Vergleich verschiedener Degradierungsverfahren hoher Automatisierungsstufen in der Flugsicherung

Studienarbeit

Maximilian Diedrich
Matrikel-Nr.: 4705952
Prüfer: Prof. Dr.-Ing. Dirk Kügler
Betreuer: Robert Hunger

Technische Universität Braunschweig

DLR

Institut für Flugführung

Deutsches Zentrum
DLR für Luft- und Raumfahrt

Technische
Universität
Braunschweig

DLR e. V. Institut für Flugführung
Lilienthalplatz 7, 38108 Braunschweig

An die
Fakultät Maschinenbau
der Technischen Universität Braunschweig

Name Prof. Dr.-Ing. Dirk Kügler

Telefon +49 (0)531 295 2500
Telefax +49 (0)531 295 2550
E-Mail dirk.kuegler@dlr.de

30.08.2025

Thema der Studienarbeit für Herrn Maximilian Diedrich

Thema:

- Vergleich verschiedener Degradierungsverfahren von hohen Automationsstufen in der Flugsicherung
- Comparison of different automation downgrading procedures in air traffic control

Ziel:

Das Luftverkehrssystem steht aktuell vor der Herausforderung steigender Verkehrszahlen bei einer deutlichen Personallimitierung in der Flugsicherung. Eine Möglichkeit dieser Herausforderung zu begegnen ist eine Hochautomatisierung der Flugsicherung. Hierbei wird die Führung der Luftfahrzeuge von automatischen Systemen übernommen. Sollten diese Systeme mit ihren Anweisungen vorgegebene operationelle Grenzen überschreiten, erfolgt eine Zurückstufung der Automatisierung und die Fluglotsinnen und Fluglotsen müssen die Arbeit übernehmen.

Das DLR entwickelt für die Hochautomatisierung der Flugsicherung den digitalen Fluglotsen. In der Umsetzung des digitalen Fluglotsen ist bereits ein Verfahren zur so genannten „Redelegation" (Zurückgabe von Luftfahrzeugen an den menschlichen Fluglotsen) vorgesehen.

Die Studienarbeit hat das Ziel das existierende Degradierungsverfahren mit anderen möglichen Verfahren an Hand von verschiedenen Fallbeispielen zu vergleichen. Hierzu sollen die operationellen Anforderungen definiert und an Hand von Konzeptprototypen verglichen werden. Abschließend sollen Empfehlungen erarbeitet werden, mit welchem zeitlichen Vorlauf und über welche Arbeitsschritte eine Degradierung der hochautomatisierten Flugsicherung erfolgen soll.

Durchzuführende Arbeiten:

- **Literaturrecherche:** Untersuchung von existierenden Degradierungsverfahren in der Flugsicherung und im Cockpit, optional auch in anderen hochautomatisierten Domänen
- **Anforderungsanalyse und Entwurf:** Ermittlung der Anforderungen an ein Degradierungsverfahren und Definition verschiedener Verfahrensmöglichkeiten.
- **Umsetzung:** Umsetzung der Verfahren in prototypischen Darstellungen zur Evaluation
- **Vergleich:** Qualitativer Vergleich der verschiedenen prototypischen Darstellungen in Workshops mit mindestens fünf ATM-Experten
- **Ausarbeitung:** Verfassung einer schriftlichen Ausarbeitung und Präsentation

Literatur:

[1] Tyburzy, Lukas und Jameel, Mohsan und Hunger, Robert und Böhm, Julian (2024) Empowering Human-AI Collaboration in Air Traffic Control through Smart Interaction Design. In: 43rd AIAA DATC/IEEE Digital Avionics Systems Conference, DASC 2024. 43rd Digital Avionics Systems Conference 2024, 2024-09-29 - 2024-10-03, San Diego, USA. doi: 10.1109/DASC62030.2024.10749379 Titel anhand dieser DOI in Citavi-Projekt übernehmen. ISBN 979-835034961-0 Titel anhand dieser ISBN in Citavi-Projekt übernehmen. ISSN 2155-7195

[2] Jameel, Mohsan und Tyburzy, Lukas und Gerdes, Ingrid und Pick, Andreas und Hunger, Robert und Christoffels, Lothar (2023) Enabling Digital Air Traffic Controller Assistant through Human-Autonomy Teaming Design. In: 42nd IEEE/AIAA Digital Avionics Systems Conference, DASC 2023. IEEE. 42nd AIAA/IEEE Digital Avionics Systems Conference (DASC), 2023-10-01 - 2023-10-05, Barcelona, Spain. doi: 10.1109/DASC58513.2023.10311220 Titel anhand dieser DOI in Citavi-Projekt übernehmen. ISBN 979-835033357-2 Titel anhand dieser ISBN in Citavi-Projekt übernehmen. ISSN 2155-7195.

[3] Alberto Pasquini, Martina Ragosta, Sara Silvagni, Mark-Alexander Sujan, Eric Rigaud, et al.. Modelling of Automation Degradation : a Case Study. 3rd SESAR Innovation Days (SESAR 2013), Nov 2013, Stockholm, Sweden. pp. 1-8. ⟨hal-01217222⟩

[4] Ehrmanntraut, Dipl-Ing Rüdiger. "Full automation of air traffic management in high complexity airspace." (2010).

[5] Hodgson, Allan, Carys E. Siemieniuch, and Ella-Mae Hubbard. "Culture and the safety of complex automated sociotechnical systems." IEEE Transactions on Human-Machine Systems 43.6 (2013): 608-619.

[6] Hunger, R., Theis, S. (2025). Importance of Delegation and Redelegation in Human-Autonomy-Teamed Air Traffic Control. In: Stephanidis, C., Antona, M., Ntoa, S., Salvendy, G. (eds) HCI International 2025 Posters. HCII 2025. Communications in Computer and Information Science, vol 2529. Springer, Cham. https://doi.org/10.1007/978-3-031-94171-9_30

Zeitrahmen:

Beginn: 30.08.2025

Dauer: 3 Monate

Betreuer:

Robert Hunger
Institut für Flugführung / Abteilung Lotsenassistenz
Deutsches Zentrum für Luft- und Raumfahrt e.V.
Lilienthalplatz 7
38108 Braunschweig

Erstprüfer:

Professor Dr.-Ing. D. Kügler
Deutsches Zentrum für Luft- und Raumfahrt e.V.
Institut für Flugführung
Lilienthalplatz 7
38108 Braunschweig

Zweitprüfer: -

Prof. Dr.-Ing. D. Kügler

Eidesstattliche Erklärung

Ich versichere hiermit, dass ich die vorliegende Arbeit selbständig verfasst und keine anderen als die im Quellenverzeichnis angegebenen Quellen benutzt habe.

Stellen, die wörtlich oder sinngemäß aus veröffentlichten oder noch nicht veröffentlichten Quellen entnommen sind, sind als solche kenntlich gemacht.

Die Zeichnungen oder Abbildungen in dieser Arbeit sind von mir selbst erstellt worden oder mit einem entsprechenden Quellennachweis versehen.

Diese Arbeit ist in gleicher oder ähnlicher Form noch bei keiner anderen Prüfungsbehörde eingereicht worden.

Braunschweig, 31. Januar 2026

M. Diedrich

Maximilian Diedrich

Im Rahmen dieser Arbeit wurden generative KI-Werkzeuge unterstützend eingesetzt. Die Nutzung beschränkte sich auf

- die Grammatikprüfung von Textpassagen,
- das Unterstützen bei der Erstellung von LaTeX-Code für Abbildungen (z.B. Diagramme),
- das Generieren von BibTeX-Einträgen auf Basis bereits ausgewählter Quellen sowie
- die Recherche nach potenziell relevanter wissenschaftlicher Literatur.

Die Auswahl der zitierten Quellen, die inhaltliche Bewertung und Einordnung der Literatur sowie alle fachlichen Aussagen und Berechnungen wurden eigenverantwortlich durch den Autor vorgenommen. KI-generierte Vorschläge wurden kritisch geprüft und gegebenenfalls überarbeitet.

Institut
für Flugführung

Deutsches Zentrum
für Luft-
und Raumfahrt e.V.

Vergleich verschiedener Degradierungsverfahren hoher Automatisierungsstufen in der Flugsicherung

Maximilian Diedrich

Version: 1.0

DLR ID: **DLR-IB-FL-BS-2026-90**

Deutsches Zentrum
für Luft- und Raumfahrt e.V.

© Institut für Flugführung
Januar 2026
Lilienthalplatz 7
D-38108 Braunschweig
Direktor: Prof. Dr.-Ing. D. Kügler

web: http://www.dlr.de/fl

Zugänglichkeitsstufe: A/I (offen)

Dokument Information

Titel:	Vergleich verschiedener Degradierungsverfahren hoher Automatisierungsstufen in der Flugsicherung
Betreff:	Studienarbeit
Institut:	Institut für Flugführung
Fachbereich:	Lotsenassistenz
Autor / Matr. Nr.:	Maximilian Diedrich/ 4705952
Zugänglichkeit:	
Datum:	2026-10-11

Freigabe:

Die Freigabe erfolgt lt. gesondertem Freigabeformblatt

© 2026, DLR, Institut für Flugführung, Deutschland

Dieses Werk einschließlich aller seiner Teile ist urheberrechtlich geschützt. Jede Verwendung innerhalb und außerhalb der Grenzen des Urheberrechtsgesetzes ist ohne Zustimmung des DLR, Institut für Flugführung, unzulässig und wird zivil- und strafrechtlich verfolgt. Dies gilt insbesondere für Vervielfältigungen, Übersetzungen, Mikroverfilmungen und die Einspeicherung und Verarbeitung in elektronischen Systemen.

Änderungsverfolgung

Version	Datum	Geänderte Seiten / Kapitel	Bemerkungen
1.0	31.01.2026	erste Version	

Abstract

This paper examines how degradation processes can be designed in a highly automated air traffic control system, i.e. the transfer of an aircraft from a digital air traffic control assistance system back to the ATCO. The starting point is a digital air traffic controller developed by DLR that uses human-autonomy teaming. If the system exceeds its limits, it must transfer the control of an aircraft back to the human ATCO. This raises the question of the order in which the work steps should be carried out and how much lead time can be expected in the event of a degradation. By working out the operational requirements of this process, several process variants can be designed for three selected situations (conflict, partial system failure, and pilot request). These will be evaluated in an expert workshop. The findings will be used to derive recommendations for the design of future degradation processes in highly automated air traffic control systems. In future designs of the degradation process, it should be taken into account that in the event of a conflict, both conflict partners are handed over simultaneously. A countdown helps indicating the beginning of the degradation and there is no advantage in a shared control of an aircraft by ATCO and digital ATCO. These results form a starting point for the further development of the degradation process in highly automated air traffic control.

Inhaltsverzeichnis

Eidesstattliche Erklärung **4**

Dokument Information **II**

Abstract **V**

Abbildungsverzeichnis **VII**

Tabellenverzeichnis **VIII**

Abkürzungsverzeichnis **IX**

Symbolverzeichnis **X**

1 Einleitung **1**

2 Stand der Technik **2**
2.1 Begriffsdefinitionen 2
2.2 Der Lotsenarbeitsplatz und Lotsenassistenzsysteme 3
2.3 Degradierungsverfahren in der Flugsicherung 4
2.3.1 Degradierungsverfahren des digitalen Fluglotsen des DLR 4
2.3.2 Degradierungsverfahren des digitalen Fluglotsen des Eurocontrol MUAC 5
2.3.3 Sicherheit degradierter Betriebsarten der Eurocontrol Betriebstechnik . 5
2.3.4 Notfallverfahren bei Ausfall der bodengebundenen Funkausrüstung . . 6
2.3.5 Vorgehen bei Short Term Conflict Alert 6
2.4 Degradierungsverfahren im Cockpit 7

3 Konzeptionierung **10**
3.1 Anforderungen an Degradierungsverfahren 10
3.1.1 Operationelle Anforderungen an Assistenzsysteme der Flugsicherung . 10
3.1.2 Operationelle Grenzen der Assistenzsysteme 16
3.1.3 Degradierungsstufen 18
3.2 Definition der zu bewertenden Redelegationskonzepte 18
3.2.1 Schematische Darstellungsform der Verfahrensentwürfe 19
3.2.2 Verfahren 1 - Systemgrenzen am Beispiel einer Konfliktsituation 19
3.2.3 Verfahren 2 - Degradierung durch einen partiellen Systemausfall 20
3.2.4 Verfahren 3 - Pilot Request (Level Change) 22
3.3 Prototypische Darstellung der Verfahren 23

4 Evaluation der Degradierungsverfahren **25**
4.1 Methodik und Bewertungskriterien 25
4.1.1 User Experience Questionnaire - Short Version [UEQ-S] 25
4.1.2 Ranking der Entwurfsvarianten 26

4.1.3 Fragen mit offenem Textfeld 26
4.1.4 Aufbau des Bewertungsbogens und Online-Fragebogens 27
4.2 Datenerhebung 27
4.2.1 Expertenworkshop 28
4.2.2 Online-Fragebogen 29
4.3 Auswertung und Ergebnisse 29
4.3.1 Situation 1 - Systemgrenzen (Konflikt) 29
4.3.2 Situation 2 - Partieller Systemausfall 34
4.3.3 Situation 3 - Pilot Request (Level Change) 37
4.3.4 Anmerkungen zur Methodik und prototypischen Darstellung 40
4.3.5 Ergebnisse 40

5 Empfehlungen für das Degradierungsverfahren 42
5.1 Arbeitsschritte 42
5.2 Zeitlicher Vorlauf 46

6 Schlussbetrachtung 49

7 Anhang 51
7.1 Flussdiagramme 51
7.2 Digitale Medien 60

Abbildungsverzeichnis

3.1 Prototypische Darstellung der Entwürfe 23
4.1 Mittelwert des UEQ-S Situation 1 - Version 1 30
4.2 Mittelwert des UEQ-S Situation 1 - Version 2 30
4.3 Mittelwert des UEQ-S Situation 1 - Version 3 31
4.4 Mittelwert des UEQ-S Situation 2 - Version 1 35
4.5 Mittelwert des UEQ-S Situation 2 - Version 2 35
4.6 Mittelwert des UEQ-S Situation 2 - Version 3 36
4.7 Mittelwert des UEQ-S Situation 3 - Version 1 38
4.8 Mittelwert des UEQ-S Situation 3 - Version 2 38
5.1 Verbessertes Radarlabel Situation 1 - Systemgrenze (Konflikt) 42
5.2 Flussdiagramm Situation 1 - Systemgrenze (Konflikt) - Verbesserter Prozess . . 43
5.3 Flussdiagramm Situation 2 - Partieller Systemausfall (Höhenmodul) - Verbesserter Prozess 44
5.4 Flussdiagramm Situation 3 - Pilot Request (Level Change) - Verbesserter Prozess 45
5.5 Empfohlener zeitlicher Vorlauf der Redelegation 47
7.1 Flussdiagramm Situation 1 - Konflikt - Variante 1 51
7.2 Flussdiagramm Situation 1 - Konflikt - Variante 2 52
7.3 Flussdiagramm Situation 1 - Konflikt - Variante 3 53
7.4 Flussdiagramm Situation 2 - Partieller Systemausfall - Variante 1 54
7.5 Flussdiagramm Situation 2 - Partieller Systemausfall - Variante 2 55
7.6 Flussdiagramm Situation 2 - Partieller Systemausfall - Variante 3 56
7.7 Flussdiagramm Situation 3 - Pilot Request - Variante 1 57
7.8 Flussdiagramm Situation 3 - Pilot Request - Variante 2 58

Tabellenverzeichnis

3.1 Priorisierte Anforderungen für den Entwurf des Redelegationsprozesses 17
4.1 Ranking der Versionen in der Situation 1 - Konflikt 34
4.2 Ranking der Versionen in der Situation 2 - Partieller Systemausfall 37
4.3 Ranking der Versionen in der Situation 3 - Pilot Request 39
4.4 UEQ-S Pragmatische-, Hedonistische- und Gesamtqualität 40
7.1 Statistische Zeiten der Prozessschritte in der Flugsicherung 59

Abkürzungsverzeichnis

AMAN	Arrival Manager
ARGOS	ATC Real Ground-breaking Operational System
ATCO	Air Traffic Control Officer
CPDLC	Controller-Pilot Data Link Communication
D-ATCO	Digital - Air Traffic Control Officer
DFS	Deutsche Flugsicherung
DIRC	Digital Interactive Reliable Controller
DLR	Deutsches Zentrum für Luft- und Raumfahrt
ECAM	Electronic Centralized Aircraft Monitor
HI-DIRC	Human Interface - Digital Interactive Reliable Controller
HMI	Human Machine Interface
HQ	Hedonistische Qualität
ICAO	International Civil Aviation Organization
Lfz	Luftfahrzeug
MCDD	Maneuver Completion Detection Delay
MSAW	Minimum Safe Altitude Warning
MUAC	Maastricht Upper Area Control Centre
MTCD	Medium Term Conflict Detection
PQ	Pragmatische Qualität
STCA	Short Term Conflict Alert
TCAS	Traffic Alert and Collision Avoidance System
TCAS-TA	Traffic Alert and Collision Avoidance System - Traffic Advisory
TACS-RA	Traffic Alert and Collision Avoidance System - Resolution Advisory
UACC	Upper Area Control Center
UEQ	User Experience Questionnaire
UEQ-S	User Experience Questionnaire - Short Version

Symbolverzeichnis

$D_{\text{projected}}$	Projizierter Abstand [m]
$D_{\text{separation}}$	Sicherheitsabstand [m]
T_{critical}	Sicherheitskritische Zeit [s]
T_{current}	Aktueller Zeitpunkt
$T_{\text{lookahead}}$	Zeitlicher Vorlauf [s]

1 Einleitung

Das europäische Luftverkehrssystem steht derzeit vor einer zentralen Herausforderung: In den letzten Jahren nahmen die Luftverkehrsströme kontinuierlich zu und weitere Zuwächse werden von Eurocontrol vorausgesagt [1]. Auf der anderen Seite bleibt das Personal der Flugsicherung weiter begrenzt, was in der Folge zu Verspätungen führt. [2]. Um diesem Engpass zu begegnen, wird eine Hochautomatisierung der Flugsicherung als Lösung in Betracht gezogen und ist bereits in der Entwicklung. Hier sollen automatische Assistenzsysteme die Führung von Luftfahrzeugen übernehmen und damit die Arbeitsbelastung der Fluglotsinnen und Fluglotsen reduzieren. Diese automatisierten Systeme können allerdings nicht alle komplexen Situationen bewältigen, weshalb sie unter bestimmten Umständen an ihre operationelle Grenzen stoßen und diese ggf. überschreiten. An der Stelle ist eine Zurückstufung der Automatisierung erforderlich – eine sogenannte Degradierung, bei der die Fluglotsinnen und Fluglotsen die Kontrolle über das Luftfahrzeug wieder übernehmen.

