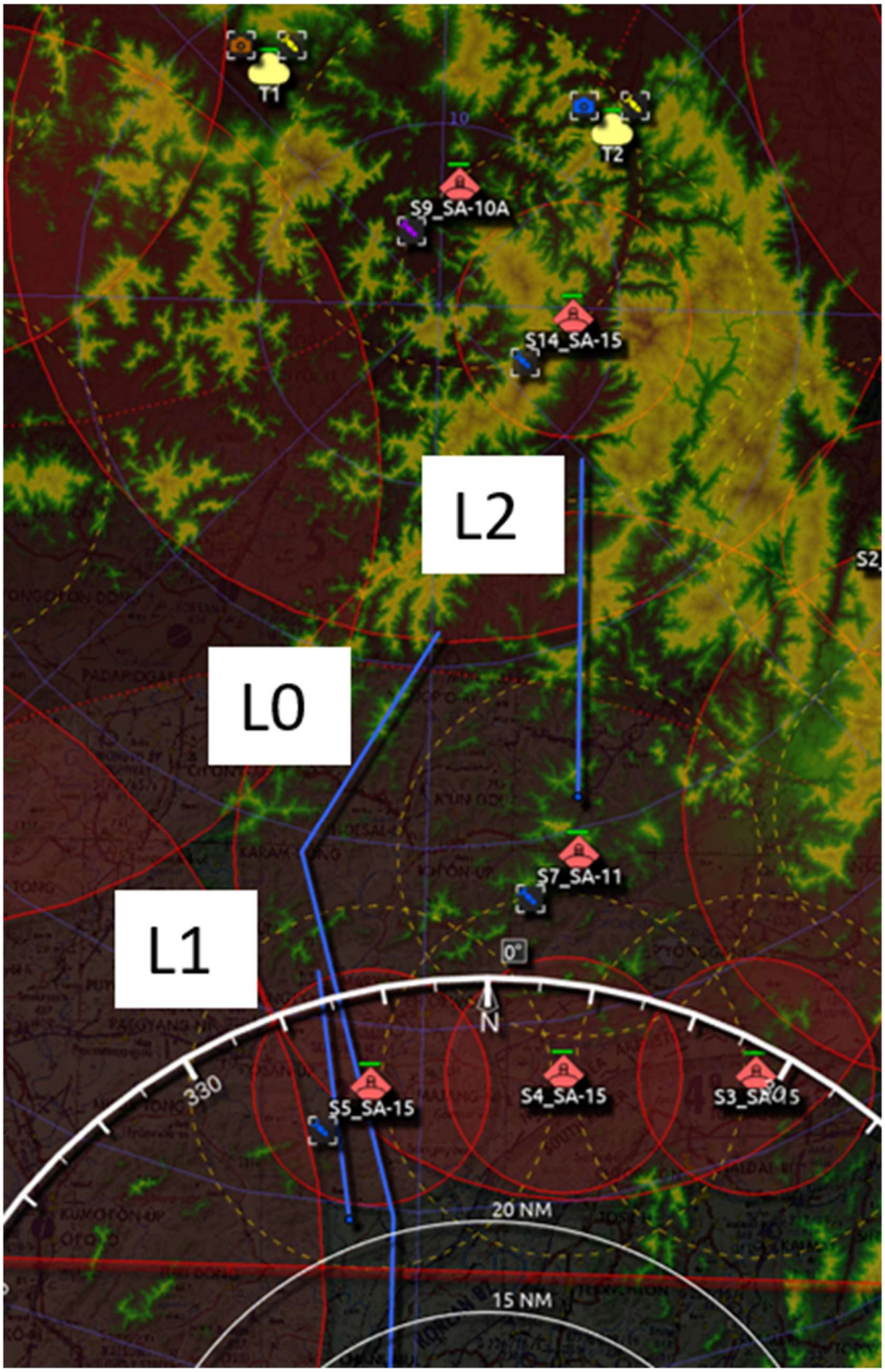
# K Fehlgeschlagener Missionsplan P5 für S1



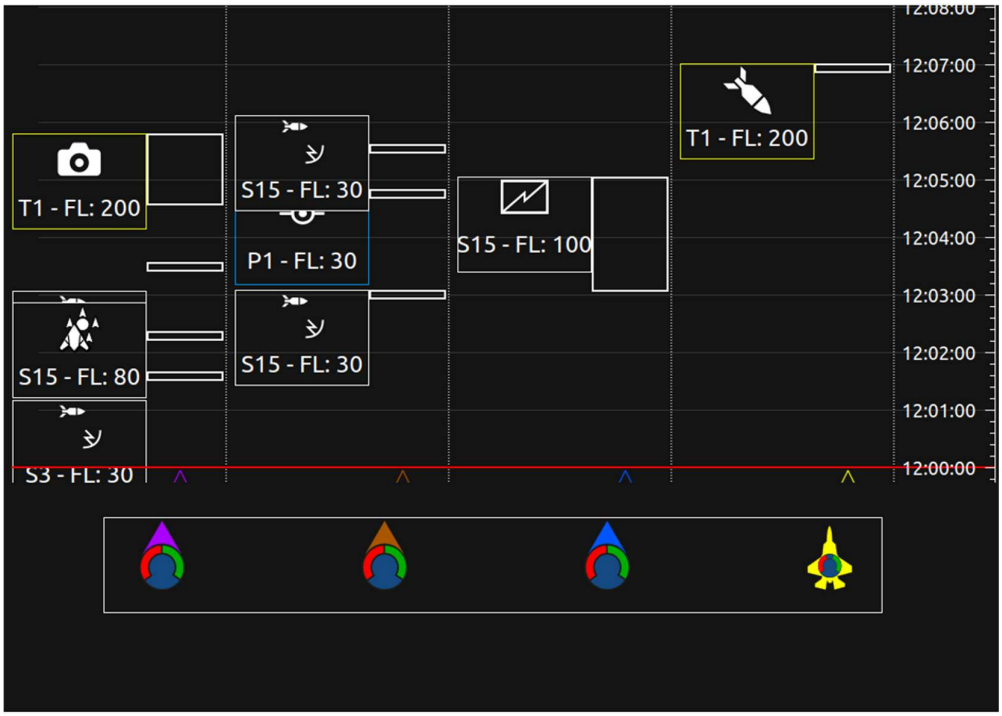
# L Fehlgeschlagener Missionsplan von P7 für S1



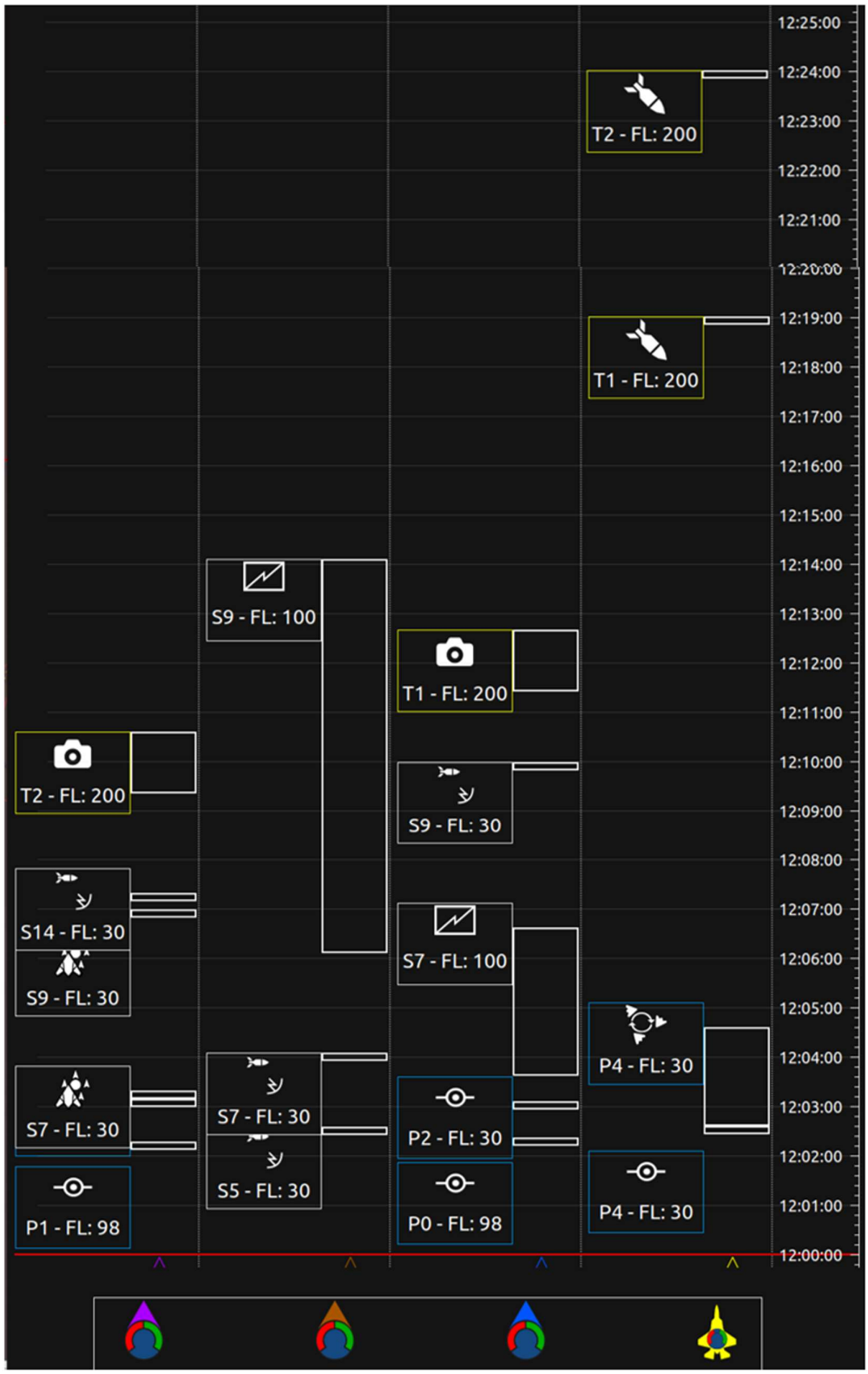
## M Darstellung der taktischen Karte zum fehlgeschlagenen Missionsplan von P7 für S1



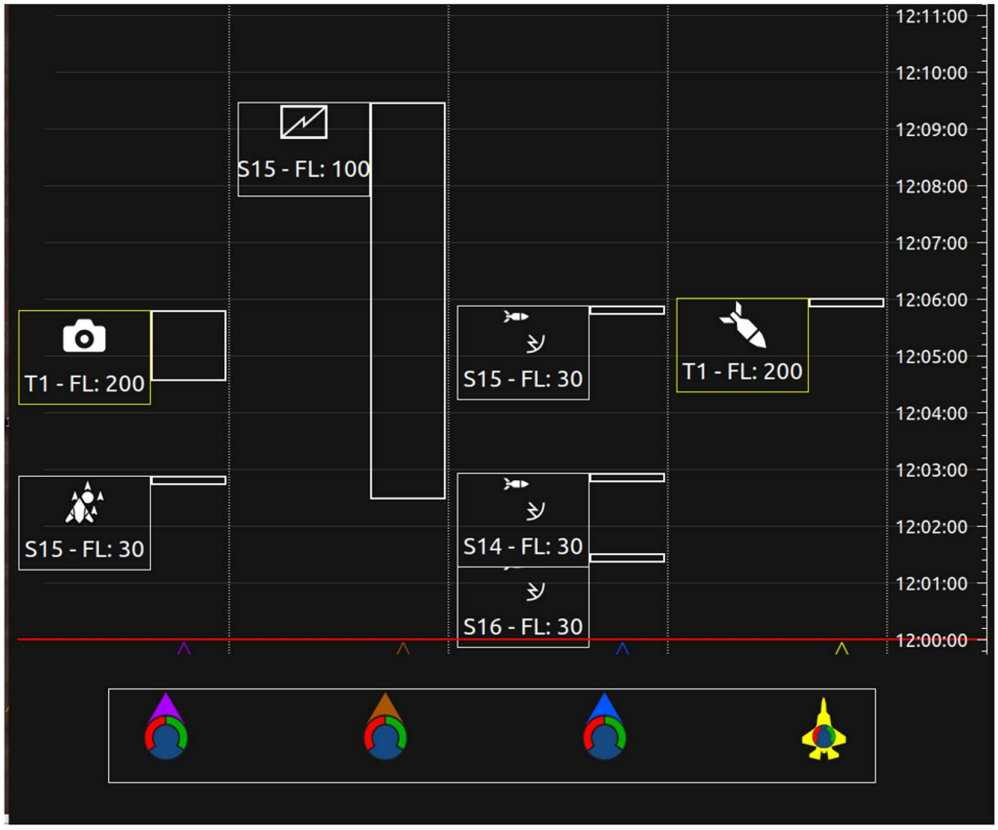
# N Fehlgeschlagener Missionsplan von P7 für S2