Das Deutsche Zentrum für Luft- und Raumfahrt (DLR) entwickelt derzeit einen digitalen Fluglotsen für die Hochautomatisierung der Flugsicherung. Diese neue Technologie stellt neue Anforderungen an die der Gestaltung der Prozessabläufe und Interaktion für Systeme, in denen Human-Autonomy-Teaming betrieben wird [3]. Die Gestaltung der Degradierungsverfahren, die einen sicheren und effizienten Übergang von der automatisierten Kontrolle zurück zur konventionellen Kontrolle durch den Menschen ermöglichen, ist ein Teil davon.

Hier setzt diese Arbeit mit dem Ziel an, Empfehlungen für die Gestaltung der in dem Umfeld bisher wenig betrachteten Degradierungsprozesse zu vermitteln. Weiter soll ein Prozessablauf als Ausgangspunkt zukünftiger Degradierungsverfahren geschaffen werden, von dem aus die Entwicklung fortgeführt werden kann. Die Empfehlungen beruhen auf einer Analyse und dem Vergleich heutiger Degradierungsverfahren der Flugsicherung und des Cockpits. Aus dieser lassen sich operationelle Anforderungen für Degradierungsverfahren hoher Automationsstufen ableiten und daraus Konzeptprototypen zu drei ausgewählten Anwendungs-Szenarien entwickeln und evaluieren. Die im Expertenworkshop gewonnenen Erkenntnisse sollen in die Empfehlungen für die weitere Entwicklung der Degradierung der hochautomatisierten Flugsicherung einfließen.

Zunächst wird in Kapitel 2 der aktuelle Stand der Technik am Lotsenarbeitsplatz und seiner wichtigsten Assistenzsysteme erfasst. Daraufhin werden bestehende Degradierungsverfahren in der Flugsicherung und im Cockpit betrachtet. Hieraus lässt sich durch eine Anforderungsanalyse in Kapitel 3 die Grundlage mehrerer Konzeptprototypen schaffen. Sie werden für die ausgewählten Szenarios Systemgrenze (Konflikt), partieller Systemausfall (Höhenmodul) und Pilot Request (Level Change) entwickelt. Kapitel 4 beschreibt das Bewertungsverfahren, die Durchführung des Experten-Workshops und die daran anschließende Auswertung der Ergebnisse. Sie werden in Kapitel 5 als Empfehlungen zusammengefasst und anschließend kurz in Kapitel 6 diskutiert.

2 Stand der Technik

Um die Möglichkeiten und Grenzen einer Degradierung der hochautomatisierten Systeme kritisch bewerten zu können, ist ein umfassendes Verständnis der gegenwärtigen technischen und organisatorischen Randbedingungen erforderlich. Dieses Kapitel gibt einen strukturierten Überblick über die theoretischen Grundlagen und praktischen Implementierungen von Degradierungsverfahren im Luftverkehr. Das Kapitel gliedert sich in vier Abschnitte. Zunächst (Abschnitt 2.1) werden zentrale Begriffe definiert, die für die nachfolgende Analyse als auch spätere Kapitel notwendig sind. Hier wird insbesondere auf die Begriffe Degradierung, Redelegation und Konflikt eingegangen. In Abschnitt 2.2 wird die gegenwärtige Gestaltung von Lotsenarbeitsplätzen und die hier eingesetzten Flugführungsverfahren analysiert. Abschnitt 2.3 beschreibt heutige Forschungsansätze hochautomatisierter Assistenzsysteme in der Flugsicherung und darin implementierten Degradierungskonzepte. Hier wird aufgezeigt, welche Maßnahmen derzeit in Situationen eingeleitet werden, sollte das System an seine Grenzen kommen. Im Gegensatz dazu wird in Abschnitt 2.4 untersucht, wie exemplarisch Airbus Fly-By-Wire-Flugzeuge, Degradierungsverfahren bei Ausfällen von Systemen, des Autopiloten oder der Flugsteuerung handhaben.

2.1 Begriffsdefinitionen

Zuerst sollen die zentralen Begriffe Degradierung, Redelegation und Konflikt im Rahmen der hochautomatisierten Assistenzsysteme in der Flugsicherung definiert werden.

Unter einer *Degradierung* wird im allgemeinen Sprachgebrauch gemäß dem Digitalen Wörterbuch der deutschen Sprache eine „Verschlechterung des Zustands, der Qualität oder Eigenschaften von Materialien, Böden o.Ä.“ [4] verstanden. Diese eher stofflich-materielle Perspektive lässt sich nicht unmittelbar auf die Automationstechnik übertragen, deutet aber bereits an, dass eine Degradierung mit einer Veränderung von Zuständen oder Eigenschaften eines Systems einhergeht. Hollnagel et al. unterscheiden im SESAR *System Performances under Automation Degradation* (SPAD)-Projekt drei Formen der Degradation automatisierter Systeme in der Flugsicherung: (1) Die *confined degradation*, bei der die Beeinträchtigung auf das System oder die Struktur begrenzt bleibt, (2) die *average degradation*, bei der zusätzlich direkt gekoppelte Systeme betroffen sind, sowie (3) die *extended degradation*, bei der sich die Beeinträchtigung auf alle direkt und indirekt verbundenen Systeme ausbreitet [5]. Im Rahmen dieser Arbeit wird der Begriff Degradierung auf das Zurückstufen der Fähigkeiten eines Assistenzsystems eines Fluglotsen (Air Traffic Control Officer, ATCO) beschränkt.

Angelehnt an [3] wird die *Redelegation* als der vom digitalen Lotsen (D-ATCO) initiierte, meist zeitkritische Rücktransfer der Kontrolle eines Luftfahrzeugs an den ATCO bezeichnet. Er umfasst zusätzlich eine Information, die den Vorgang Rücktransfer der Kontrolle begründet. Darauf begründet, bezeichnet der Begriff Redelegation in dieser Arbeit eine spezielle Ausprägung der Degradierung. Das Wort Redelegation beschreibt den Prozess, in dem ein hochautomatisiertes Assistenzsystem des ATCO die zuvor vom Assistenzsystem wahrgenommene Kontrolle über ein oder mehrere Luftfahrzeuge schrittweise oder ereignisgetrieben an den ATCO übergibt. Während die Degradierung allgemein den Verlust oder die Einschränkung systemischer Fähigkeiten adressiert, fokussiert sich die Redelegation in dieser Arbeit auf das Verschieben der Verantwortungs- und Aufgabenverteilung zwischen Mensch und Automation.

Der Begriff *Konflikt* wird im Sinne der ICAO normativ gefasst. Nach ICAO Doc 9426 ist ein Konflikt als „Predicted converging of aircraft in space and time which constitutes a violation of a given set of separation minima.“ [6] definiert. Ein Konflikt liegt damit vor, wenn die Unterschreitung der vorgeschriebenen Staffelungsminima voraussagbar ist. Diese Definition verdeutlicht, dass Konflikte prognostische Situationen sind, in denen aus dem zeitlich-räumlichen Verlauf von Flugbahnen ein zukünftiges Unterschreiten der Mindeststaffelung abgeleitet wird. Für die vorliegende Arbeit lässt sich daraus ableiten, dass Konflikte jene Situationen markieren, in denen Assistenzsysteme und ATCOs eingreifen müssen, um die Verletzung der Mindeststaffelung zu verhindern. Nach dem Klären der zentralen Begriffe wird im folgenden Abschnitt auf die Lotsenarbeitsplätze und aktuelle Flugführungsverfahren eingegangen.

2.2 Der Lotsenarbeitsplatz und Lotsenassistenzsysteme

Da sich diese Arbeit mit Degradierungsverfahren für ein hochautomatisiertes Lotsenassistenzsystem befasst, welches im oberen Luftraum zu Anwendung kommt, wird die folgende Betrachtung des Lotsenarbeitsplatzes, der Lotsenassistenzssysteme sowie der Flugführungsverfahren auf diesen Anwendungsbereich eingeschränkt.

Lotsenarbeitsplatz. Der Arbeitsplatz eines ATCOs für den oberen Luftraum ist in einem Upper Area Control Center (UACC) angesiedelt. Für den deutschen Luftraum sind das in großen Teilen das UACC Karlsruhe und das MUAC in Maastricht. [7] In den Bereichen der Staatsgrenzen kann die Luftraumstruktur darüber hinaus so gestaltet sein, dass UACCs der Nachbarstaaten geringe Teile deutschen Luftraums überwachen. Gründe hierfür können Verkehrsflüssen oder eine vereinfachte Führung der Sektorengrenze in der Grenzregion sein. [8]

Am Arbeitsplatz eines ATCOs im Centers besteht hauptsächlich aus dem Radardisplay [9], für die Anzeige der Luftlage, Sekundärdisplays, für die Anzeige von Flugstreifen, Wetter und weiterführender Information, einem Eingabegerät, für die Interaktion mit den Systemen, sowie eines Sprachkommunikations-Kontrollsystems [10], zur Steuerung der Kommunikationskanäle. Die Kommunikation des ATCO mit den Luftfahrzeugen wird über Sprechfunk und Controller Pilot Data Link Communication (CPDLC) abgewickelt. Sie setzt für jede Technologie eine entsprechende technische Ausrüstung der Flugsicherung als auch des Lfz voraus [11].

Maximale Belastbarkeit beider ATCOs (Executive und Planner), die für einen Kontrollsektor zuständig sind, ist für Sektorkapazität entscheidend. [12] Belastungsbestimmende Faktoren sind laut [12] die Komplexität der Verkehrsstruktur, die technische Ausstattung, die Umgebungsbedingungen und die Sprechfunkfrequenzbelastung. Die Sektoreigenschaften umfassen nach [12] die Dimensionen des Kontrollsektors, die Komplexität der Luftraumstruktur, die Konstellation der Flugstreckenführung sowie die Lage und Anzahl der Flugplätze im Kontrollbereich.

Lotsenassistenzsysteme. Für den oberen Luftraum sind besonders der Short Term Conflict Alert und je nach geographischen Gegegebenheiten die Minimum Safe Altitude Warning (MSAW) [13]. Besonders relevant im Kontext dieser Arbeit ist der Short Term Conflict Alert (STCA). Nach ICAO Doc 4444 [13] werden hiermit Lfz mit Berichtsfunktion der barometrischen Höhe in ihrer aktuellen und vorhergesagten dreidimensionalen Position überwacht. Sollte die dreidimensionale Position zweier Lfz in der Vorhersage eine definierte Mindeststaffelung unterschreiten und in einem definiertem Zeitraum annähern, wird ein akustischer und oder visueller Alarm generiert. Dieser Alarm gilt dem ATCO in dessen Zuständigkeitsbereich das Lfz

operiert. Das Ziel des STCA ist es, den ATCO bei der Vermeidung einer Kollision zweier Lfz zu unterstützten, indem er rechtzeitig über ein potentielles oder stattfindendes Unterschreiten der Mindeststaffelung alamiert.

2.3 Degradierungsverfahren in der Flugsicherung

Für Degradierungsverfahren im Bereich der Flugsicherung lassen sich für die hochautomatisierten Lotsenassistenzsysteme zwei Forschungsprojekte hervorheben. Auf das Forschungsvorhaben des DLR wird in Abschnitt 2.3.1 und das des Eurocontrol Maastricht Upper Area Control Center wird in Abschnitt 2.3.2 tiefer eingegangen. Einen weiteren Eindruck von Degradierungsverfahren in der Flugsicherung gibt Abschnitt 2.3.3 über die Sicherheit degradierter Betriebsarten der Eurocontrol Betriebstechnik. Abschließend wird auf die Anforderungen des ICAO Doc 4444 in Bezug auf einen bodenseitigen Ausfall der Funkausrüstung (Abschnitt 2.3.4) sowie den Short Term Conflict Alert (Abschnitt 2.3.5) eingegangen.

2.3.1 Degradierungsverfahren des digitalen Fluglotsen des DLR

Im Rahmen des Projekts der Kollaboration von Luftfahrt-OperateurInnen und KI-Systemen (LOKI) werden Grundlagen für die Einführung von KI-Systemen zur Flugführung und Kontrolle des Flugverkehrs erforscht. Hier liegt der besondere Fokus auf einer vertrauenswürdigen Zusammenarbeit von Menschen und KI, da die Sicherheit in der Luftfahrt oberste Priorität hat. [14] Im Rahmen des LOKI-Projekts arbeiten sechs Institute des DLR interdisziplinär zusammen und werden dabei von externen Partnern unterstützt. [14] Auf dieser Basis wurde der DIRC (Digital Interactive Reliable Controller) entwickelt, ein digitales, KI-basiertes Automationssystem, das als zentraler Interaktionsknoten zwischen ATCO und verschiedenen Funktionen der Automation fungiert. [15] Ziel des DIRC ist es, AI-basierte Automation in der Flugsicherung zu ermöglichen. Damit sollen Interaktionen mit Assistenz- und Entscheidungstools gebündelt und die Notwendigkeit reduziert werden, dass ATCOs mehrere Einzelsysteme parallel überwachen, abgleichen und manuell bedienen müssen. [15]

Das aktuelle Redelegationsverfahren des DIRC basiert auf einem ersten Demonstrator, der vereinfachte Delegations- und Redelegationsprozesse umsetzt. [3] Wird hier der Prozess einer Übergabe eines Lfz vom D-ATCO an den ATCO betrachtet, gibt es zwei Optionen. Die Erste ist die Redelegation, eine vom D-ATCO initiierte Übergabe eines Luftfahrzeugs zurück an den ATCO. Sie erfolgt, wenn zeitkritisches Handeln erforderlich ist und übermittlet gleichzeitig die Information der Redelegationsursache. Die zweite Option ist die Cancel Delegation, die vom ATCO zur sofortigen Rücknahme eines vom D-ATCO kontrollierten Lfz initiiert. Die Ergebnisse einer Nutzerbefragung im Rahmen einer Funktionsstudie [3] zeigen, dass nach der Redelegation kein zusätzlicher Radiocheck als erforderlich angesehen wird. Die höchste Priorität hat die Redelegation bei Sektor-internen und sektorübergreifenden Konflikten. Weiter ist bei Konflikten, in Fällen einer ausbleibenden Konfliktlösung durch den D-ATCO sowie auch bei Luftnotfällen eine automatische Redelegation ohne gesonderte Anforderung gewünscht. [3]

Die Mensch-Maschine-Schnittstelle HI-DIRC (Human-machine interface for the Digital Interactive Radar Controller) ist dabei als separates Softwaresystem ausgelegt. Es wird am Lotsenarbeitsplatz auf einem zweiten Bildschirm neben dem Radarbildschrim dargestellt und soll den menschlichen ATCO unterstützen. [15] HI-DIRC verfolgt den Zweck, eine aufgabenbezogenes Mensch-Maschine-Zusammenarbeit zu ermöglichen, indem auf dessen Oberfläche die vier

folgenden Funktionen gebündelt werden. Es ermöglicht die Auswahl und Analyse Lfz relevanter Informationen, deren geeignete Präsentation, das gezielte Lenken der Aufmerksamkeit auf dringliche Informationen sowie die Interaktion zwischen menschlichem und digitalem ATCO. [15]

2.3.2 Degradierungsverfahren des digitalen Fluglotsen des Eurocontrol MUAC

Das Maastricht Upper Aera Control Center (MUAC) von Eurocontrol arbeitet ebenfalls an der Version eines hochautomatisierten Lotsenassistenzsystems. Das ATC Real Ground-breaking Operational System (ARGOS) soll potentielle Konflikte erkennen, für dessen Lösung eine Reihe konfliktfreier Handlungsvorschläge generieren und diejenigen kennzeichnen, welche optimal sind. [16] Unter vordefinierten operationellen Bedingungen, wie z.B. im Nachtverkehr, sollen diese Lösungsvorschläge autonom angewendet werden.

Das ARGOS soll laut [16] in komplexen, taktischen Verkehrsszenarien durch eine automatisierte Entscheidungsfindung und Ausführungsunterstützung die Handlungsabläufe beschleunigen sowie die Produktivität zu steigern. Weiter ist in einfachen taktischen Szenarien die vollautomatisierte Kontrolle des Verkehrs vorgesehen. Dies erfordert wiederum die Fähigkeit, solche grundlegenden Verkehrssituationen zu identifizieren und zu isolieren. [16].

Aus den zuvor genannten Anwendungsfällen und Einsatzszenarien ergeben sich für das ARGOS verschiedene Betriebsmodi. Dies wurden durch die Entwickler des MUAC anhand der SERA Automatisierungsgrad Taxonomy (Levels of automation taxonomy) [17] abgeleitet. Hier wurde sich auf drei Stufen beschränkt, die laut [16] wie folgt definiert sind. Stufe drei (L3) ist die Unterstützung bei der Entscheidungsfindung. Hier werden intuitive Übersichten mit Konfliktlösungen und Vorschläge für optimale Flugbahnen an den ATCO kommuniziert. Die Automatisierungsstufe fünf (L5) stellt einen Hybridmodus dar. Sie enthält die Funktionen der Stufe 3 sowie das Abwickeln einfachen CPDLC-Flugverkehrs, nachdem der ATCO der Handlung zugestimmt hat. Der automatisierte Betriebsmodus ist der Stufe Acht (L8) zuzuordnen. Hier soll die Kontrolle der Lfz ohne Aufsicht durch den ATCO erfolgen. Dieser Betriebsmodus ist für Kontrollsektoren vorgesehen, die die Anforderungen eines geringen Verkehrsflusses und einer vollständigen Betriebsbereitschaft der Controller-Pilot Data Link Communication (CPDLC), am Boden sowie an Bord des Lfz, erfüllen. [16]

Laut Eurocontrol gibt es für den Betriebsmodus L8 ein Redelegationsverfahren, welches wie folgt beschrieben wird: „Die ARGOS-Lösungen sind so ausgelegt, dass im Falle eines unvorhergesehenen Ereignisses (das Flugzeug verliert CPDLC, führt eine Freigabe nicht innerhalb von 2 Minuten aus etc.) die Verkehrssituation für einen bestimmten Zeitraum sicher bleibt, während der Fluglotse wieder in den Regelkreis eingebunden wird.“ [16]

2.3.3 Sicherheit degradierter Betriebsarten der Eurocontrol Betriebstechnik

Durch die Eurocontrol Betriebstechnik wird der Begriff „Degradierter Betriebsmodus“ als Betriebszustand definiert, der durch Probleme im zugrunde liegenden System entsteht. Er wird erwartet, aber nicht als normal betrachtet. Das Betriebspersonal verfügt in solchen Situationen über festgelegte Verfahren, um mit den aufgetretenen Problemen umzugehen. Hierbei werden die mit Ausfällen verbundenen Risiken als nicht signifikant angesehen. Als Beispiel für einen degradieren Modus in der Betriebstechnik wird ein reduzierter Personalstand angeführt. [18].

Für den eingetretenen Fall deiner Degradierung in der Betriebstechnik wird laut [18] empfohlen, die folgende Checkliste vor seinem Handeln abzuarbeiten. Sie soll bei der Entscheidungsfindung helfen, ob es sicher ist, in seinem Handeln fortzufahren. Dabei steht die Mnemonik PARIS für die fünf zu überprüfenden Schritte. Das *P* („Paths leading to failure understood“) steht dafür, ob die Fehlerpfade, die zum Versagen geführt haben, verstanden wurden. Das *A* („Assess risks before action taken“) berücksichtigt die Risikobeurteilung vor dem Ergreifen der jeweiligen Maßnahme, gefolgt von dem *R* für das Verstehen der Wiederherstellungspfade („Recovery paths understood“). Das *I* („Informed all points of communication“)für das Informieren aller relevanten Kommunikationsstellen und *S* („Secondary systems available and unaffected“) für die Verfügbarkeit und Funktionsfähigkeit der Sekundärsysteme.

Für die Unternehmenskultur, aber auch den Entwurf und das Verständnis der Systeme regt [18] weiter an, immer zu berücksichtigen, ob beispielsweise zwischen redundanten und reinen Fallback-Systemen ausreichend klar unterschieden werden kann. Ob für die ATCOs eindeutig erkennbar ist, wenn ein System ohne Redundanz oder im Fallback-Modus betrieben wird. Zuletzt, in welcher Weise beim Beheben eines degradierten Systemmodus neue Gefahren entstehen und wie diese identifiziert und behandelt werden können. Bezogen auf den Systementwurf sollte sich laut der Quelle weiter damit beschäftigt werden, welches die Single Points of Failure sind in dem System sind, ob die Back-up-Kommunikationssysteme funktionieren und die Fall-Back-Systeme sicherheitskritische Systeme oder nur einfache Back-up-Systeme sind.

2.3.4 Notfallverfahren bei Ausfall der bodengebundenen Funkausrüstung

Als Beispiel für eine Degradierung nach ICAO Doc 4444 [13], Abschnitt 15.6.1, sind bei vollständigem Ausfall der bodengebundenen Funkausrüstung der Flugsicherung, unverzüglich Notfallmaßnahmen zu ergreifen. Der ATCO hat in Bereichen, in denen die Lfz eine Abhörpflicht der Funkfrequenz 121.5 MHz haben, diese Notfrequenz abzuhören und über die Frequenz zu versuchen, die Sprechfunkverbindung wieder herzustellen. Zugleich hat er unverzüglich alle angrenzenden Kontrollpositionen bzw. Kontrollsektoren über den Ausfall zu informieren. Anschließend ist deren Unterstützung hinsichtlich der Staffelung von Luftfahrzeugen und derer die möglicherweise versuchen Verbindung zu jenen angrenzenden Positionen oder Kontrollsektoren aufzubauen. Weiter sind die angrenzenden Positionen oder Kontrollsektoren anzuweisen, alle kontrollierten Flüge aus dem Verantwortungsbereich des vom Ausfall betroffenen Kontrollsektors zu führen. Alle weiteren Lfz außerhalb des betroffenen Kontrollsektors sind zurückzuhalten oder umzuleiten, bis die Wiederaufnahme des regulären Dienstes möglich ist. Neben dem Verfahren eines Systemausfalls soll im nächsten Abschnitt das Verfahren zum Lösen des Short Term Conflict Alerts betrachtet werden.

2.3.5 Vorgehen bei Short Term Conflict Alert

Nach Abschnitt 15.7.2.1 des ICAO Doc 4444 [13], ist das Vorgehen bei Aufkommen eines Short Term Conflict Alerts in den lokalen Verfahrensanweisungen zu beschreiben. Die Verfahrensanweisungen sollen die Arten an Flügen spezifizieren, für die Warnmeldungen generiert werden. Weiter sollen die Sektoren oder Lufträume genannt werden, in denen die STCA-Funktion implementiert ist. Die Art der Darstellung von STCA-Alarmen an der ATCO-Arbeitsposition, die grundlegenden Parameter für die Alarmierung sowie die Vorwarnzeit sollen ebenfalls definiert werden. Darüber hinaus müssen jene Lufträume, in denen der STCA selektiv deaktiviert wer-

den kann und die Bedingungen, unter welchen eine solche Deaktivierung zulässig ist, definiert werden. Weitere Spezifikationen betreffen die Voraussetzungen unter denen spezifische Alarme für einzelne Flüge unterdrückt werden dürfen sowie die anzuwendenden Verfahren für die Lufträume oder Flüge, bei denen STCA oder einzelne Alarme deaktiviert wurden. Abschnitt 15.7.2.2 definiert die Handlungen, die im Fall eines aktiven STCA auszuführen sind. Hier muss der ATCO ohne Verzögerung die Situation bewerten und, wenn nötig, eingreifend handeln. Die Handlungsschritte sollen verhindern, dass die Mindeststaffelung unterschritten wird oder sie zumindest wieder herstellen.

Nachdem die Degradierungsverfahren der bodengebundenen Systeme der Flugsicherung betrachtet wurden, folgen die Degradierungsverfahren der bordseitigen Systeme im Cockpit eines Lfz.

2.4 Degradierungsverfahren im Cockpit

Airbus Flugzeuge verfügen über ein Fly-By-Wire Flugsteuerungssystem, welches den Flugzeugen erlaubt, das Eingangssignal der Piloten durch eine Rechnerlogik zu überprüfen, bevor das Steuersignal an den Aktuator der Steuerflächen gesendet wird. So ermöglicht das System einen Betriebsrahmen zu setzen, die Flight Control Laws, und Schutzfunktionen zu bieten. (Vgl. [19]) Dieses computergestützte System der Flugsteuerung folgt fünf Stufen der Degradierung, auf die im Folgenden eingegangen werden soll.

Airbus Flight Control Laws nach [19]. Die Airbus Flight Control Laws reichen vom *Normal Law* bis zum mechanischem Backup.

Normal Law

Das Normal Law ist der normale Betriebsmodus ohne betriebliche Einschränkungen. Es bietet drei Betriebsmodi der Flugsteuerung, den Ground-, Flight- und Flare Mode. Dieser Systemzustand bietet weiter die höchste Anzahl an Schutzfunktionen. Sie werden folgend aufgelistet.

- Load Factor Protection (Limitiert die Kontrolleingaben)
- Pitch Attitude Protection (Limitiert die Längsneigung)
- High Angle of Attack Protection (Limitiert den Anstellwinkel nahe des Strömungsabriss)
- High Speed Protection (Limitiert die Geschwindigkeit)
- Bank Angle Protection (Limitiert den Rollwinkel)
- Low Energy Protection (Warnt vor zu geringem Energiezustand im Flug)

Alternate Law

Das Alternate Law hat zwei Stufen, die sich ALT1 und ALT2 nennen und je nach Fehlerbild aktivieren.

- ALT1: wird ausgelöst durch Fehler am Höhenleitwerk, Einzelausfall eines Elevators, Ausfall eines Yaw-Dampers, Ausfall von Slat/Flap-Positionssensoren oder eines einzelnen Air-Data-Referenzsystems. In Abhängigkeit vom Fehler steht Autopilot nicht mehr zur Verfügung.

  - Querachse wie im Normal Law, Nickachse ist im Alternate Law.
  - Low Energy Protection entfällt, stattdessen Low Speed Stability. (Kein automatischer Schutz vor Strömungsabriss)
  - Bei niedriger Geschwindigkeit: automatische Nase-runter-Anforderung (auf Basis der Indicated Air Speed, statt des Anstellwinkels).
  - Bei weiter sinkender Geschwindigkeit Übergang von ALT1 zu Direct Law.
  - Zusätzliches akustisches „STALL“-Warnsignal.
  - Keine Alpha-Floor-Protection; Strömungsabriss muss konventionell vom Piloten ausgesteuert werden.
  - Load Factor- und Bankangle Protection bleiben erhalten.
  - High-Speed- und High-AOA-Schutz arbeiten in reduzierter Alternate-Law-Form.
  - Pitch-Attitude-Protection geht verloren.
- ALT2: wird ausgelöst bei gleichzeitigem Erlöschen beider Triebwerke, Fehlern in zwei Inertial- oder zwei Air-Data-Referenz Units, Ausfällen aller Spoiler, bestimmten Querruder-Fehlern oder Fehlern im Pedal-Messumformer.
  - Normal-Law Lateral-Modus geht verloren, ersetzt mit Querachse: Roll - Direct Law und Gierachse: Yaw Alternate Law.
  - Nickachse: Pitch in Alternate Law.
  - Load Factor Protection bleibt erhalten.
  - Zusätzlich zu ALT1 sind auch Bank Angle-Protection und Low Energy Protection inaktiv.
  - Je nach Fehlerfall auch High-AOA- und High-Speed-Protection verloren.
  - Wie bei ALT1 kann der Autopilot je nach Fehlerfall automatisch abschalten.

Direct Law

Übergang in Direct Law bei: Ausfall aller drei Inertialreferenzsysteme, Ausfall aller drei Primary Flight Computer, Fehlern in beiden Höhenrudern oder beidseitigem Triebwerks - Flame-out zusammen mit Ausfall von PRIM 1 (Primary Flight Control Computer).

- Querachse wie in ALT2 → Roll Direct Law, Yaw Alternate Law.
- Nickachse: Pitch ebenfalls in Direct Law.
- Automatische Trimmung ist deaktiviert; Stabilizer-Trim muss manuell vom Piloten bedient werden.
- Steuerflächenausschlag folgt direkt der Sidestick-Bewegung (nahezu lineare Umsetzung).
- Sämtliche Schutzfunktionen (Load Factor, Bank Angle, High AOA, High Speed, Low Energy etc.) sind verloren.
- Autopilot ist in Direct Law nicht verfügbar.

Mechanisches Backup

Funktion des Modus: Der Erhalt eines ebenen, Geradeaus-Flug ermöglichen, während die Flugsteuerungscomputer nach einem temporären Stromausfall zurückgesetzt werden.

- Mechanical Back Up ist die letzte Notbetriebsart.
- Nickachse: Steuerung nur noch über das mechanische Höhenruder-Trimmsystem.
- Quer-/Gierachse: Steuerung der Flugrichtung ausschließlich über die Seitenruderpedale, die das Seitenruder mechanisch ansteuern.

Je nach aufgetretenem Fehler gibt das Electronic Centralized Aircraft Monitor (ECAM)-System Warnungen an die Piloten. Es wird unterschieden zwischen einer Warn- und Hinweismeldung sowie Memos. Darüber hinaus zweigt es weitere Parameter wie Triebwerksanzeigen, Kraftstoffmenge und Statusmeldungen der Systeme an [20].

3 Konzeptionierung

3.1 Anforderungen an Degradierungsverfahren

Die Anforderungsanalyse erfolgt vor dem Hintergrund des Einsatzgebiets des D-ATCO im oberen Luftraum und somit Upper Area Control Center. Ziel ist die Definition von Verfahren zur geordneten und sicheren Redelegation D-ATCO-kontrollierter Lfz an den ATCO. Dabei steht insbesondere der Übergabeprozess vom D-ATCO zum ATCO im Fokus.

Hierfür ist die Betrachtung der am Prozess beteiligten Personengruppen notwendig, also vorrangig der ATCOs in der Rolle des Executive. Auf Basis dieser Analyse sollen Anforderungen an Funktionalität, Interaktionsgestaltung und Arbeitsablaufunterstützung des Redelegationsverfahrens abgeleitet werden, um einen sicheren und nachvollziehbaren Übergabeprozess der Kontrolle zu entwickeln. Dazu sollten folgend in Abschnitt 3.1.1 die 0perationellen Anforderungen eines Assistenzsystems der Flugsicherung erarbeitet werden, die sich hieraus ergebenden Grenzen in Abschnitt 3.1.2 erläutert und mögliche Degradierungsstufen in Abschnitt 3.1.3 abgeleitet werden.

3.1.1 Operationelle Anforderungen an Assistenzsysteme der Flugsicherung

Folgend werden die operationellen Anforderungen eines Assistenzsystems in der Flugsicherung erarbeitet. Hier wird auf die vom ATCO auszuführenden Aufgaben und die Anforderungen an das System und Mensch-Maschine-Schnittstelle (Human-Machine Interface, HMI) eingegangen. Zur systematischen Erfassung dieser Anforderungen werden mittels einer Literaturrecherche bestehende Erkenntnisse zu Aufgabenprofilen des ATCO und der HMI-Gestaltung in der Flugsicherung zusammengetragen. Aufbauend auf der aggregierten Anforderungsliste erfolgt eine Priorisierung mittels der MoSCoW-Methode [21]. Sie unterscheidet zwischen zwingend notwendigen, wünschenswerten, optionalen und zurückgestellten Anforderungen. Diese priorisierte Anforderungsliste dient im weiteren Verlauf als Grundlage für die Entwicklung der ersten Ausgangs Redelegations-varianten des Assistenzsystems. Darüber hinaus ermöglicht sie eine zielgerichtete Weiterentwicklung im Hinblick auf die Ausgangsvarianten unter Berücksichtigung der gewonnenen Erkenntnisse des durchgeführten Workshops.

Aufgaben eines ATCO werden durch das ICAO ATC Competency Framework aus [22] wie folgt definiert. Es nennt Kernkompetenzen, die für einen sicheren und effizienten Flugsicherungsbetrieb nötig sind.

Das *Situationsbewusstsein* fordert vom Fluglotsen, die aktuelle Betriebssituation zu erfassen und zukünftige Ereignisse zu antizipieren. Damit verbunden ist die Fähigkeit, relevante Informationen aus dem Radarbild, den Flugstreifen und der Kommunikation zu kombinieren und ein mentales Modell der Luftverkehrslage aufzubauen. Das *Verkehrs- und Kapazitätsmanagement* fordert vom ATCO den Verkehr in seinem Sektor sichere, geordnet und effizient abzuarbeiten. Dabei sollen zusätzlich essenzielle Informationen über die Umgebung und potentiell gefährliche Situationen bereitgestellt werden. Zu einer sicheren Verkehrsführung gehört vor allem das Herstellen einer ausreichenden *Staffelung und die Konfliktlösung* mit anderen Verkehrsteilnehmern oder Objekten. Der Bereich *Kommunikation* umfasst alle operativen Situationen, es ist wichtig wirksam zu kommunizieren und dabei die Koordination zwischen den verschiedenen operativen Positionen sowie den weiteren beteiligen Personen (z. B. Piloten, benachbarte Sek-

toren, bodengestützte Dienste) sicher zu stellen.

Im Bereich des *Managements von außergewöhnlichen Situationen* sollen Notfälle und ungewöhnliche Situationen entdeckt werden und angemessen auf sie reagiert werden. Dies umfasst auch degradierte Modi im System der Flugverkehrskontrolle zu bewältigen. Dementsprechend sind ausgeprägte Kompetenzen in der *Problemlösung und Entscheidungsfindung* gefordert, um systematisch Gefahren und die zugehörigen Risiken zu identifizieren sowie geeigneter Lösungsansätze zu implementieren. Darüber hinaus werden im *Selbstmanagement und der kontinuierlichen Weiterentwicklung* persönliche Attribute betont, die eine proaktive Haltung gegenüber eigenverantwortlichem Lernen und beruflicher Weiterentwicklung voraussetzen. Die Kompetenz des *Workload Managements* verlangt verfügbare Ressourcen optimal zu nutzen, um Aufgaben priorisiert, effizient und zeitgerecht zu bewältigen. Schließlich wird durch *Teamwork* gefordert, dass sich Fluglotsen als Mitglieder eines Teams verstehen, um zur kollektiven Sicherheit und Effizienz des Luftverkehrssystems beizutragen [22].

Probleme bei höherem Automatisierungsgrad der Handlungen des ATCO bringen weitere Herausforderungen mit sich, die im Entwurf neuer Assistenzsysteme berücksichtigt werden sollten. So analysiert [23] den Einfluss einer erhöhten Automatisierung auf Cockpit-Besatzungen von Flugzeugen und betrachtet den Einfluss auf das Handeln, den Workload, das Situationsbewusstsein und die Kompetenzen der menschlichen Anwender. Auch wenn diese Analyse in der Cockpitumgebung stattgefunden hat, wird davon ausgegangen, dass sich die Ergebnisse auf ATCOs übertragen lassen. Zusammenfassend lässt sich folglich aus [23] schließen, dass sich durch eine erhöhte Automatisierung die Hauptfunktionen der Cockpit-Crew vom aktiven Steuern zum Überwachen wandelten. In unerwarteten Situationen oder Notfällen steigt der Workload der Crew und das allgemeine Situationsbewusstsein hat sich durch die Automatisierung reduziert. Weiter hat sie zu verschlechterten "Hands-on-skills"geführt, die zu einem schlechteren Wiedererlangen der Kontrolle des Flugzeugs führen können, sollte das Automationssystem ausfallen. So verlangt der Einsatz einer Automatisierung gezwungenermaßen ein anderes Training der Crew. Es soll der gesteigerten Komplexität durch die Automatisierung begegnen und das Auftreten Missverständnissen der Crew im Systemverhalten möglichst vermeiden. Dies kann bei Nichtbeachtung zu automatisierungsbedingten Zwischen- und Unfällen führen. Daher ist im Training von Systemfehlern und unerwarteten Situationen für Systeme mit erhöhtem Automatisierungsgrad darauf zu achten, dass mehr Erfahrung und Wissen für ein erfolgreiches Wiedererlangen des sicheren Systemzustands nötig ist. Hier ist darüber hinaus darauf einzugehen, dass auch immer der kulturelle Hintergrund des Anwenders im Umgang mit der Automation berücksichtigt werden muss. [23]

Allgemeine Prinzipien für die Nutzung der Automation und die Rolle des Menschen. Um den zuvor besprochenen Problemen größtenteils zu begegnen, hat Billings et al. in [24] allgemeine Prinzipien für die Nutzung der Automation und der Rolle des Menschen erarbeitet. Sie definieren klar die Rollenverteilung und Verantwortlichkeiten zwischen Mensch und Maschine. Das erste grundlegende Prinzip besagt, dass der Mensch immer die Verantwortung und übergeordnete Kontrolle haben muss. Um diese effektiv ausführen zu können, muss der Mensch beteiligt sein. Damit er beteiligt ist, muss der Mensch wiederum informiert sein. Weiter muss der Mensch die Möglichkeit haben, das automatisierte System überwachen zu können. Dafür muss das System vorhersehbar arbeiten. Andererseits muss das automatisierte System wiederum den Menschen überwachen können. Also müssen folglich alle Elemente des Systems Wissen über die Intentionen des Gegenübers haben. Abschließend muss es nach Billings einen guten Grund

für die Automatisierung der Funktion geben und diese so entworfen werden, dass sie einfach zu erlernen und bedienen ist.