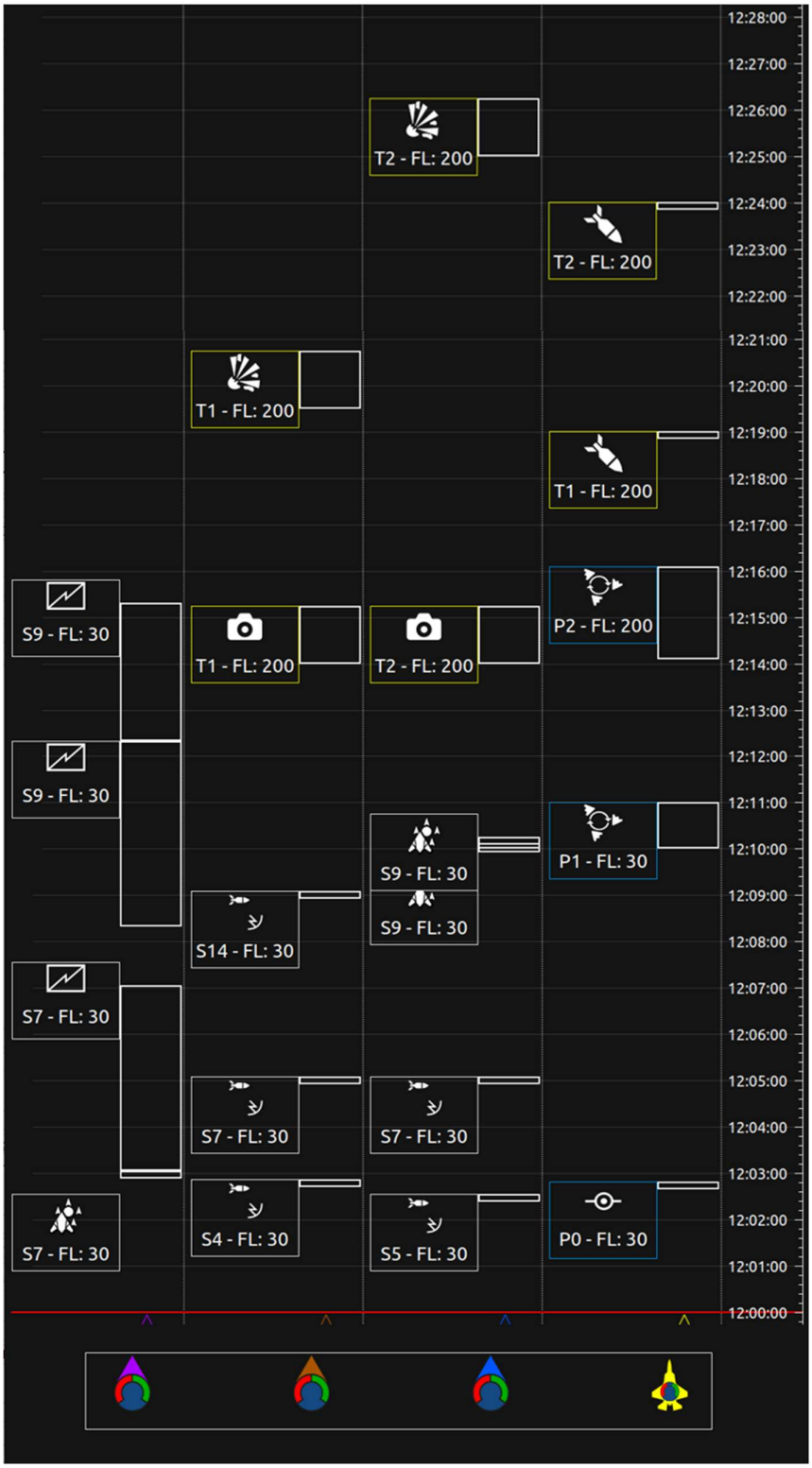
# O Fehlgeschlagener Missionsplan von P8 für S1