Human-Machine Teaming:

Automation als Teammitglied. Das Konzept von Automationssystemen als integrierte Teammitglieder ist ein Ansatz, der die Mensch-Maschine-Interaktion neu definiert. Ergebnisse aus [25] zeigen, dass die Arbeitsbelastung eines Piloten reduziert wird, wenn er mit Automationssystemen auf ähnliche Weise interagiert wie mit einem menschlichen Kollegen. Gleichzeitig muss die Automation laut [26] die folgenden zehn Anforderungen erfüllen, um ein effektives Mitglied eines Mensch-Maschine-Teams zu werden. Die erste Erkenntnis ist, dass die Automation das Teamverhalten modellieren soll. Das heißt, das System sollte die Dynamiken und Kommunikationsmuster der Teamarbeit verstehen und nachahmen können. Darüber hinaus muss das System die Zusammenarbeit ermöglichen und die Aufmerksamkeit steuern können, indem es Informationen gezielt priorisiert und vermittelt. Zentral für Teamfähigkeit ist auch das kontinuierliche Informieren des menschlichen Teammitglieds über die aktuellen Aktivitäten und Betriebsmodi des Systems. Das System sollte das andere Teammitglied aktiv vor einer Änderung des Systemmodus warnen, um Überraschungen und Mode-Confusion zu vermeiden. Ebenso sollte das System Diskrepanzen oder ungewöhnliche Ereignisse hervorheben und damit die Aufmerksamkeit auf potentielle Probleme lenken. Ein weiterer Aspekt der Teamfähigkeit ist eine ausreichende Intelligenz des Systems, um Probleme zu erkennen oder sogar vorherzusagen, bevor sie kritisch werden. Dies ermöglicht proaktive Kommunikation mit dem Menschen und trägt zur Vermeidung von Problemen bei. Das System sollte zudem die Menschen im Voraus informieren, wenn es nicht länger in der Lage ist, seine Aufgabe zu erfüllen oder die Kontrolle abgeben muss. Zuletzt sollte das System Probleme idealerweise verbal mit dem Team kommunizieren. Dies schafft ein gemeinsames Situationsbewusstsein, bevor Korrekturmaßnahmen ergriffen werden müssen und führt die menschlichen Teammitglieder aus einem passiven Überwachungsmodus in einen aktiven Entscheidungs- und Handlungsmodus. [25]

Die Leistung verschiedener Teams innerhalb einer Schicht, am selben Sektor und im Cockpit des vom ATCO kontrollierten Lfz hängt laut [27] von folgenden Faktoren ab. Zuerst ist das Verständnis der Rollen innerhalb von Teams wichtig. Jedes Mitglied, ob Fluglotse, Supervisor oder Pilot, besitzt spezifische Verantwortlichkeiten und Funktionen, deren explizite Definition und gegenseitige Anerkennung wichtig sind. Eine gute Kommunikation unter Teammitgliedern bildet das Fundament für guten Informationsaustausch, gute Abstimmung und eine schnelle Problemlösung. Parallel zur Kommunikation muss jedes Teammitglied sowohl die eigene Situation als auch die Situation anderer Teammitglieder kontinuierlich im Blick behalten. Dieses gegenseitige Situationsbewusstsein ermöglicht es, potentielle Konflikte frühzeitig zu erkennen und Maßnahmen proaktiv zu koordinieren. Ein weiterer Faktor ist das Verständnis der Entscheidungsfindungsstrategien und den druch die verschiedenen Rollen gegebenen, individuellen Unterschieden. Verschiedene Team-Mitglieder können unterschiedliche Ansätze zur Problemlösung und Entscheidungsfindung verfolgen, da sie ggf. unterschiedliche Ziele verfolgen, die koordiniert und zu einer gemeinsamen Lösung gebracht werden müssen. Daher ist die Wertschätzung verschiedener Kontrollstile, sowohl die der Führungspersonen als auch der unterstützenden Personen, wichtig für funktionsfähige Teams. Abschließend ist das Erkennen von Stressoren, der Eigenen als auch diejenigen der anderen Teammitglieder, wichtig für eine gute Zusammenarbeit. Stress kann die Entscheidungsqualität und Teamfähigkeit beeinträchtigen; das Bewusstsein für Stressoren ermöglicht es Teams, unterstützende Maßnahmen einzuleiten

und kritische Phasen besser zu bewältigen.

Ergebnisse aus dem DLR HI-DIRC-Entwurf. Mit dem bereits durch das DLR entwickelten D-ATCO System ergaben sich erste Ergebnisse, die hier in der Mensch-Maschine Zusammenarbeit berücksichtigt werden sollen. Nach [15] soll das Human-Autonomy Teaming Interface (HI-DIRC) vor allem die folgenden Aufgaben erfüllen:

- Autonomie- und Automationswahl Oberfläche des D-ATCO
- Entscheidungen des D-ATCO erklären
- Das Vorgehen des D-ATCO kommunizieren
- Rückmeldung an den ATCO geben

Negative Effekte der Automation in der Flugsicherung Die Automation in Flugsicherungssystemen bringt neben den Effizienzgewinnen auch Risiken, mit denen sich [27] tiefer auseinandergesetzt hat. Diese negativen Effekte erstrecken sich über technische, kognitive sowie organisatorische Dimensionen und werden folgend näher betrachtet. Der erste Effekt einer neuen Automation ist die Entstehung neuer Fehlerformen, die in manuellen Operationen nicht oder in geringerem Maße auftreten. Mode Confusion, der Zustand, in dem der ATCO nicht korrekt erfasst, in welchem Betriebsmodus sich das automatisierte System befindet, wäre ein Beispiel dafür. Solche Verwechslungen können zu fehlerhaften Entscheidungen führen, da der Nutzer das Systemverhalten falsch einschätzt. Auf kognitiver Ebene kann die Automation zu folgenden Effekten führen. Beispiele hierfür sind die Verzerrung von Entscheidungen (sog. Bias), der Verlust des Situationsbewusstseins oder einer erhöhten mentalen Arbeitsbelastung. Die Arbeitsbelastung erhöht sich insbesondere, wenn der ATCO kurzfristig die Kontrolle vieler vom automatisierten System kontrollierter Lfz übernehmen und manuell eingreifen muss. Die erhöhten Überwachungsanforderungen durch das kontinuierliche Monitoring des automatisieren Systems könnte kognitiv auch belastender sein als die direkte manuelle Kontrolle. Ein weiterer Aspekt ist das Vertrauensverhältnis zwischen Mensch und Automation. Sowohl Misstrauen als auch Übervertrauen stellen Risiken dar. Übervertrauen kann zu unzureichender Überwachung und Fehlerübersehen führen, während Misstrauen zu Ineffizienz und unnötigen manuellen Eingriffen führt. Ein langfristiger negativer Effekt könnte der Verlust von Fähigkeiten bei ATCOs sein, die längere Zeit mit dem automatisierte System arbeiten. Dies wird besonders problematisch, wenn die Automation ausfällt und der ATCO schnell zur konventionellen Kontrolle vieler Lfz übergehen muss. Zuletzt kann die Automation zum Verlust der Team-Zusammenarbeit führen, wenn die zuarbeitenden automatisierten Systeme die Kommunikation und Koordination zwischen ATCOs, Supervisors und benachbarten Positionen reduzieren

Mensch-Maschine-Schnittstelle (HMI)- Design:

Richtlinien für die Benutzerfreundlichkeit von Mensch-Maschine-Schnittstellen
Karat et al. formulieren in [28] grundlegende Gestaltungsprinzipien für das HMI. Nach ihnen ist die Verwendung eines einfachen und natürlichen Dialogs zwischen Nutzer und System über intuitive visuelle Layouts wichtig. Das System sollte dabei die SSprache des Benutzersßprechen, das heißt, Terminologie, Begriffe und Konzepte verwenden, die dem Nutzer aus seinem operativen Kontext vertraut sind. Konsistenz in der Gestaltung und Funktionsweise ist weiterführend unerlässlich. Wiederkehrende Aufgaben, Symbole und Interaktionsmuster sollten folglich einheitlich umgesetzt werden. Das System muss Rückmeldung über den Zustand und die Aus-

wirkungen von Nutzeraktionen bereitstellen, gleichzeitig sollten klar gekennzeichnete Felder zum Schließen eines Fensters, unterbrechen oder deaktivieren einer Funktion vorhanden sein. Die Bereitstellung von Verknüpfungen und Tastenkombinationen ermöglichen schnelleres Arbeiten und umfassende Hilfsfunktionen unterstützen den Anwender ohne großen Aufwand und systemintern in der Nutzung. Abschließend wird empfohlen, dem Nutzer Möglichkeiten zur Anpassung und Konfiguration der Benutzeroberfläche zu bieten. Dies ermöglicht, unterschiedliche Arbeitsweisen und Vorlieben zu berücksichtigen. Ergänzend zu den von [28] genannten Punkten empfiehlt [15], dass die Darstellung der Informationen selbsterklärend sein sollte und der Mensch nur mit der gegebenen Information die aktuelle Situation lösen können muss. Darüber hinaus verweist [29] darauf, dass die Nutzung eines Interface ähnlich zu den aktuellen Flugsicherungssystemen denkbar ist.

ATC Sicherheitsalarm. Sicherheitswarnungen spielen in der Flugsicherung eine kritische Rolle, weil sie die ATCOs auf potentielle Konflikte von zwei Lfz aufmerksam machen und rechtzeitig zu einer Intervention führen sollen. Um sicherzustellen, dass sie so effektiv wie möglich sind, wurden in [30] Anforderungen an die Gestaltung und Funktionsweise von Warnsystemen in der Flugsicherung formuliert. Wirksame Sicherheitswarnungen müssen zunächst potentielle Gefahren genau erkennen und zuverlässig detektieren. Gleichzeitig ist wichtig, dass Warnungen nicht fälschlicherweise aktiviert werden, wenn keine Gefahr vorliegt. Diese Anforderung adressiert die Desensibilisierung des ATCO bei häufig auftretenden Fehlalarmen. Warnungen sollten neue, dem ATCO bislang unbekannte Informationen bereitstellen und damit einen Mehrwert zum bestehenden Situationsbewusstsein liefern. Sie müssen sensorische wahrnehmbar sein und sollte aus dem Umfeld herausstechen, um die Aufmerksamkeit des Fluglotsen zu erregen. Gleichzeitig müssen verschiedene Warntypen visuell und akustisch voneinander unterscheidbar sein, um eine schnelle und korrekte Interpretation zu ermöglichen. Warnungen sollten räumlich leicht zu lokalisieren sein, idealerweise in unmittelbarer Nähe des betroffenen Elements auf dem Radarschirm oder in verwandten Displays, und müssen eine gute Lesbarkeit aufweisen. Ein wesentlicher Aspekt einer Warnung ist die Kommunikation des Dringlichkeitsgrades. Die Gestaltung sollte dem ATCO sofort vermitteln, wie zeitkritisch eine Situation ist. Zudem sollte die Warnung angemessene Handlungsoptionen kommunizieren. Abschließend fordert [30], dass Warnungen zwar die Aufmerksamkeit des ATCO auf sich ziehen, gleichzeitig aber nicht so störend wirken, dass sie den weiteren Betrieb unterbrechen.

Ergebnisse aus dem DLR DIRC und HI-DIRC Entwurf

Die Studie zum ersten Entwurf des HI-DIRC D-ATCO Interface des DLR in [15] hat folgende Empfehlungen zur Verbesserung des Entwurfs des HI-DIRC Interface ergeben. Der Alarm für einen Konflikt wird laut den Teilnehmenden zu dramatisch dargestellt, bedarf eines höheren Detaillierungsgrads und sollte weniger alarmierend am Radarlabel dargestellt werden. Weiter äußerten die Teilnehmenden den Wunsch nach mehr Information über zukünftige Handlungen des D-ATCO. Dies kann bspw. durch eine Darstellung in der Form eines Countdowns und einer Anweisung geschehen, die die nächste Handlung des D-ATCO beschreibt. Darüber hinaus wurde sich eine übersichtlichere Gestaltung der Symbole wichtiger Handlungen und mehr Anpassungsoptionen in der Darstellung der Spalten des Interface gewünscht.

Aus einer ergänzenden Studie des DLR zum DIRC [3] lassen sich weitere Empfehlungen im Hinblick auf die Gestaltung der Benutzerfreundlichkeit und Interaktion ableiten. Laut der Studie ist die Minimierung von Interaktionsschritten ein wichtiger Entwurfsparameter. Hier werden bereits zwei Klicks für einen (Re-)Delegationsprozess als übermäßig empfunden und un-

terstreichen die Notwendigkeit, kritische Operationen mit einer minimalen Anzahl an Klicks durchführbar zu machen. Parallel dazu wird gefordert, dass die Informationen am Radarlabel kontinuierlich dargestellt werden müssen, um dem ATCO das Situationsbewusstsein zu bewahren. Routinetätigkeiten sollen keine komplexen Interaktionen erfordern, stattdessen wird eine intuitive, aufgabengerechte Interaktionsgestaltung empfohlen. Das Übermitteln des Delegationsstatusses soll vorzugsweise durch Symbole und Modifikationen des Radarlabels geschehen, wobei eine informationsüberladene Darstellung vermieden werden muss. Sie kann zur Überlastung des ATCO [31] und somit zum Verlust des Situationsbewusstseins führen [**?**]. Interaktionen über das Radarelabel werden hier gegenüber separaten Menüoptionen bevorzugt, da sie eine direktere und schnelle Kontrollinteraktion bieten. Weiter soll das System den ATCO eindeutig darüber informieren, wann und weshalb eine Redelegation erfolgt. Dies sollte am besten über das Radarlabel geschehen. Besonders betont wird hier, dass die Redelegation niemals ohne Begründung auftreten darf. Die erfolgreiche Redelegation sollte durch eine Änderung des Kopfsymbols gekennzeichnet werden und eine Änderung in der Darstellung der Informationen im Radarlabel zur Folge haben. Hier wurden eine Variation von Farbe, Schriftart, Größe oder ergänzende, zusätzliche Symbole vorgeschlagen. Zur Unterstützung des ATCO sollten kleine Nutzerhinweise und Hover-Over-Erklärungen als Informationsmittel eingesetzt werden. Im Sinne einer sicherheitsgerichteten Systemgestaltung haben die Teilnehmenden der Studie weiter angeregt, im Entwurf eines Redelegrationskonzepts eindeutig zu beschreiben, in welchen Betriebssituationen eine Redelegation unvermeidbar ist. Darüber hinaus sollte berücksichtigt werden, dass manuelle Eingriffe durch den ATCO in Grenzfällen und atypischen Szenarien bevorzugt werden. Dem ATCO sollte es generell einfach fallen, die Automation leicht zu deaktivieren oder zu überschreiben.

Priorisierung der Anforderungen mittels MoSCoW-Methode

Die MoSCoW-Methode ist ein Priorisierungsverfahren zur systematischen Klassifizierung von Anforderungen in Entwicklungsprojekten [21]. Das Akronym MoSCoW steht für vier Prioritätskategorien, die es ermöglichen, Anforderungen nach ihrer Wichtigkeit und Dringlichkeit zu strukturieren und damit die Ressourcenallokation sowie Projektplanung zu leiten.

- Die Kategorie *Must Have* umfasst Anforderungen, die unbedingt erforderlich sind. Diese Anforderungen sind kritisch für die Sicherheit und Funktionsfähigkeit des Systems und dürfen nicht vernachlässigt werden.
- Die Kategorie *Should Have* umfasst Anforderungen die umgesetzt werden sollten, sofern alle Must-Have-Anforderungen bereits erfüllt sind und keine Konflikte mit diesen entstehen. Should-Have-Anforderungen erhöhen die Qualität, Effizienz oder Benutzerfreundlichkeit des Systems wesentlich, sind aber nicht unmittelbar sicherheitskritisch.
- Die Kategorie *Could Have* bezieht sich auf Anforderungen, die umgesetzt werden können, wenn die Erfüllung von höherwertigen Anforderungen (Must und Should) nicht beeinträchtigt wird. Could-Have-Anforderungen sind oft Optimierungen oder zusätzliche Funktionen von geringerem Wert.
- Die Kategorie *Won't Have* kennzeichnet Anforderungen, die in der aktuellen Projektphase bewusst nicht umgesetzt werden. Dies bedeutet nicht, dass diese Anforderungen irrelevant oder unerwünscht sind; vielmehr werden sie als zukünftige Erweiterungen oder in nachfolgenden Versionen berücksichtigt.

Die MoSCoW-Methode bietet so eine transparente und nachvollziehbare Grundlage für die Priorisierung von Anforderungen, indem sie sich auf die kritischsten konzentriert. Für die Anforderungen eines Redelegationsprozesses des D-ATCO ergibt sich zusammenfassend und unter Berücksichtigung der zuvor erörterten Aspekte, die in Tabelle 3.1 dargestellte Zuordnung.

Im begrenzten Rahmen dieser Arbeit wird sich im Folgenden auf die operativen Anforderungen der Kategorien *Must* und *Should* beschränkt.