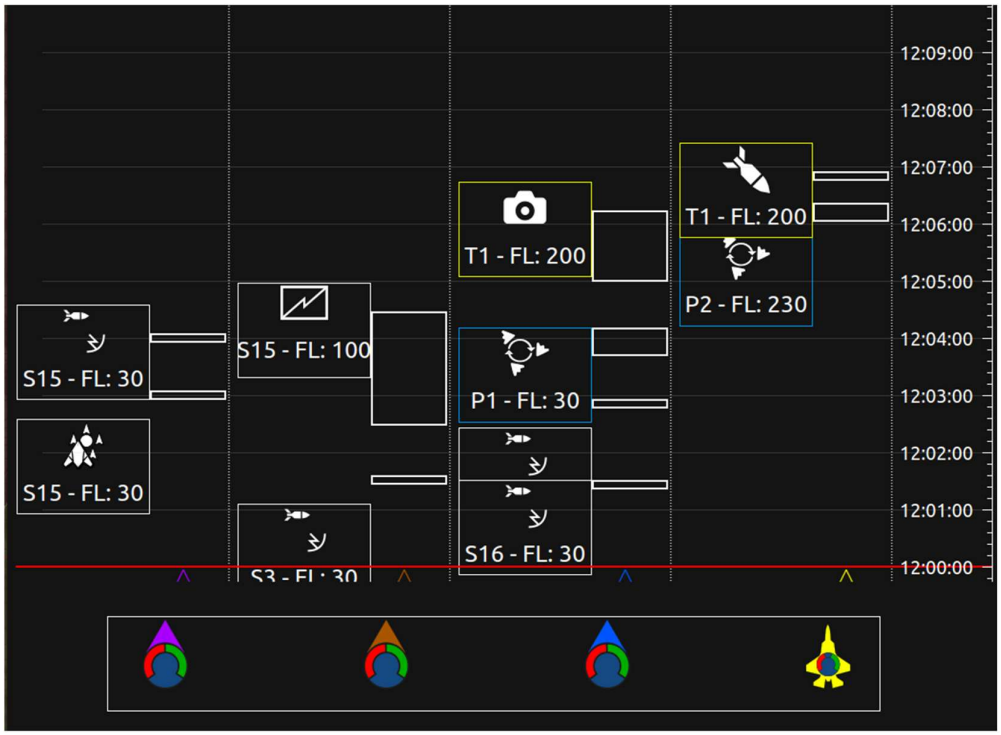
# P Fehlgeschlagener Missionsplan von P8 für S2



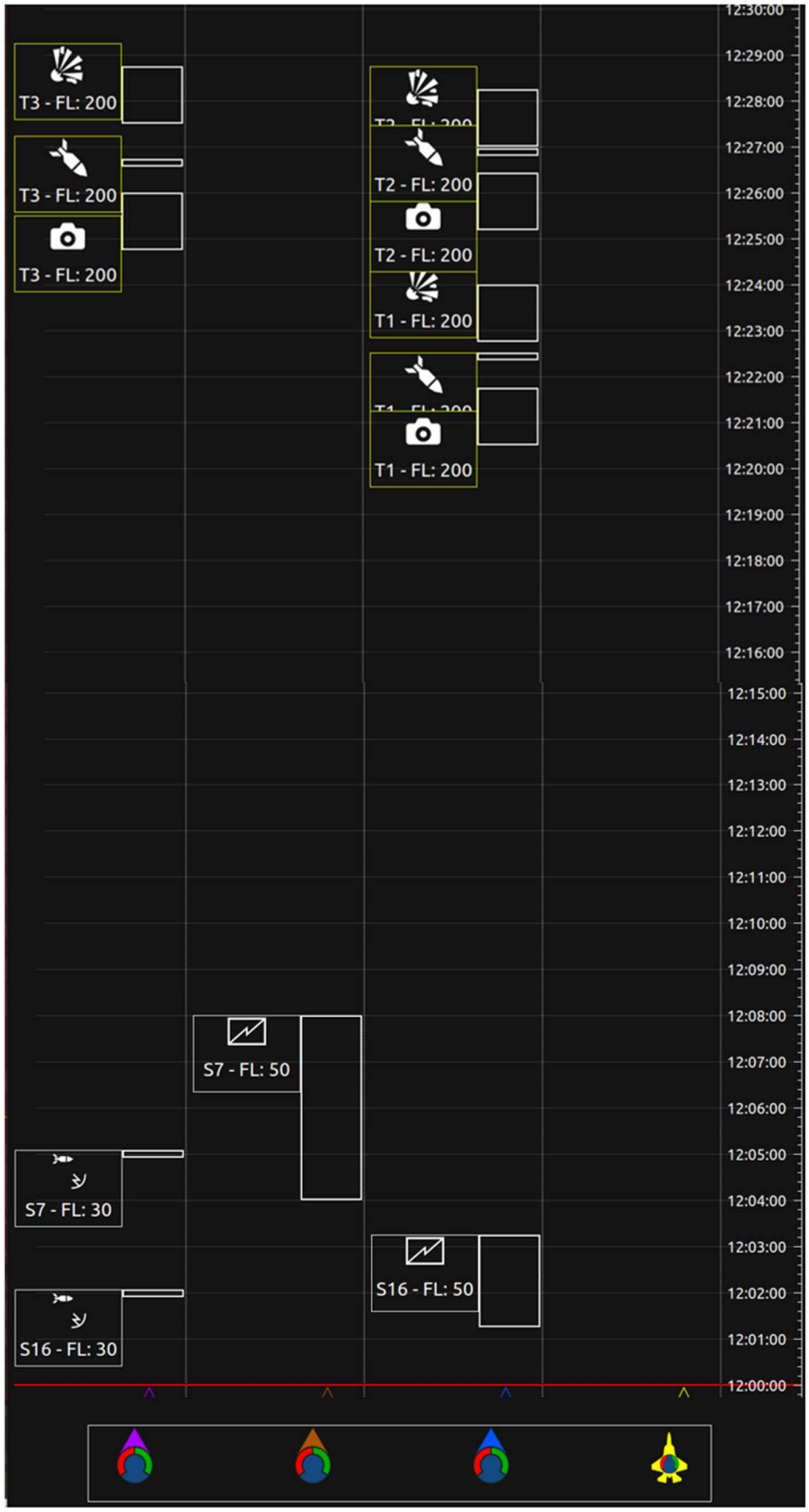
# Q Fehlgeschlagener Missionsplan von P10 für S1