3.1.2 Operationelle Grenzen der Assistenzsysteme

Das Assistenzsystem unterliegt verschiedenen operationellen und technischen Restriktionen, die seinen Einsatzbereich definieren und Szenarien abgrenzen, in denen das System angewendet werden kann. Hieraus ergeben sich Bereiche, in denen das System nicht mehr genutzt werden kann und eine Redelegation an den ATCO notwendig wird oder das System von Beginn an nicht zum Einsatz kommen kann. In dieser Arbeit wird eine grundlegende räumliche Grenze in Form der Sektorgrenze angenommen. Sobald ein Lfz in den Zuständigkeitsbereich eines benachbarten Sektors übergeben wird, endet die Verantwortlichkeit des Assistenzsystems für dieses Lfz. Zudem wird angenommen, dass das System nicht für den Einsatz in militärischen Übungsgebieten konzipiert ist, da die dortige hohe Dynamik der Flugbewegungen und die Möglichkeiten des Systems übersteigen würden.

Eine wichtige technische Voraussetzung für die Funktion des Assistenzsystems ist die Verfügbarkeit der Controller Pilot Data Link Communication (CPDLC). Das Assistenzsystem ist auf die datengestützte Kommunikation angewiesen, um Freigaben und Anweisungen an die Piloten zu übermitteln. Ohne eine Funktionierende CPDLC kann das System seine Kernaufgabe nicht erfüllen. Derzeit ist das D-ATCO-System für den Verkehr des oberen Luftraums konzipiert und begrenzt den Einsatz auf diesen Kontrollbereich.

Ein global limitierender Faktor ist die Ausstattung der Lfz mit CPDLC []. Nicht alle Lfz sind mit einem CPDLC-System ausgerüstet, weshalb das Assistenzsystem nur für die Flugzeuge einsetzbar ist, die diese Technologie ausgerüstet sind. Darüber hinaus hat sich in der Praxis gezeigt, dass selbst CPDLC-ausgestattete Lfz aufgrund von Kompatibilitätsproblemen in der Hardware oder Problemen im Bedienen der Technik aus dem Nutzerkreis der CPDLC ausgeschlossen werden [**?**]. Es kommt bei den genannten Lfz durch die technischen Probleme zu einer unzuverlässigen Kommunikationsverbindung und unbeabsichtigten Abbrüchen in der Datalink-Kommunikation. Der Nutzerkreis für CPDLC wird durch die EUROCONTROL Logon List verwaltet, welche den Flugsicherungsorganisationen die Liste zuverlässiger Nutzer zur Verfügung stellt und den registrierten Lfz-Betreibern Zugang zum CPDLC-System gewährt [**?**].

Weitere operationelle Grenzen entstehen durch spezifische Flugzustände. Das Assistenzsystem sollte die Kontrolle spätestens an den ATCO übergeben, wenn TCAS (Traffic Collision Avoidance System) beim betroffenen Lfz ausgelöst hat, da es für diese kritische Situation nicht ausgelegt ist. Aus dem gleichen Grund sollte das System nicht bei einem aktiven Short Term Conflict Alert (STCA) aktiviert sein, wenn ein D-ATCO kontrolliertes Lfz betroffen ist. Schließlich sollte das System in Notfallsituationen nicht aktiv sein, da hier ein hoher Kommunikationsbedarf entsteht, den das System nicht abbilden kann und unter Umständen ein schnelles Handeln nötig wird. Das Assistenzsystem sollte die Kontrolle des Lfz spätestens bei Rasten eines Transpondercodes für Notfälle (7700, 7600, 7500) an den ATCO übergeben. In solchen Situationen

Must	***Should***	***Could***	***Won't***
Zeige immer D-ATCO-Statuszeile mit Informationen im Radarlabel Zeige nächste Anweisung des D-ATCO Zeige Änderung des D-ATCO Betriebsmodus Vor Abweichungen warnen Vor Redelegation warnen Redelegation ändert Kopfsymbol (Form & Farbe) intuitives, visuelles Layout Eindeutige Felder zum Schließen / Beenden / Deaktivieren minimale Anzahl an Klicks keine Informationsüberfrachtung Informationen sind selbsterklärend einfaches Deaktivieren & Übersteuern des D-ATCO Redelegation nur mit Begründung Erfassen & Vorhersagen von Problemen Das System arbeitet vorhersagbar	Konsistenz in der Darstellung Spricht die SSprache"des Nutzers Einfacher, natürlicher Dialog Hover-Over-Funktion Countdown Interaktion mit D-ATCO über Radarlabel Keine komplexen Interaktionen für Routineaufgaben	Layout des Interface anpassbar machen Shortcuts	Akustische Warnung Verbale Ansprache des ATCO durch D-ATCO Hilfsfunktionen & Tipps

Tabelle 3.1: Priorisierte Anforderungen für den Entwurf des Redelegationsprozesses

muss die vollständige manuelle Kontrolle und Koordination durch den Fluglotsen gewährleistet sein.

3.1.3 Degradierungsstufen

Das konzeptionelle Rahmenwerk der Automatisierungsstufen nach Sheridan [32] beschreibt ein Kontinuum der Mensch-Maschine-Interaktion anhand eines Computers, welches von vollständiger manueller Kontrolle bis zur vollständigen Autonomie der Automation reicht. Nach diesem Modell existieren mehrere Abstufungen: In der niedrigsten Stufe behält der Mensch vollständige Kontrolle, und der Computer bietet keine Unterstützung. Mit zunehmendem Automatisierungsgrad bietet der Computer zunächst einen kompletten Satz von Handlungsalternativen an, reduziert dann die Auswahl auf wenige Optionen, schlägt schließlich eine einzelne Lösung vor und führt diese mit menschlicher Genehmigung aus. In den höheren Stufen gewährt der Computer dem Menschen eine begrenzte Zeit zum Einspruch vor der automatischen Ausführung. In der nächsten Stufe führt er sie dann automatisch aus und informiert den Menschen anschließend. In den höchsten Stufen informiert der Computer den Menschen nach der Ausführung nur auf Anfrage über seine Handlungen oder wenn der Computer selbst dies für notwendig erachtet. In der vollautomatisierten Stufe trifft der Computer alle Entscheidungen autonom und arbeitet ohne den Menschen.

Aus diesem Modell werden vereinfacht drei Degradierungsstufen für das D-ATCO Assistenzsystem gewählt. Die erste Stufe ist die Vollautomatisierung, in der das System ein oder mehrere Luftfahrzeuge im Kontrollsektor vollautomatisiert führt. Die zweite Stufe ist die Teilautomatisierung, in der das System als Assistent fungiert und Vorschläge unterbreitet. Alternativ ist in der Teilautomatisierung ein gemeinsames Führen eines Lfz durch D-ATCO und ATCO gleichzeitig denkbar. Die dritte Stufe besteht aus keiner Automatisierung, also dem manuellen, konventionellen Betrieb, in der die vollständige Kontrolle des Lfz an den ATCO übergeben wird.

Diese Degradierungsstufen werden im weiteren Verlauf exemplarisch für verschiedene Situationen herangezogen. Die erste ist ein Konflikt zwischen zwei Lfz, die teilweise unter D-ATCO-Kontrolle stehen. Dies stellt eine Systemgrenze dar, bei der eine Redelegation zur Teilautomatisierung oder manuellen Kontrolle erforderlich wird. Die zweite Situation ist ein partieller Systemausfall. Hier wird zum Veranschaulichen der Ausfall des D-ATCO-Moduls für die Höhenkontrolle betrachtet. Dies führt zu einer Degradation in den Assistenzmodus oder einer geteilten Flugführung des Lfz zwischen ATCO und D-ATCO. Ein Pilot Request für einen Flughöhenwechsel (Level Change) ist die letzte beispielhaft betrachtete Situation, die eine Degradation auslöst. Die im Weiteren an hand von drei exemplarischen Situationen untersuchten Degradierungsstufen werden in Kapitel 3.2 vorgestellt.

3.2 Definition der zu bewertenden Redelegationskonzepte

In den folgenden Abschnitten werden die in dieser Arbeit betrachteten beispielhaften Kontroll-Situationen sowie die im Rahmen dieser Arbeit entwickelten Redelegationsprozesse vorgestellt. Die Redelegationsprozesse in der Situationen Konflikt (Abschnitt3.2.2) und partieller Systemausfall (Abschnitt 3.2.3) gliedern sich in drei Varianten, während sich die Situation Pilot Request (Abschnitt 3.2.4) in zwei Varianten gliedert. Die Situation Konflikt wurde aufgrund ihrer Dringlichkeit bezüglich einer Reaktion des ATCO gewählt. Für die Situation partieller Systemausfall wurde sich aufgrund des veränderten und abweichenden Handlungsablaufs zur ersten

entschieden. Die Situation Pilot request soll das Handeln ohne Zeitdruck abbilden. Daraus ergibt sich ein breites Betrachtungsfeld, dessen einzelne Varianten nun vorgestellt werden. Sie sollen im späteren Verlauf durch die Experten in einem Workshop oder als Teilnehmer einer Onlineumfrage bewertet werden.

3.2.1 Schematische Darstellungsform der Verfahrensentwürfe

Die einzelnen Verfahrensschritte der Verfahrensentwürfe werden für die jeweiligen Kontrollsituationen und Varianten mithilfe eines Flussdiagramms dargestellt. Der Ausgangspunkt ist das Rechteck mit abgerundeten Ecken. Es beschreibt die Ausgangssituation und die Aufteilung der Kontrolle zwischen ATCO und D-ATCO. Jeder weitere Prozessschritt ist als Rechteck dargestellt. Es stellt Aktionen vom ATCO oder den Piloten sowie Zustandsänderungen im System dar. Der Übergabezeitpunkt der Kontrolle eines, mehrerer oder aller Luftfahrzeuge vom D-ATCO an den ATCO wird als Hexagon dargestellt. Muss eine Entscheidung vom ATCO bezüglich des weiteren Vorgehens getroffen werden, aus dem sich unterschiedliche Handlungsstränge ergeben, wird dies durch eine Raute visualisiert. Die einzelnen Handlungsschritte und Systemzustände sind in den jeweiligen Feldern des Flussdiagramms in Textform hinterlegt. Die Flussdiagramme aller Situationen sind im Anhang (Kapitel 7.1) hinterlegt.

3.2.2 Verfahren 1 - Systemgrenzen am Beispiel einer Konfliktsituation

In dieser Situation befinden sich zwei Flugzeuge unter der Kontrolle des D-ATCO, deren Flugbahnen sich in der nahen Zukunft kreuzen und die Mindeststaffelung unterschreiten werden. Im ausgewählten Fall findet der D-ATCO keinen Weg, die beiden Konfliktpartner selbstständig, sicher aneinander vorbeizuführen und den Mindeststaffelungsabstand einzuhalten. Der D-ATCO kommt an seine Systemgrenzen und benötigt daraufhin die Hilfe des ATCO, um beide Konfliktpartner sicher zu führen.

Variante 1 - direkte Rückgabe
In Variante 1 erfolgt eine unmittelbare Rückgabe der durch den D-ATCO kontrollierten Luftfahrzeuge (Lfz) an den ATCO. Die Redelegation wird mit dem Beginn des Short Term Conflict Alerts (STCA) durchgeführt. Im Rahmen dieses Prozesses wird fünf Sekunden zuvor auf dem Radarbildschirm das Kopfsymbol der betroffenen Luftfahrzeuge vollständig orange eingefärbt. Währenddessen erscheint im zugehörigen Label der Warntext „CONF RDEL“ (Conflict Redelegation) in Orange. Zeitgleich markiert das HI-DIRC-Interface die Flugstreifen beider Konfliktpartner durch orange hervorgehobene Umrahmungen, um die visuelle Identifikation der beteiligten Lfz zu erleichtern. Nach Ablauf der fünf-sekündigen Warnperiode erfolgt die automatische Rückgabe der Konfliktpartner an den ATCO. Nach erfolgter Redelegation bleiben die betreffenden Luftfahrzeuge im HI-DIRC-Interface weiterhin mit gelben Markierungen versehen.

Variante 2 - Coutdown bis zur direkten Rückgabe
In Variante 2 wird eine Countdown-basierte Zwangsrückgabe der durch den D-ATCO kontrollierten Lfz implementiert. 40 Sekunden vor Auslösen des Short Term Conflict Alerts erscheint im Radarlabel der betroffenen Lfz der Warntext „CONF RDEL 40s“ in Orange, wobei das Kopfsymbol ebenfalls vollständig orange eingefärbt ist. Parallel dazu werden beide Konfliktpartner im HI-DIRC-Interface durch gelb umrahmte Flugstreifen visuell hervorgehoben. Der im Warntext integrierte Countdown "40sßählt die Zeit bis zur automatischen Redelegation der

Konfliktpartner vom D-ATCO an den ATCO herunter. Mit dem Einsetzen des STCA wird die Zwangsredelegation automatisch ausgelöst, wodurch die betroffenen Lfz an den ATCO übergeben werden. Bei laufendem Countdown wird durch ein Hover-Over über dem Warntext „CONF RDEL“ des Radarlabels das Callsign des Konfliktpartners angezeigt. Durch einen Klick auf diesen kann eine sofortige manuelle Rückgabe des entsprechenden Lfz eingeleitet werden. Die Übergabe der Konfliktpartner erfolgt dabei sequenziell, das heißt, jedes betroffene Luftfahrzeug muss einzeln durch den ATCO übernommen werden.

Variante 3 - Lösungsvorschlag
In Variante 3 wird die Konfliktlösung zwischen zwei Lfz durch das Annehmen eines D-ATCO generierten Lösungsvorschlags dargestellt. Dabei verbleiben die betroffenen Lfz unter der Kontrolle des D-ATCO, während der ATCO die Parameter des D-ATCO anpasst, um eine geeignete Konfliktlösung zu initiieren. Zu Beginn der Konfliktsituation ändert sich das Kopfsymbol der betroffenen Lfz in Orange, vollständig ausgefüllt. Im Radarlabel eines der Konfliktpartner erscheint der Warntext „CONF SOL: FL290“ (Conflict Solution: Flight Level 290) in Orange. Parallel dazu werden beide Konfliktpartner im HI-DIRC-Interface durch das orange Umrahmen der Flugstreifen markiert. Mit der Conflict-Solution-Funktion generiert der D-ATCO einen konkreten Lösungsvorschlag zum Wiedererlangen der Mindeststafflung. Dies kann beispielsweise durch eine Flughöhenänderung geschehen. Der Vorschlag des D-ATCO kann anschließend durch den ATCO akzeptiert werden, indem er auf den Warntext im Radarlabel oder auf das Bestätigungssymbol des Flugstreifens im HI-DIRC-Interface klickt. Nach der Annahme übermittelt der D-ATCO die neue Freigabe bzw. Anweisung über CPDLC an die beteiligte Flugbesatzung. Hier ist perspektivisch auch die Nutzung automatisch generierter Audionachrichten denkbar. Nach Erteilung der Freigabe wird im Radarlabel der Status „CONF SLVD“ (Conflict Solved) in Orange angezeigt. Der D-ATCO überwacht die Reaktion der Luftfahrzeuge auf die Anweisung. Sobald die Mindeststaffelung wiederhergestellt ist, ändert sich der angezeigte Warntext des Radarlabels zu einem blauen „CONF SLVD“ und die orangen Markierungen der Flugstreifen im HI-DIRC-Interface werden entfernt.

3.2.3 Verfahren 2 - Degradierung durch einen partiellen Systemausfall

In Situation zwei wird angenommen, dass ein Teil des D-ATCO-Systems ausfällt, sodass dieser nicht mehr auf dem höchsten Automatisierungsgrad betrieben werden kann. Es stehen folglich nur noch Teile der Automatisierung zur Verfügung, die den ATCO unterstützen. Beispielhaft wird in den folgenden Entwürfen der Ausfall des Moduls der Höhenführung angenommen.

Variante 1 - Conflict Potential Ranking
In Variante 1 erfolgt eine vollständige Rückgabe der durch den D-ATCO kontrollierten Lfz an den ATCO. Die Redelegation wird durch eine Systemwarnung ausgelöst, die auf eine partielle Systemstörung hinweist. Auf dem Radarbildschirm erscheint das Kopfsymbol der betroffenen Lfz orange ausgefüllt, begleitet vom orangefarbenen Warntext „RDEL: PRT SYS FLT [1]“ (Redelegation: Partial System Fault [1]) des Radarlabels. Im HI-DIRC-Interface wird zusätzlich die Meldung „PRT SYS FLT: ALT COMMS“ (Partial System Fault: Altitude Communications) über dem Abschnitt der D-ATCO Flugstreifen angezeigt. Sie beschreibt das ausgefallene Systemmodul. Neben den Flugstreifen und im Radarlabel wird das Conflict Potential Ranking "[1]"dargestellt, ein Systemindikator, der die relative Nähe der D-ATCO-kontrollierten Lfz zu potenziellen Konfliktsituationen bewertet. Somit wird angezeigt, welche Lfz in der Aufmerk-

samkeit des ATCO prioritär behandelt werden sollten, um einen potentiellen Konflikt zu vermeiden. Ein Hover-Over über dem Warntext „RDEL: PRT SYS FLT“ im Radarlabel liefert zusätzliche Informationen über das betroffene Systemmodul, hier bspw. „ALT COMMS“. Ebenso ermöglicht ein Hover-Over auf der Ranking-Zahl die Anzeige des Callsigns des potenziellen Konfliktpartners, der auf dem Radarbildschirm gleichzeitig visuell hervorgehoben wird. Durch einen Klick auf den Warntext oder das Conflict Potential Ranking kann das betreffende Luftfahrzeug direkt vom D-ATCO an den ATCO übergeben werden.

Variante 2 - Geteilte Kontrolle
In Variante 2 wird bei einem partiellen Systemausfall eine geteilte Kontrolle zwischen dem D-ATCO und dem ATCO implementiert. Dabei übernimmt der ATCO die Aufgaben des ausgefallenen Teilsystems, während die verbleibenden, fehlerfreien Funktionen weiterhin vom D-ATCO ausgeführt werden. Zu Beginn des partiellen Systemausfalls färbt sich das Kopfsymbol des betroffenen Luftfahrzeugs (Lfz) orange und ist vollständig ausgefüllt. Im Radarlabel erscheint der orange Warntext „PSYS FLT ALT: 290“ (Partial System Fault Altitude: ...), wobei die schwarze „290“ für den letzten im funktionsfähigen System als sicher ermittelten Flugflächenwert (Flight Level 290) steht. Zusätzlich wird der Warntext „PSYS FLT: ALT“ über dem Abschnitt der D-ATCO-Flugstreifen im HI-DIRC-Interface angezeigt und soll Aufschluss über das betroffene Teilsystem geben. Zur weiteren Orientierung ist im Radarlabel die angezeigte Flughöhe orange hinterlegt, das auch hier den ausgefallenen Funktionsbereich des D-ATCO kennzeichnet. Ein Hover-Over über dem Warntext im Radarlabel ermöglicht durch ein Menü die direkte Übergabe des betroffenen Lfz vom D-ATCO an den ATCO. Alternativ kann durch einen Klick auf die vom D-ATCO empfohlene Flughöhe im Warntext der Modus der geteilten Kontrolle aktiviert werden. In diesem Fall übernehmen D-ATCO und ATCO gemeinsam die Flugführung: Der ATCO übernimmt den ausgefallenen Systemteil (z.B. die vertikale Führung), während der D-ATCO die weiterhin funktionsfähigen Komponenten (z.B. die laterale Führung) zum Führen und Überwachen der Lfz nutzt. Nach Aktivieren der geteilten Kontrolle verändert das Kopfsymbol auf dem Radarbildschirm Form und Farbe, um den neuen Betriebsmodus anzuzeigen. Der Parameter, den der ATCO durch den Ausfall vom D-ATCO übernommen hat, wird zusätzlich durch einen orangefarbenen Rahmen im Radarlabel hervorgehoben. Im HI-DIRC-Interface wechselt der zugeordnete Flugstreifen in den Bereich des ATCO, wobei der vom ATCO kontrollierte Parameter (z.B. Flughöhe) leicht orange hinterlegt ist. Direkt daneben werden die Kontrollanweisungen des D-ATCO angezeigt. Der Systemhinweis zum Teilausfall bleibt im Interface zusätzlich über dem D-ATCO-Abschnitt sichtbar.

Variante 3 - Assistenzmodus
In Variante 3 kann der D-ACTO im Falle eines partiellen Systemausfalls in einen Assistenzmodus versetzt werden, indem er den ATCO durch unterstützende Handlungsempfehlungen in der Entscheidungsfindung entlastet. Ein mögliches Szenario besteht darin, dass der D-ATCO keine Höhenfreigaben mehr erteilen kann, jedoch weiterhin Vorschläge zur lateralen Streckenführung bereitstellen kann. Zu Beginn des Teilausfalls des Systems färbt sich das Kopfsymbol des betroffenen Luftfahrzeugs (Lfz) orange und ist vollständig ausgefüllt. Im Radarlabel erscheint der Warntext „RDEL: PRT SYS FLT“ (Redelegation: Partial System Fault) in Orange. Im HI-DIRC-Interface weist der zusätzliche Warntext „PRT SYS FLT: ALT COMMS“ (Partial System Fault: Altitude Communications) über dem Abschnitt der D-ATCO Flugstreifen auf das ausgefallene Systemmodul hin. Ein Hover-Over über den Warntext „PSYS FLT ALT“ des Radarlabels bietet zwei Interaktionsoptionen: (1.) „Cancel“, wodurch das Lfz direkt vom D-ATCO

an den ATCO übergeben wird, und (2.) „Assist“, womit der D-ATCO in den Assistenzmodus versetzt wird. Mit Aktivierung dieses Modus erfolgt die Übergabe des Lfz an den ATCO, während der D-ATCO als beratendes System agiert. Gleichzeitig ändert sich der Warntext im Radarlabel zu einem braunen „SG: DCT ANORA“ (Suggestion: Direct [Wegpunkt] bspw. ANORA) und zeigt damit eine Empfehlung für eine potenziell konfliktfreie Routenführung an. Im HI-DIRC-Interface erscheint der Vorschlag des Assistenzmodus in brauner Schrift innerhalb des Kontrollanweisungsverlaufs des Flugstreifens (z.B. „DIRC Suggestion DCT ANORA“). Der übergeordnete Warntext über dem Abschnitt der D-ATCO-Flugstreifen wechselt in gleicher Farbgebung zu „PSYS FLT: SG Mode“ (Partial System Fault: Suggestion Mode). Wird die Empfehlung des D-ATCO vom ATCO durch einen Klick auf den Vorschlagstext akzeptiert, färbt sich der zuvor braune Text des Flugstreifens schwarz. Der neu freigegebene Wegpunkt wird nun als reguläre Freigabe im Radarlabel dargestellt.

3.2.4 Verfahren 3 - Pilot Request (Level Change)

In der folgenden Situation fragt die Flight Crew eines vom D-ATCO kontrollierten Flugzeugs eine Änderung der Flugbahn an. Beispielhaft wird in den folgenden Entwürfen eine Flughöhenänderung (Level-Change) durch die Piloten angefragt.

Variante 1 - Direkte Übergabe
In Variante 1 erfolgt eine direkte Übergabe der durch den D-ATCO kontrollierten Lfz an den ATCO. Diese Variante wird insbesondere im Zusammenhang mit Pilot Requests angewendet, die eine manuelle Interaktion des ATCO erfordern, weil der D-ATCO diese nicht abarbeiten kann. Bei Eingang des Requests erscheint ein grünes "RQSymbol (Request) im Radarlabel und signalisiert das Vorliegen einer Anfrage seitens der Flugbesatzung. Parallel dazu erscheint der entsprechende Flugstreifen im Abschnitt Requests des HI-DIRC-Interface. Hierdurch soll die visuelle Zuordnung der Anforderung erleichtert werden. Durch einen Klick auf das „RQ“ im Radarlabel übernimmt der ATCO unmittelbar die Kontrolle über das betreffende Lfz. Der ATCO bearbeitet den Pilot Request anschließend über Funk direkt mit der Flugzeugbesatzung und bestätigt dessen Abschluss. Hierzu klickt er im HI-DIRC-Interface auf den grünen Haken im zugehörigen Flugstreifen. Nach dieser Bestätigung gilt die Anfrage als abgeschlossen und kann in der Folge wieder durch den ATCO an den D-ATCO übergeben werden.

Variante 2 - Bestätigung durch ATCO
In Variante 2 erfolgt die Bearbeitung eines Pilot Requests über eine bestätigungsbasierte Interaktion zwischen dem ATCO und dem D-ATCO. Das Kopfsymbol des betroffenen Lfz auf dem Radarbildschirm färbt sich mit Eingang des Requests vollständig gefüllt grün ein. Im Radarlabel erscheint ein grünes „RQ“, das auf eine aktive Anfrage der Flugbesatzung hinweist. Der angefragte Parameter, beispielsweise die gewünschte Flughöhe, wird im Radarlabel durch einen grünen Rahmen hervorgehoben. Hier lässt sich unmittelbar erkennen, für welchen Parameter des Flugprofils der Request vorliegt. Im HI-DIRC-Interface erscheint im Flugstreifen des betroffenen Lfz eine grün markierte Zeile, die den genauen Inhalt der Anfrage (z.B. „Request FL 290“) im Verlauf der Kontrollanweisungen ausweist. Zusätzlich wird der Flugstreifen im Abschnitt Requests angezeigt. Hier kann der ATCO die Anfrage durch Anklicken eines grünen Hakens bestätigen oder über ein rotes „X“ ablehnen. Ein Hover-Over über das Symbol „RQ“ im Radarlabel zeigt den konkreten Request (z.B. „FL 290“) zusammen mit weiteren Optionen zur Bestätigung oder zum Ablehnen an. Darüber hinaus kann der ATCO durch Anklicken

des angezeigten Parameters die Antwort auf den Request anpassen, etwa durch Auswahl einer alternativen Flughöhe.

3.3 Prototypische Darstellung der Verfahren

Die prototypische Darstellung der im vorherigen Unterkapitel 3.2 entwickelten Entwürfe erfolgt mittels Powerpoint. Die Wahl wurde aufgrund der hohen Flexibilität in der Gestaltung und der Möglichkeit zur Animation eines Radarbilschirms sowie des D-ATCO Interface getroffen. Die folgende Abbildung 3.1 gibt einen Überblick über die im Workshop und in der Online-Umfrage gewählte Darstellung der Entwürfe.

Die prototypische Darstellung der Verfahren erfolgt über eine kurze Videosequenz die mittels Powerpoint erstellt wurde. In dieser ist ein Teilausschnitt des Radarbildschirms sowie ein Ausschnitt des HI-DIRC Interface des D-ATCO zu sehen. Ergänzend werden erklärende Informationen und Kommentare in einem Textfeld unter dem Radarbild und D-ATCO Interface angezeigt. Sie sollen zu einem besseren Verständnis der dargestellten Situation beitragen.

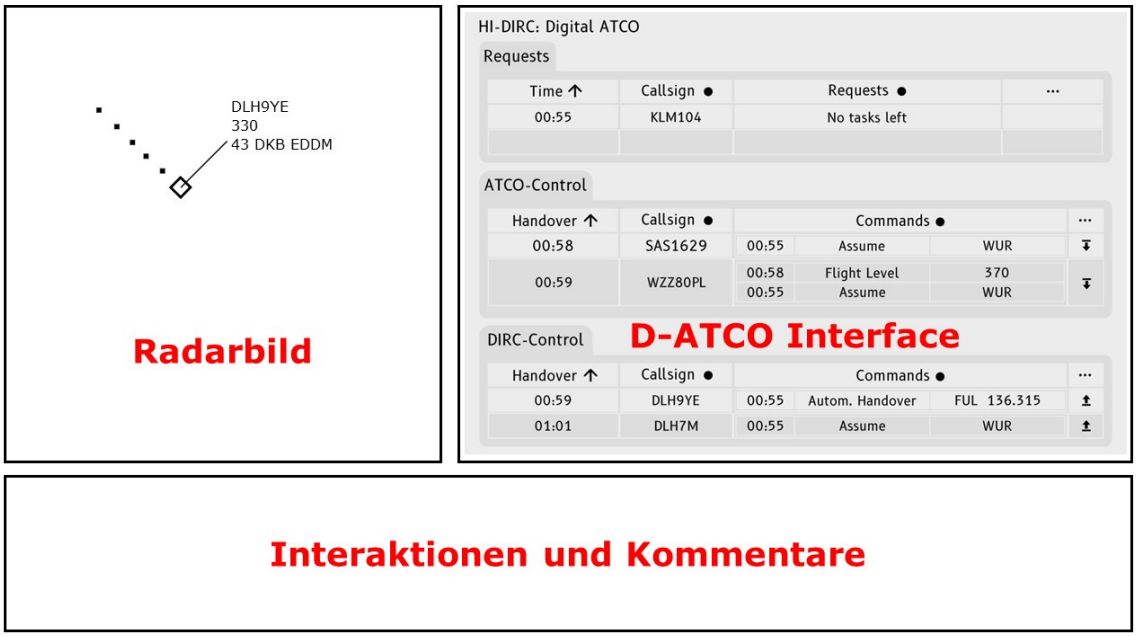

Abbildung 3.1: Prototypische Darstellung der Entwürfe

Radarbild
Das Radarbild zeigt beispielhaft das Kopfsymbol eines Flugzeugs im Kontrollsektor des ATCO. Anhand diesem ist erkennbar, ob der ATCO oder D-ATCO (Digitales Assistenzsystem) das Flugzeug kontrolliert. Des Weiteren gibt das Label am Kopfsymbol weitere Hinweise auf dem Status der Automatisierung. Viereckiges Kopfsymbol = ATCO Dreieckiges Kopfsymbol = D-ATCO

D-ATCO Interface
Das Interface ist in drei Bereiche aufgeteilt. Der obere Bereich zeigt die Anfragen des D-ATCO an den ATCO (bspw. eine Aufforderung zur Übergabe eines Luftfahrzeugs), der mittlere Bereich die Flugzeuge, die vom ATCO kontrolliert werden (ATCO-Control) und der untere Be-

reich die D-ATCO kontrollierten Flugzeuge (DIRC-Control). In der linken Spalte sieht man die Uhrzeit für die Übergabe an den nächsten Kontrollsektor. Die zweite Spalte zeigt die Kürzel der kontrollierten Flugzeuge. Die Spalte rechts daneben listet die gegebenen Kontrollanweisungen und deren Zeitstempel auf. Durch die Pfeil-Symbole am rechten Rand kann die Kontrolle vom ATCO zum D-ATCO als auch zurückgegeben werden.

Interaktionen und Kommentare
In diesem Feld werden zum besseren Verständnis Hinweise zum Geschehen und Interaktionen mit dem Interface sowie den kontrollierten Flugzeugen gegeben.

Die Wahl der in der Visualisierung verwendeten Schriftart des Radarbilds basiert auf den Ergebnissen einer Studie von Eurocontrol. **??** In dem optischen Guide werden die folgenden Schriftarten empfohlen:

- Courier New
- ISO CT
- Miriam Mono CLM
- Monospace

Auch Airbus hat eine eigene Schriftart für die Darstellung von Texten und Nummern auf ihren Bildschirmen entwickelt. Sie wurde für die Darstellung des D-ATCO Interface verwendet und heißt "B612" [33].

Die Videosequenzen der Redelegartionsentwürfe sind dieser Arbeit in digitaler Form auf dem USB-Stick beigelegt und können dort betrachtet werden. Sie sind in dem Ordner "Die prototypische Darstellung der Redelegationsprozesseßu finden.

4 Evaluation der Degradierungsverfahren

4.1 Methodik und Bewertungskriterien

Für die Bewertung der Entwurfsvarianten wird auf drei Methoden zurückgegriffen, der User Experience Questionnaire -Short Version, das Ranking der Entwurfsvarianten und Fragen mit offenem Textfeld. Im Folgenden werden die Methoden und deren Bewertungskriterien erläutert.

4.1.1 User Experience Questionnaire - Short Version [UEQ-S]

Der UEQ-S ist eine Kurzversion des etablierten User Experience Questionnaire (UEQ)-Fragebogens zur Messung der Benutzerfreundlichkeit interaktiver Produkte. Laut [34] wurde er entwickelt, um Szenarien zu bewerten, in denen die Anwendung des vollständigen 26-Item-Fragebogens zeitlich nicht praktikabel ist. Der UEQ-S besteht aus nur acht Bewertungskriterien und erfasst zwei übergeordnete Qualitätsdimensionen: Der pragmatischen Qualität (PQ) bestehend aus den vier Bewertungskriterien Perspektivität, Effizienz, Kontrollierbarkeit und Klarheit sowie der hedonistischen Qualität (HQ) bestehend aus den drei Bewertungskriterien Stimulation, Neuheit und Kreativität. Sie werden auf einer siebenstufigen semantischen Differentialskala präsentiert, bei der jedes Bewertungskriterium mit je zwei Begriffen entgegengesetzter Bedeutung an den Endpunkten beschriftet wird. In der Auswertung ergibt eine die negativste Bewertung auf der Skala einen Wert von -3 und eine extrem positivste Bewertung auf der Skala einen Wert von +3.

Das UEQ Handbuch [34] definiert die Skalen des UEQ-S wie folgt:
Pragmatische Qualität [PQ]

- Perspektivität: *behindernd - unterstützend*
- Effizienz: *kompliziert - einfach*
- Kontrollierbarkeit: *ineffizient - effizient*
- Klarheit: *verwirrend - übersichtlich*

Hedonistische Qualität [HQ]

- Stimulation: *langweilig - spannend*
- Stimulation: *uninteressant - interessant*
- Neuheit: *konventionell - originell*
- Kreativität: *herkömmlich - neuartig*

Der UEQ-S wird laut [34] typischerweise in drei spezifischen Anwendungsszenarien eingesetzt, erstens beim Sammeln von Feedback für das Logout aus einem Online-Service oder Web-Shop, zweitens bei der Integration in bestehende längere Produkterfahrungs-Fragebögen und drittens in experimentellen Studien, in denen Teilnehmer mehrere Produkt-Varianten sequenziell bewerten müssen. Ein zentraler Punkt des UEQ-S ist, dass er im Gegensatz zum vollständigen UEQ keine detaillierte Bewertung der einzelnen Qualitätsaspekte (Attraktivität, Klarheit, Effizienz, Zuverlässigkeit, Anregung, Neuheit) liefert, sondern nur Messwerte für die zwei übergeordneten Meta-Dimensionen bereitstellt. Daher wird die Anwendung der UEQ-S nach [34]

ausdrücklich nur für die oben genannten Szenarien empfohlen, nicht jedoch als Ersatz für den vollständigen UEQ.

Für die Bewertung der Entwurfsvarianten wurde der UEQ-S gewählt, da die Teilnehmenden im Evaluationsverfahren mehrere Varianten nacheinander bewerten müssen und der UEQ mit seinen 26 Bewertungskriterien zu umfangreich gewesen wäre.

4.1.2 Ranking der Entwurfsvarianten

Ein Ranking ist ein standardisiertes Verfahren des Qualitäts- oder Leistungsvergleichs, bei dem die verglichenen Qualitäten und Leistungen durch ein Indikatorsystem operationalisiert werden. Die Bewertungsergebnisse werden verdichtet und in der Bildung von Ranglisten zusammengefasst, auf denen jedem Objekt ein bestimmter Rangplatz zugewiesen wird. Im engeren Sinne führt ein Ranking somit zu einer eindeutigen Ordnung, in der jedes bewertete Objekt eine spezifische Position in der Hierarchie einnimmt (vgl. [35]).

Das Ranking der Entwurfsvarianten erfolgt für die zwei bzw. drei Varianten, die einer Situation zugeordnet werden. Dabei sollen die Teilnehmenden die Varianten nach ihrem Gesamteindruck und der daraus resultierenden Präferenz sortieren. Die Variante mit dem besten Gesamteindruck soll Platz eins zugeordnet werden, während die verbleibenden Varianten mit abnehmender Präferenz auf den weiteren Plätzen folgen.

4.1.3 Fragen mit offenem Textfeld

> Äls offene Fragen bezeichnet man alle Fragen in Erhebungen, bei denen es keine Antwortvorgaben gibt: Der Befragte muss seine Antwort in eigenen Worten formulieren und frei sprechen bzw. schreiben, wie er es gewohnt ist. Eine Lenkung durch vorgegebene Antwortkategorien findet nicht statt." [36]

Hierdurch wird den Teilnehmenden ermöglicht, individuelle und sehr detaillierte Anmerkungen zu den jeweiligen Varianten zu machen. Für alle Varianten der drei Situationen wurden die folgenden Fragen gestellt:

- Wo sehen Sie Probleme in der Ausführung oder im Betrieb?
- Hätten Sie Verbesserungsvorschläge?
- Welche operationellen Anforderungen sehen Sie in dieser Situation als besonders wichtig an?