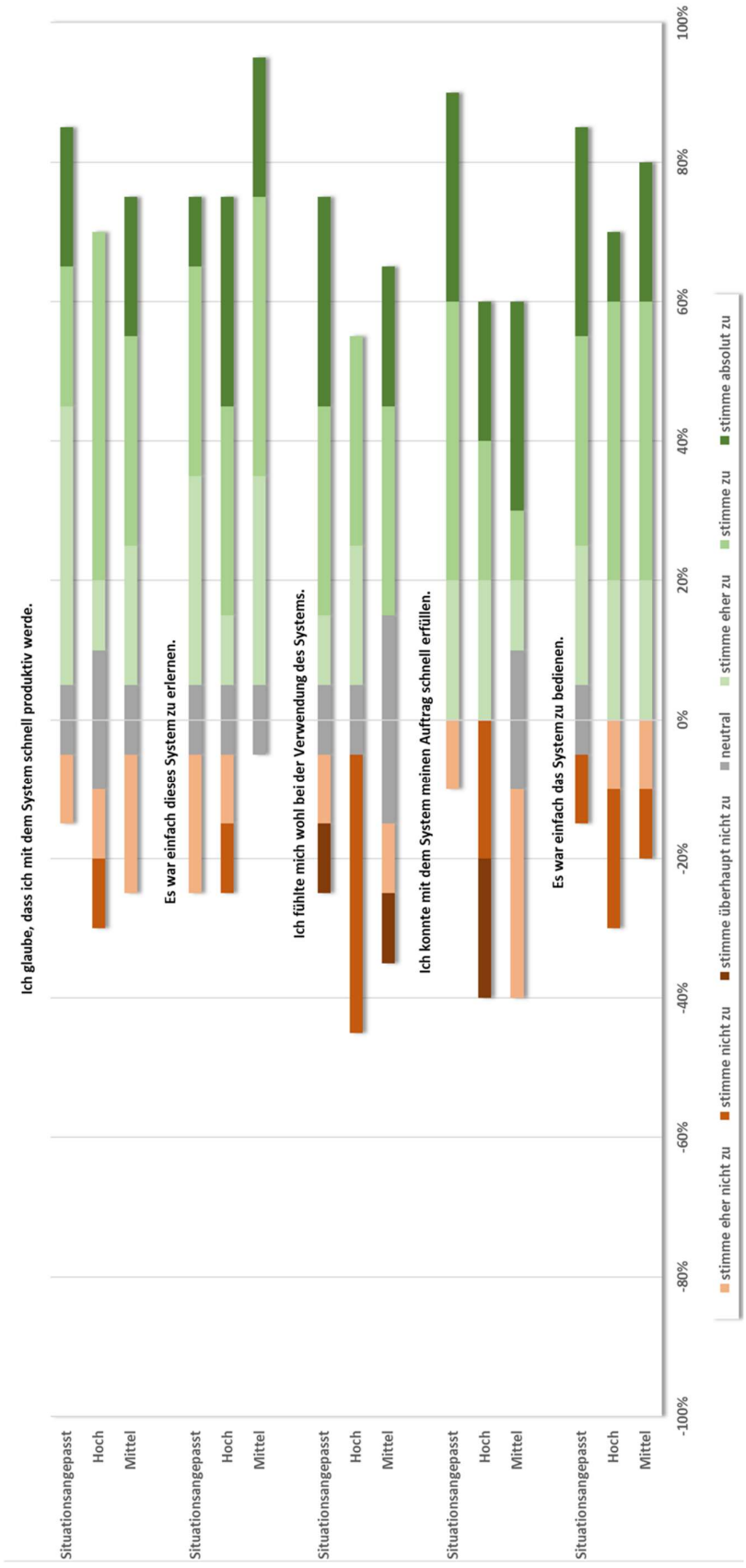
# R Fehlgeschlagener Missionsplan von P10 für S2



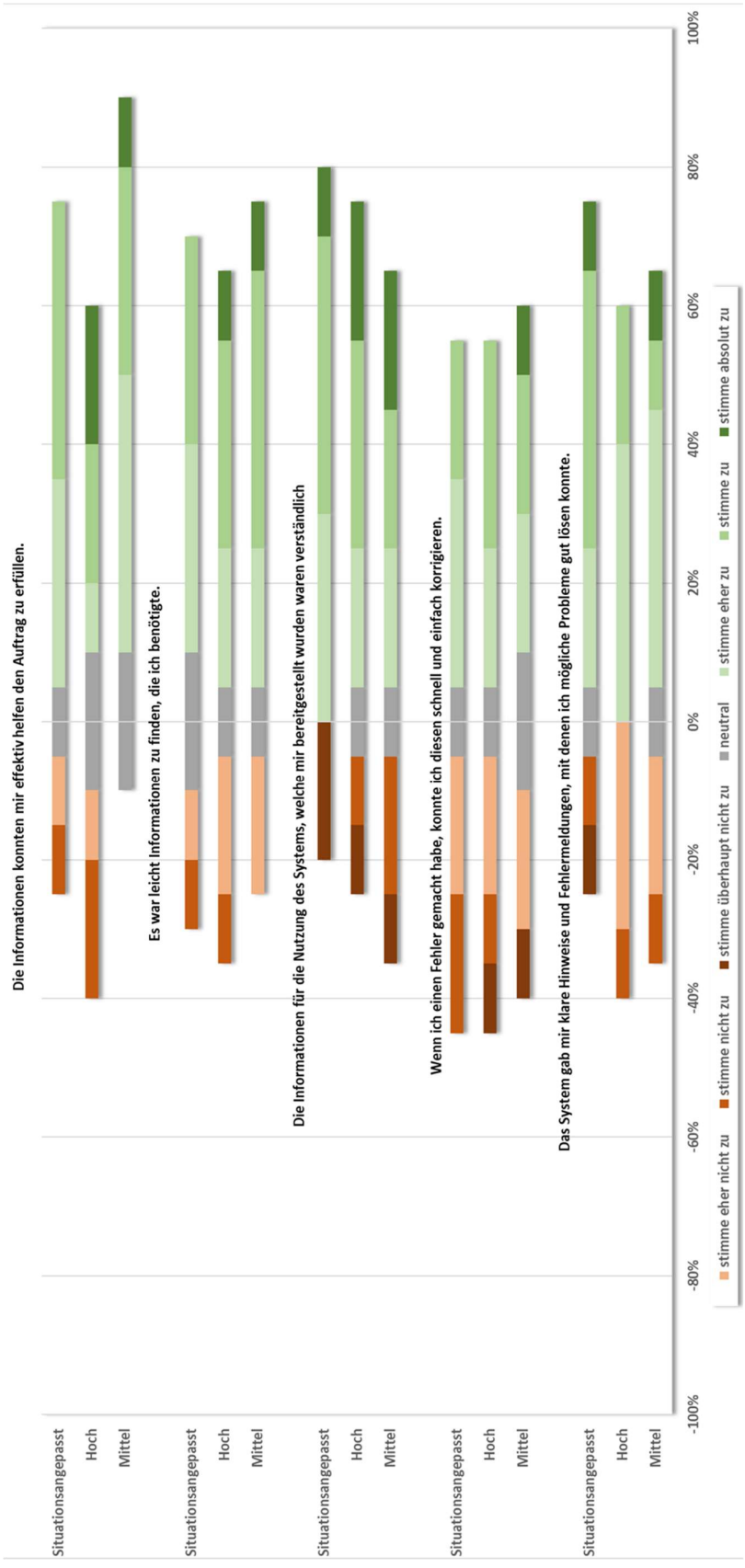
# S Fehlgeschlagener Missionsplan von P10 für S3



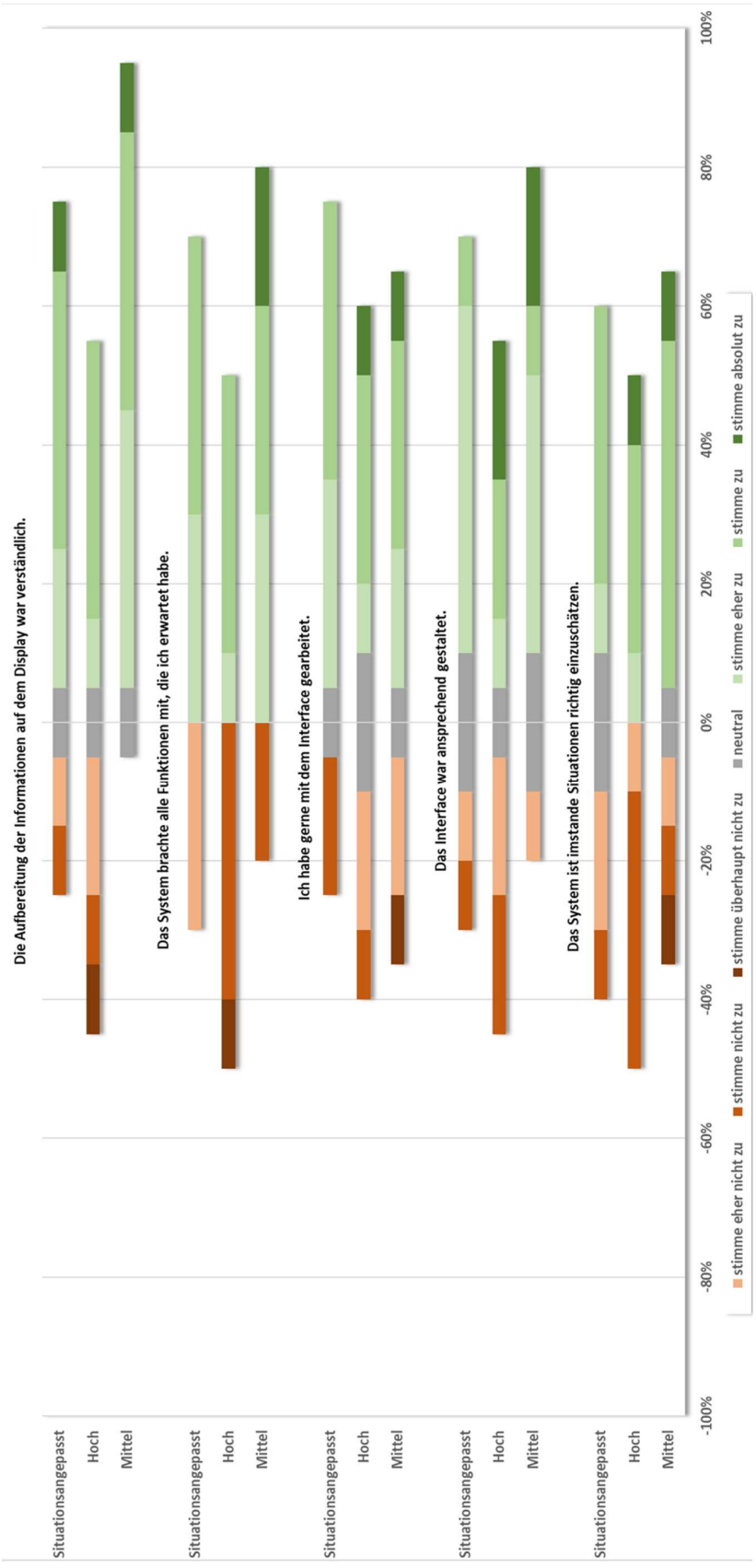
# T Auswertung CSUQ Teil 1



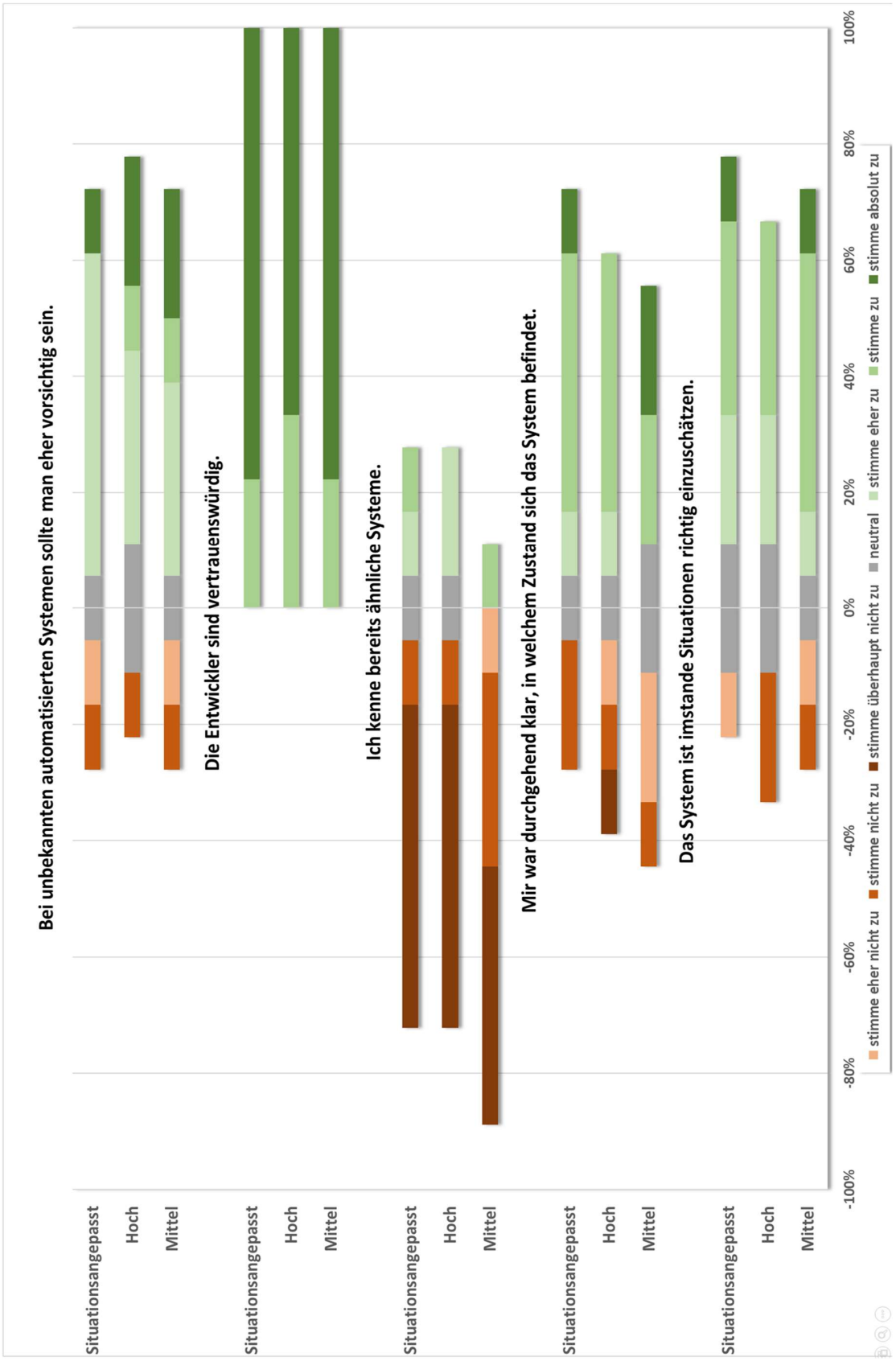