In für zwei Situationen des Bewertungsbogens wurden weiterführende, spezifische Fragen gestellt. Sie beziehen sich auf die Besonderheiten der Situation bzw. einer herausragenden Eigenschaft einer Variante.

Für Situation 1 - Systemgrenzen

- Sollte die Redelegation vom D-ATCO zum ATCO einer Bestätigung durch den ATCO bedürfen oder direkt geschehen?
- Sollten bei einer Redelegation vom D-ATCO zum ATCO mehrere Flugzeuge gleichzeitig oder nacheinander übergeben werden?

- Wie beurteilen Sie den Einsatz eines Countdowns vor der Redelegation vom D-ATCO zum ATCO?

Für Situation 2 - Partieller Systemausfall

- Wie beurteilen Sie die gemeinsame, gleichzeitige Kontrolle eines Flugzeugs durch den D-ATCO und ATCO?

Für Situation 3 - Pilot Request

- keine

4.1.4 Aufbau des Bewertungsbogens und Online-Fragebogens

Der Bewertungsbogen gliedert sich in sieben strukturierte Abschnitte, die eine systematische Evaluation der Entwurfsvarianten der Redelegationsprozesse ermöglichen.

Der erste Abschnitt umfasst die Begrüßung und den Datenschutz, in dem die Teilnehmenden über das Thema der Redelegation informiert und Datenschutzvorgaben erläutert wurden. Im zweiten Abschnitt werden die demographischen Daten der Teilnehmenden erfasst. Abschnitt drei bietet eine Einführung in die prototypische Darstellung, um Teilnehmende mit der Systemoberfläche und der Darstellung vertraut zu machen.

Die Abschnitte vier bis sechs folgen einem identischen strukturierten Ablauf, hier werden die Entwurfsvarianten der drei operationelle Szenarien evaluiert: Situation 1 – Systemgrenze durch Konflikt, Situation 2 – Partieller Systemausfall und Situation 3 – Pilot Request (Level Change). Für jede Situation werden drei bzw. zwei Varianten evaluiert. Der Ablauf besteht aus folgenden Schritten: (1) Erklärung der operationellen Situation, (2) Erläuterung der Variante mittels Flussdiagramm, (3) Vorführung der Variante durch ein Video, (4) Bewertung der Variante mittels UEQ-S. Nach der Evaluation aller drei Varianten mittels UEQ-S folgen (5) ein Ranking aller Varianten für die jeweilige Situation sowie (6) das Beantworten von Fragen in einem offenen Textfeld. Der siebte Abschnitt umfasst die Danksagung für die Teilnehme an der Umfrage.

Quantitativ zusammengefasst enthält der Bewertungsbogen insgesamt drei demographische Fragen, acht UEQ-S-Fragebatterien zur Evaluation der acht Entwurfsvarianten (drei Varianten für die Situationen eins und zwei sowie zwei Varianten für die Situation drei), drei Ranking-Aufgaben (eine pro Situation) sowie 13 Fragen mit offenem Textfeld zur qualitativen Erfassung des Nutzerfeedbacks und deren Begründung.

4.2 Datenerhebung

Die Daten zur Bewertung der Entwürfe der Redelegationskonzepte wurden über zwei Verfahren erhoben. Zum einen über einen Expertenworkshop am Institut für Flugführung des DLR, zu anderen über einen Online-Fragebogen. Dieses Verfahren wurde gewählt, um eine möglichst große Menge an potentiellen Teilnehmenden zu erreichen. Im Folgenden sollen die beiden Verfahren genauer beschrieben werden, der Expertenworkshop in Abschnitt 4.2.1 und der Online-Fragebogen in Abschnitt 4.2.2.

4.2.1 Expertenworkshop

Ziel des Workshops war es, erstens die Akzeptanz der entwickelten Redelegationsverfahren zu ermitteln, zweitens die Stärken und Schwächen der einzelnen Konzepte zu identifizieren und drittens Empfehlungen für die Weiterentwicklung der in Kapitel 3.2 vorgestellten Redelegations-Konzepte abzuleiten.

Teilnehmende Am Workshop nahmen (n = 7) Wissenschaftler aus dem Bereich Flugsicherung (6 männlich, 1 weiblich; Alter: M = 45,0 Jahre). Die Anzahl der Teilnehmenden reduzierte sich im Verlauf um einen Teilnehmenden. Die Rekrutierung erfolgte zum einen über eine interne Ankündigung in der Abteilung Lotsenassistenz des Instituts für Flugführung des DLR am Standort Braunschweig, zum anderen über eine E-Mail-Anfrage an eine Lotsengruppe der DFS am Standort Bremen. Das Einschlusskriterium war eine aktuelle Tätigkeit als Wissenschaftler im Bereich der Flugsicherung oder die Tätigkeit als Fluglotse bei der DFS. Die Teilnahme erfolgte auf freiwilliger Basis.

Durchführung Der Workshop fand am 07.10.2025 in den Räumlichkeiten des Instituts für Flugführung des DLR in Braunschweig statt und dauerte 1,5 Stunden. Der Ablauf gliederte sich in fünf Phasen:

1. *Einführung [10 min]:* Nach einer Begrüßung und Vorstellung erläuterte der Moderator (Verfasser dieser Studienarbeit) das Themengebiet des Workshops, dessen Ziel und den Ablauf. Es wurde vertieft darauf eingegangen, wie auf den Online-Bewertungsbogen zuzugreifen ist, die demografischen Daten auszufüllen sind und was in der prototypischen Visualisierung dargestellt wird. Abschließend wurden Verständnisfragen beantwortet.

2. *Entwürfe zu Situation 1 - Systemgrenzen - Konflikt [30 min]:* Es wurden nacheinander drei Varianten eines Entwurfs für den Redelegationsprozess bewertet (Variante 1: direkte Rückgabe, Variante 2: Countdown bis Rückgabe, Variante 3: Lösungsvorschlag). Für jede Variante wurde der Prozess-Entwurf kurz anhand eines Flussdiagramms vorgestellt und mittels einer Animation zweimal als Video vorgespielt [je 5 min]. Auf Verständnisfragen wurde direkt eingegangen. Nach jedem Video Block erfolgte individuell das Bewerten der jeweiligen Variante durch den UEQ-S. Nach der dritten Variante wurde individuell das Ranking der vorgestellten Varianten und das Beantworten der offen Fragen in den Textfeldern [5 min] durchgeführt. Abgeschlossen wurde der Bewertungsabschnitt mit einer 5-minütigen Gruppendiskussion. Hier wurde tiefer auf die Rückmeldungen und sich daraus ergebenden Fragen eingegangen, mit dem Ziel einen Gesamteindruck für die Rückmeldungen zu bekommen. Die Diskussion wurde vom Moderator geleitet und gleichzeitig die wichtigsten Aspekte stichpunktartig protokolliert.

3. *Entwürfe zu Situation 2 - partieller Systemausfall [30 min]:* Das Vorgehen aus Abschnitt zwei wiederholt sich hier für die drei Varianten der Situation 2 - Partieller Systemausfall. (Variante 1: Conflict Potential Ranking, Variante 2: Geteilte Kontrolle, Variante 3: Assistenzmodus)

4. *Entwürfe zu Situation 3 - Pilot Request (Level Change) [15 min]:* Das Vorgehen aus Abschnitt zwei wiederholt sich hier für die zwei Varianten der Situation 3 - Pilot Request (Level Change) (Variante 1: Direkte Übergabe, Variante 2: Bestätigung durch ATCO)

5. *Abschluss [5 min]:* Zusammenfassen des Workshops und Bedanken für die Teilnahme.

Die Gruppendiskussionen wurden aufgrund fehlenden Einverständnisses nicht audiovisuell aufgenommen.

Bewertungsbogen Zur standardisierten Bewertung der Konzept-Entwürfe wurde der in Abschnitt 4.1.4 beschriebene Online-Fragebogen verwendet.

Datenschutz Alle Teilnehmenden wurden vor Beginn des Workshops über die Datenverwendung und deren Freiwilligkeit informiert. Anschließend gaben sie ihr schriftliches Einverständnis, dass die Daten pseudonymisiert und für die Dauer der Bearbeitung gespeichert sowie ausschließlich für die Forschungszwecke dieser Arbeit verwendet werden.

4.2.2 Online-Fragebogen

Den Online-Fragebogen haben (n = 7) Wissenschaftler aus dem Bereich Flugsicherung (Teilnehmende des Workshops) und (n = 1) Fluglotse aus dem Bereich Center ausgefüllt. (7 männlich, 1 weiblich; Alter: M = 42,9 Jahre). Die Rekrutierung erfolgte zum einen über eine interne Ankündigung in der Abteilung Lotsenassistenz des Instituts für Flugführung des DLR am Standort Braunschweig, zum Anderen über eine E-Mail-Anfrage an eine Lotsengruppe der DFS am Standort Bremen. Das Einschlusskriterium war eine aktuelle Tätigkeit als Wissenschaftler im Bereich der Flugsicherung oder die Tätigkeit als Fluglotse bei der DFS. Die Erhebung fand im Zeitraum vom 29.09.2025 bis zum 19.10.2025 statt und die Teilnahme erfolgte auf freiwilliger Basis. Die Online-Umfrage wurde mit der Software LimeSurvey (Version 4.6.3) erstellt. Die durchschnittliche Bearbeitungsdauer betrug ca. 1,1 Stunden. Den Teilnehmenden wurde zur Beantwortung aufkommender Fragen ein E-Mail-Kontakt ermöglicht.

4.3 Auswertung und Ergebnisse

Der folgende Abschnitt erläutert die Auswertung der im Rahmen des Workshops erhobenen Daten. Insgesamt nahmen acht Personen im Alter zwischen 28 und 63 Jahren am Workshop teil, die allesamt als Wissenschaftler im Bereich der Flugsicherung tätig sind. Im Verlauf des Workshops musste eine teilnehmende Person den Workshop vorzeitig verlassen, sodass nicht für alle vorgestellten Situationen vollständige Rückmeldungen vorliegen. Ergänzend zu den im Workshop erhobenen Daten wird ein inhaltlich identischer Onlinefragebogen einbezogen, der von einem im Center tätigen Fluglotsen bearbeitet wurde. Für die Auswertung der drei betrachteten Situationen liegen damit für Situation 1 (Systemgrenzen – Konflikt) Rückmeldungen von acht Teilnehmenden (n = 8), für Situation 2 (Partieller Systemausfall) Rückmeldungen von sieben Teilnehmenden (n = 7) und für Situation 3 (Pilot Request – Level Change) Rückmeldungen von sechs Teilnehmenden (n = 6) vor.

4.3.1 Situation 1 - Systemgrenzen (Konflikt)

User Experience Questionnaire - Short Version (UEQ-S) Die Interpretation der UEQ-S-Ergebnisse basiert auf definierten Wertungsbereichen, die eine standardisierte Klassifizierung der Ergebnisse ermöglichen. Laut [34] definieren sie sich wie folgt.

Werte zwischen -0,8 und 0,8 werden als neutral klassifiziert und deuten darauf hin, dass das System weder besonders positive noch besonders negative Bewertungen erhält. Werte größer 0,8 bis zu einem Maximum von 3 werden als positive Bewertungen interpretiert, wobei Werte

näher der 3 eine sehr gute Bewertung darstellen. Dieser Bereich zeigt, dass die Nutzenden das System als benutzerfreundlich und zufriedenstellend wahrnehmen. Umgekehrt werden Werte kleiner -0,8 bis zu einem Minimum von -3 als negative Bewertungen eingeordnet, mit Werten näher der -3 als sehr schlecht. Dies zeigt erhebliche Mängel oder Unzufriedenheit mit dem System.

Ein Referenzmaß ist ein Wert von 1,5, der bereits als gut betrachtet wird. Dies bedeutet, dass zum Erreichen einer positiven Bewertung nicht notwendigerweise extreme Zustimmung erforderlich ist. Moderate bis gute Bewertungen kennzeichnen bereits ein zufriedenstellendes Nutzererlebnis. Empirisch ist zu beobachten, dass Werte größer 2 oder kleiner -2 selten auftreten. Dies lässt sich darauf zurückführen, dass die Nutzenden bei der Beantwortung von Fragen selten extreme Positionen wählen. Diese Verteilungscharakteristik ist bei der Interpretation von UEQ-S-Ergebnissen zu berücksichtigen und zeigt, dass bereits moderate positive Werte ein Zeichen zufriedener Nutzender darstellt.

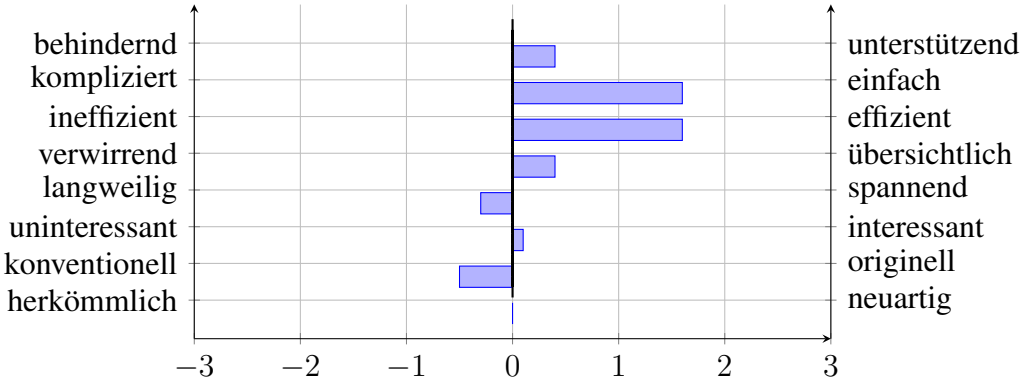

Abbildung 4.1: Mittelwert des UEQ-S Situation 1 - Version 1

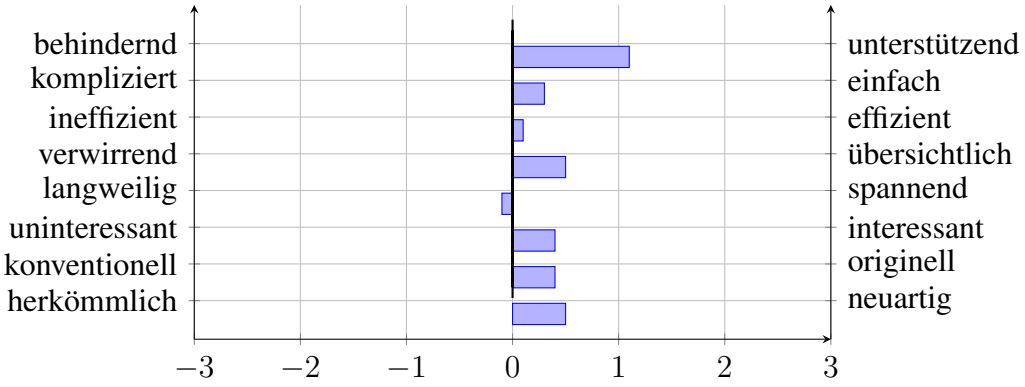

Abbildung 4.2: Mittelwert des UEQ-S Situation 1 - Version 2

Auswertung des Fragebogens

Potentielle Probleme in der Ausführung oder im Betrieb:

Variante 1: Die Angesprochenen Probleme der Variante 1 sind, was nach der Auflösung des Konflikts mit den betroffenen Luftfahrzeugen geschieht und ob eine automatische Rückgabe an den D-ATCO erfolgt (n = 2, 25,0%). Angemerkt wird außerdem, dass keine Konfliktpartner-Anzeige wie in Variante 2 vorhanden ist, obwohl sich die Hover-over-Funktion auch hier eignen

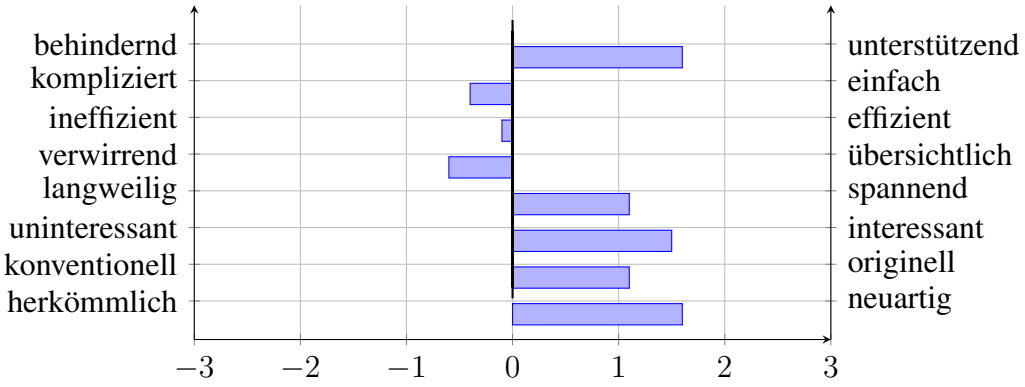

Abbildung 4.3: Mittelwert des UEQ-S Situation 1 - Version 3

würde. Hinzu kommt, dass die direkte Übergabe des Konflikts zu unvorhergesehenen Unterbrechungen anderer Aufgaben führen kann. Weiter wird der Zeitraum bis zur automatisierten Rückgabe als zu kurz eingeschätzt, wodurch diese bei rein visuellen Hinweisen leicht übersehen werden kann. Vor diesem Hintergrund wird angemerkt, dass die Warn-Box im HI-DIRC Interface durch einen Rotton deutlicher hervorgehoben werden kann.

Variante 2 In Bezug auf Variante 2 wird auf folgende potenzielle Probleme hingewiesen. Wie in Variante 1 bleibt unklar, was nach der Lösung des Konflikts mit den betroffenen Luftfahrzeugen geschieht. Ob der D-ATCO die Kontrolle direkt wieder übernimmt oder das Lfz vom ATCO an den D-ATCO übergeben werden muss. Der D-ATCO sollte die Kontrolle direkt an den Menschen zurückgeben, wenn er ein Problem nicht lösen kann, da das explizite Wiedererlangen der Kontrolle durch den ATCO zusätzliche Zeit kostet. Dies geht in der Folge mit einer als zu hoch wahrgenommenen Anzahl an Klicks einher. Darüber hinaus birgt die dargestellte Zeitangabe ein Potential für Missverständnisse, da sie als verbleibende Zeit bis zum Konflikt statt bis zur Redelegation interpretiert werden kann. Der Countdown-Timer lässt also nicht eindeutig erkennen, worauf sich die angezeigte Zeit tatsächlich bezieht (n = 2, 25,0%). Des weiteren wird angemerkt, dass zu definieren ist, ob der D-ATCO nach auslösen des Countdowns weiterhin Anweisungen an das Lfz gibt oder dies mit beginn des Countdowns unterlässt. Als letzter Punkt wurde angemerkt, dass die Konfliktanzeige auf dem Radarschirm verschwindet, sobald der Konflikt an dem ACTO übergeben wurde, obwohl die Situation zu diesem Zeitpunkt noch nicht gelöst ist.