# U Auswertung CSUQ Teil 2



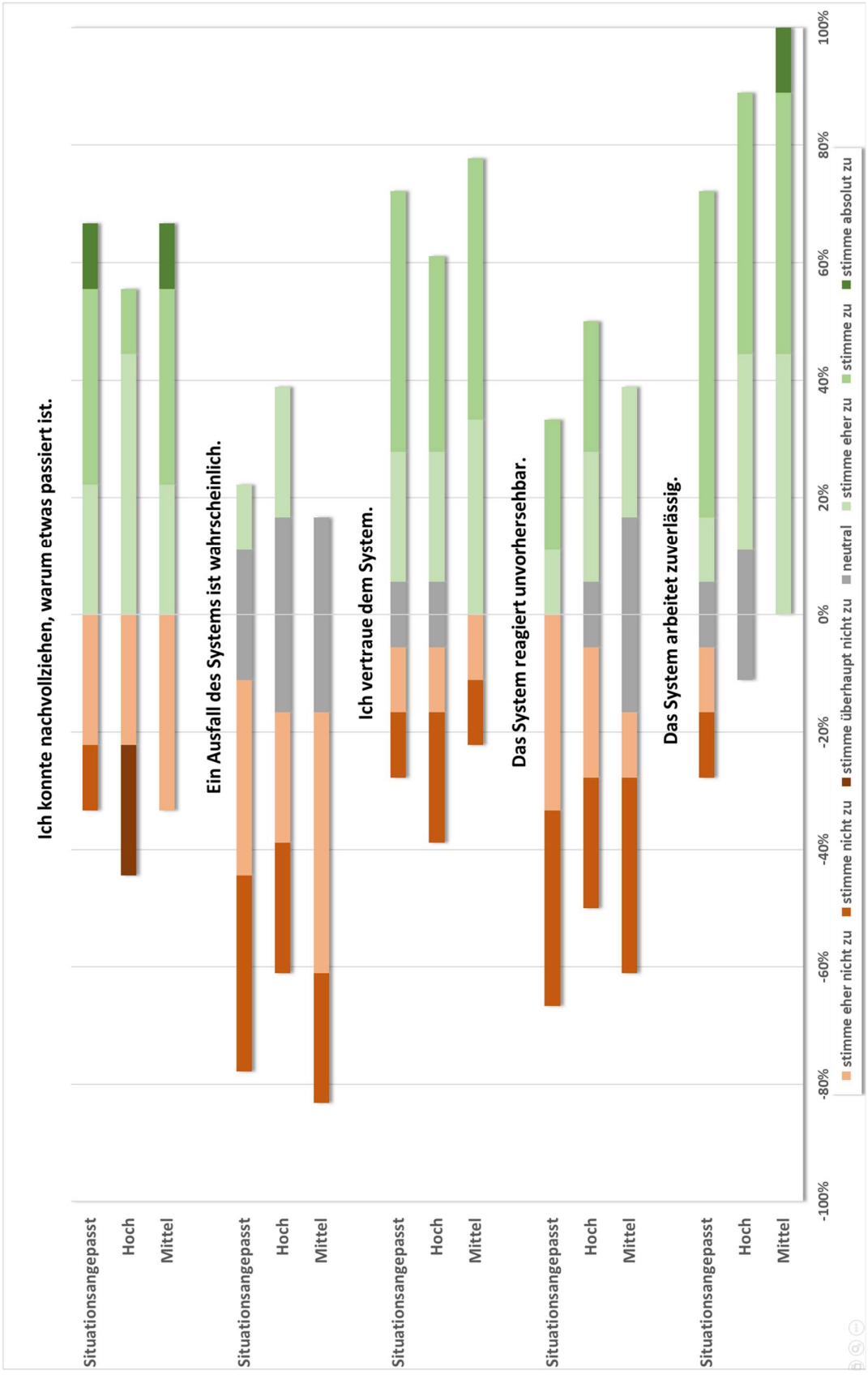
# V Auswertung CSUQ Teil 3



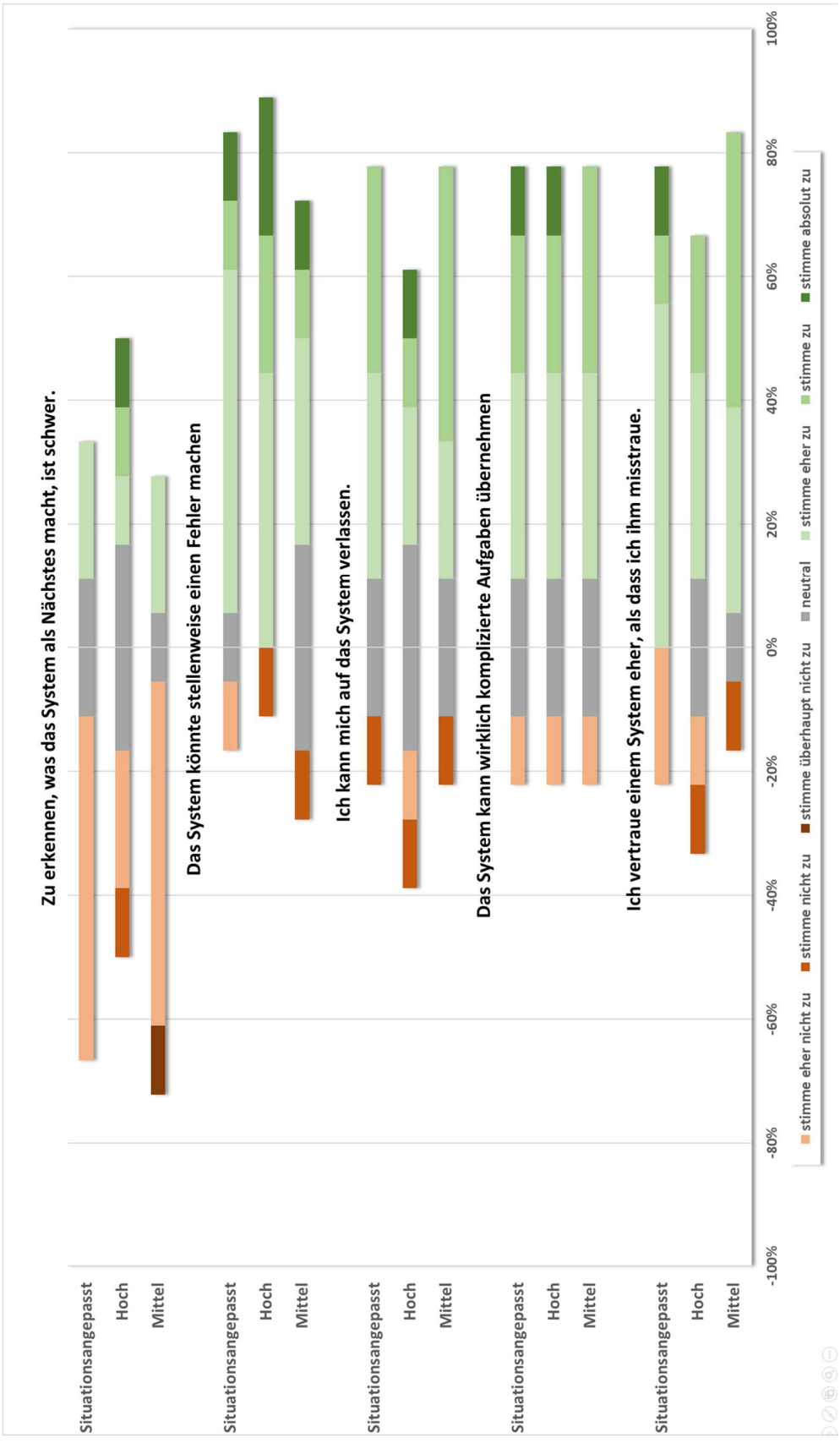
# W Auswertung TiA-Fragebogen 1



# X Auswertung TiA-Fragebogen 2



# Y Auswertung TiA-Fragebogen 3



# Z Auswertung TiA-Fragebogen 4