Variante 3 Im Abschnitt zu Variante 3 werden folgende potenzielle Probleme identifiziert. Zunächst wird darauf hingewiesen, dass der angebotene Lösungsvorschlag eindeutig dargestellt sein muss, sollte es mehrere geben. Insbesondere wenn mehrere Lösungsoptionen existieren, ist zu klären, ob eine einzelne Gesamtlösung oder die vorgeschlagenen Lösungen für beide Lfz separat angenommen werden müssen. (n = 2, 25,0%) In diesem Zusammenhang wird auch infrage gestellt, ob der Lösungsvorschlag in jeder Situation schnell und leicht erfassbar ist, sowie frei von neuen Konflikten mit bislang unbeteiligten Luftfahrzeugen bleibt. Zudem ist aus Sicht der Teilnehmenden nicht hinreichend ersichtlich, ob es sich um eine oder zwei unterschiedliche Konfliktlösungen handelt und ob es in jedem Fall erforderlich ist, beiden beteiligten Luftfahrzeugen eine eigene Konfliktlösung zuzuteilen. Ein weiterer Punkt ist die Darstellung der Flughöhen, da es teilweise als unklar aufgenommen wurde, welches Flight Level den Ausgangszustand repräsentiert und welches das neu vorgegebene Flight Level ist. Daher wird ge-

fordert, das Aktuelle als auch das neue Flight Level nebeneinander auf dem Radarbildschirm darzustellen. Ein zentraler Aspekt ist die Verzögerungen durch das gewählte Kommunikationsverfahren. Da derzeitige CPDLC-Verfahren, deren Übertragungsdauer für Nachrichten bis zu 90 Sekunden beträgt, hier nicht geeignet scheinen. Aus diesem Grund das Konzept nur unter der Annahme eines weiterentwickelten sehr schnellen Kommunikation Systems (CPDLC 2.0) realistisch funktionieren kann (n = 3, 37,5%).

Gesamtbetrachtung In der Gesamtbetrachtung der Varianten eins bis drei hat sich abgezeichnet, dass den Teilnehmenden der Grund der Redelegation durch den D-ATCO präziser dargelegt werden muss, um die Ausgangssituation besser darstellen zu können. Beispiele hierfür wären:

- Hat der D-ATCO keine Lösung für das Konflikt-Problem gefunden?
- Erachtet der D-ATCO seinen Lösungs-vorschlag als nicht sicher?
- Die die vom D-ATCO entwickelte Lösung außerhalb seiner Systemgrenzen?

Weiterführend wurde angemerkt, die einzelnen Varianten der Situation 1 von der verbleibenden Zeit bis zum Konflikt abhängig zu machen. In einem ausreichend großen Zeitfenster ist das Anzeigen der Lösung und das anschließende Ausführen durch den D-ATCO denkbar. Verbleibt wiederum nur wenig Zeit bis zu einer potentiellen Kollision soll die Kontrolle direkt an den ATCO übergeben werden.

Verbesserungsvorschläge:
Im Rahmen der Bewertung der Varianten eins bis drei wurden folgende Verbesserungsvorschläge formuliert. Dem ATCO könnten in der Konfliktsituation weitere Informationen wie der genauen Konfliktposition der Luftfahrzeuge sowie der Zeitpunkt der größten Annäherung dargestellt werden. Darüber hinaus wird angemerkt, dass die derzeitige Hover-over-Darstellung des Konfliktpartners zu lange dauert. Der ATCO muss auf einen Blick erkennen können, ob ein Konflikt besteht und welche Luftfahrzeuge betroffen sind. Ergänzend wird vorgeschlagen, die Begründung für eine Redelegation durch den D-ATCO anzuzeigen und die Lösungsmöglichkeiten grundsätzlich immer einzublenden. Selbst wenn der D-ATCO sie selbst nicht umsetzen darf. Für den zeitlichen Ablauf der Warnungen wird eine strukturierte, mehrstufige Darstellung angeregt, etwa durch eine schrittweise Verstärkung der visuellen Darstellung. Zunächst eine gelbe Markierung, dann Blinken und anschließend ein expliziter Hinweis auf die unmittelbar bevorstehende Redelegation. Zudem wird der bestehende Farbkontrast, etwa zwischen Gelb und Weiß oder Gelb und Grau, sowohl auf dem Radarschirm als auch im HI-DIRC-Interface als zu schwach bewertet. Weiter empfiehlt sich eine farbliche Codierung nach Gefährdungsgrad, bei der beispielsweise Rot eine aktuell kritische Situation und Gelb eine in absehbarer Zeit kritisch werdende Situation kennzeichnet.

Bedarf einer Bestätigung durch ATCO bei Übernahme eines Lfz vom D-ATCO:
Der Bedarf einer Bestätigung bei der Übergabe eines Lfz vom D-ATCO an den ATCO bewertet die Mehrheit der Teilnehmenden (n = 6, 75,0%) positiv. Eine Bestätigung trägt zur Verbesserung des Situationsbewusstseins bei, da sichergestellt wird, dass die Redelegation bewusst wahrgenommen wird und klar ist, ab welchem Zeitpunkt der D-ATCO keine weiteren Aktionen mehr durchführt. Gleichzeitig wird betont, dass ein solches Verfahren situativ oder optional angepasst werden sollte (n = 3, 37,5%). Im normalen Betrieb wird eine Bestätigung als Standardzustand empfohlen, während in sehr einfachen Situationen ohne Gefahrenpotenzial optional eine automatische Übergabe ohne explizite Bestätigung als ausreichend angesehen werden kann. Die-

se muss nach einer bestimmten Zeitspanne auch zwingend erfolgen, da das System an seiner Grenze ist und keine Lösung durchsetzt. Andererseits wird argumentiert, dass eine zusätzliche Bestätigung einen weiteren Klick erfordert (n = 1, 12,5%), ohne dass der menschliche Fluglotse die Redelegation tatsächlich ablehnen könnte, sodass in dringlichen Situationen die direkte Redelegation ohne zusätzlichen Interaktionsschritt vorzuziehen ist und durch ein akustisches Signal sowie eine visuelle Hervorhebung, etwa durch eine Farbänderung, unterstützt wird.

Anzahl gleichzeitig übergebener Lfz an den ATCO:
Betreffend der Übergabe mehrerer Lfz an den ATCO betonen die Teilnehmenden vor allem die Abhängigkeit von der jeweiligen Situation. Die Mehrheit der Teilnehmenden halten eine gemeinsame Übergabe für sinnvoll, wenn die betreffenden Luftfahrzeuge demselben Konflikt zugeordnet sind (n = 4, 50,0%), da auf diese Weise der gesamte Konflikt übergeben wird und ein zusätzlicher Klick (n = 2, 25,0%) für das zweite Luftfahrzeug entfällt. Gleichzeitig wird darauf hingewiesen, dass eine gleichzeitige Übergabe nicht parallel zu anderen, Luftfahrzeugen erfolgen sollte und bei mehreren parallelen Konflikten nach der Dringlichkeit priorisiert (n = 1, 12,5%) werden muss. Ein Teilnehmender fordert eine möglichst hohe Wahlfreiheit (n = 1, 12,5%), sodass sowohl Einzel- als auch Mehrfachübergaben je nach Situation möglich bleiben.

Countdown bis zur Übergabe eines Lfz an den ATCO:
Die Beurteilung des Countdowns vor der Redelegation der Kontrolle vom D-ATCO an den menschlichen Fluglotsen fällt befriedigend aus (n = 4, 50,0%). Positiv hervorgehoben wird, dass ein Countdown dem Fluglotsen die Möglichkeit gibt, die Dringlichkeit der Situation besser einzuschätzen (n = 1, 12,5%) und das Verhalten des D-ATCO antizipierbarer zu machen (n = 1, 12,5%). Voraussetzung dafür ist eine klare Definition dessen, was das Erreichen von „0“ bedeutet (n = 1, 12,5%), ob damit ein Zusammenstoß der Lfz, das Unterschreiten der Mindeststaffelung oder die automatische Redelegation an den ATCO verknüpft ist. Zur Unterstützung der optischen Wahrnehmung wird empfohlen, den Countdown gegen Ende durch zusätzliche visuelle Signale, beispielsweise einen Farbwechsel auf Rot, sowie durch akustische Hinweise zu verstärken. Dies lenkt die Aufmerksamkeit des ATCO gezielt auf die anstehende Redelegation. Kritisch angemerkt wird demgegenüber, dass in Konfliktsituationen eine sofortige Redelegation vorrangig ist, um keine Zeit zu verlieren (n = 1, 12,5%). In diesem Zusammenhang wird angeregt, den Countdown eher auf den Zeitpunkt der dichtesten Annäherung auszurichten, statt auf die Redelegation selbst. Da dies aus Sicht des Teilnehmenden (n = 1, 12,5%) eine sicherheitsrelevante Information darstellt.

Wichtige operationelle Anforderungen der betrachteten Situation:
Für die Entwicklung von Redelegationsprozessen für die betrachtete Situation lassen sich folgende operationelle Anforderungen formulieren. Zentral ist, dass die Aufmerksamkeit des Lotsen gezielt gewonnen und im Bedarfsfall schnell auf einen dringlichen Konflikt gelenkt wird, sodass sicherheitsrelevante Ereignisse nicht übersehen werden. Hierzu gehört, dass die beteiligten Konfliktpartner eindeutig angezeigt werden, damit die Gesamtsituation rasch erfasst und korrekt interpretiert werden kann. Die Interaktion sollte sich dabei auf möglichst wenige, klar formulierte Handlungsoptionen beschränken. Gleichzeitig ist eine klare Darstellung des aktuellen System- und Konfliktstatus erforderlich, damit zu jedem Zeitpunkt erkennbar ist, in welchem Betriebsmodus oder Übergabeschritt sich der D-ATCO befindet. Insgesamt muss die Situation für den ATCO schnell und eindeutig erfassbar sein, wobei insbesondere sichergestellt werden soll, dass eine Übergabe nicht unbemerkt erfolgt, sondern stets bewusst wahrgenommen und nachvollzogen werden kann.

Gruppendiskussion:
In der Gruppendiskussion wurden weitere Aspekte der Interaktion mit dem digitalen Assistenten identifiziert, die einer vertieften Klärung bedürfen. Hervorgehoben wurde insbesondere die Möglichkeit von Missverständnissen, sollte der D-ATCO für eine Konfliktsituation keine Lösung finden, aber dennoch einen Lösungsvorschlag präsentieren. Vor diesem Hintergrund stellt sich weiterführend die Frage, welche Leistungsparameter eines Lfz generell zum Finden eines Lösungsvorschlags hinterlegt und berücksichtigt seien sollten. Auch wie der zugrunde gelegte Rahmen bspw. im Hinblick auf Steigrate, Flugzeugtyp, Beladungszustand und andere operationell relevante Leistungsparameter definiert wird. Zudem wurde angeregt, die Symbolik des Systems so zu differenzieren, dass klar erkennbar ist, ob ein Vorschlag physikalisch möglich ist oder auch rechtlich umgesetzt werden darf. Ergänzend wurde eine differenzierte Anzeige in Abhängigkeit der Art der Konfliktsituation genannt, sodass unterschiedliche Szenarien visuell unterschieden werden können. Abschließend wurde nochmals die Bedeutung einer möglichst klick-armen Interaktion betont, da im Konfliktfall jede Sekunde zählt und die Luftfahrzeuge kontinuierlich und aufmerksam beobachtet werden müssen.

Ranking Die in Tabelle 4.1 dargestellten Häufigkeiten geben Aufschluss darüber, wie die drei Entwurfsvarianten der Situation 1 (Konflikt) von den Teilnehmenden relativ zueinander bewertet wurden.

	Variante 1	**Variante 2**	**Variante 3**
Platz 1	2	2	**4**
Platz 2	1	**4**	3
Platz 3	**5**	2	1

Tabelle 4.1: Ranking der Versionen in der Situation 1 - Konflikt

Variante 1 erhielt zwei Nennungen als beste Lösung (Platz 1), eine Nennung auf Platz 2 und wurde fünfmal auf Platz 3 eingeordnet. Variante 2 wurde ebenfalls zweimal auf Platz 1 gesetzt, deutlich häufiger auf Platz 2 (vier Nennungen) und zweimal auf Platz 3. Variante 3 weist mit vier Nennungen auf Platz 1 die meisten Bestbewertungen auf. Sie wurde dreimal auf Platz 2 und einmal auf Platz 3 eingestuft. Insgesamt ergibt die Verteilung der Rangplätze, dass Variante 3 von den Teilnehmenden überwiegend bevorzugt wurde, während Variante 1 vergleichsweise häufig auf dem letzten Rang eingeordnet wurde und Variante 2 überwiegend mittlere Bewertungen erhielt.

4.3.2 Situation 2 - Partieller Systemausfall

User Experience Questionnaire - Short Version (UEQ-S)

Auswertung des Fragebogens
Potentielle Probleme in der Ausführung oder im Betrieb:

Variante 1 In der vorliegenden Variante 1 trägt das System zwar durch eine gewisse Ordnung bei, ein vollständigeres Bild der Verkehrslage zu bekommen, weist zugleich aber Einschränkungen in der operativen Nutzbarkeit auf. Als problematisch wird die Darstellung der Konfliktpartner bewertet, da lediglich eine Zahl im Label der Radaranzeige als zu unauffällig und versteckt wahrgenommen wird.

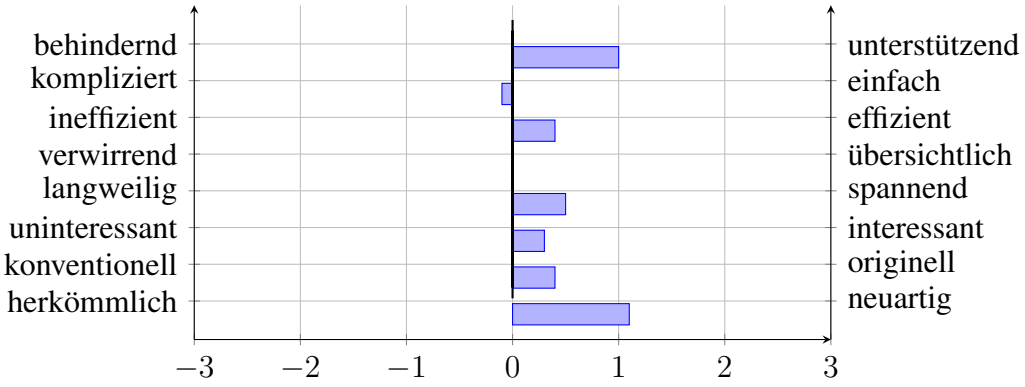

Abbildung 4.4: Mittelwert des UEQ-S Situation 2 - Version 1

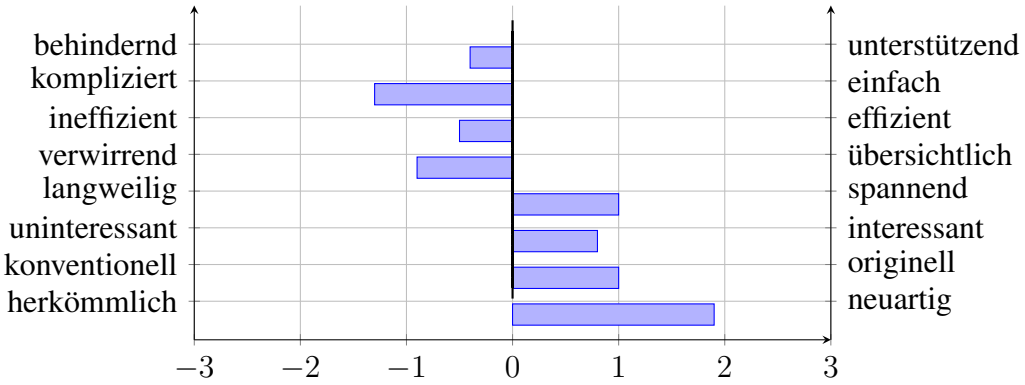

Abbildung 4.5: Mittelwert des UEQ-S Situation 2 - Version 2

Variante 2 In Variante 2 ergeben sich Probleme im Verständnis hinsichtlich der Aufgabenverteilung zwischen D-ATCO und ATCO. Für die Teilnehmenden ist nicht eindeutig erkennbar, welche Aufgaben vom digitalen Assistenten übernommen werden und an welcher Stelle der menschliche ATCO verantwortlich ist (n = 2, 28,6%). Zudem fehlt eine unterstützende Information darüber, warum eine bestimmte Höhenänderung vorgeschlagen wird. Dies macht die Empfehlung durch den D-ATCO eindeutiger.

Variante 3 Beim Betrachten der dritten Variante durch die Teilnehmenden wurde darauf hingewiesen, dass es einerseits vorteilhaft ist, den gewünschten Modus des D-ATCO individuell auszuwählen. Andererseits erweist sich die notwendige Auswahl durch das Anklicken jedes einzelnen Luftfahrzeugs als ineffizient.

Gesamtbetrachtung In der betrachteten Situation 2 wurde auf die folgenden potenziellen Probleme hingewiesen. Wenn gleichzeitig viele Luftfahrzeuge durch den partiellen Systemausfall betroffen sind, ist für jedes einzelne Luftfahrzeug ein unterschiedliches Handeln erforderlich. Die individuelle Übergabe jedes Luftfahrzeugs an den ATCO erweist sich in diesem Fall als besonders aufwändig, sodass über eine globale Akzeptanz aller Lfz durch den ATCO nachzudenken ist. Dies wird von einem Teilnehmenden als schneller und sicherer eingeschätzt, da so das Risiko verringert wird, ein einzelnes Luftfahrzeug zu übersehen. Zugleich kann aber auch die Anzahl der zu übergebenden Luftfahrzeuge für die Wahl der Übergabevariante ausschlaggebend sein. So ist bei einer größeren Anzahl von Luftfahrzeugen eher eine global wirkende

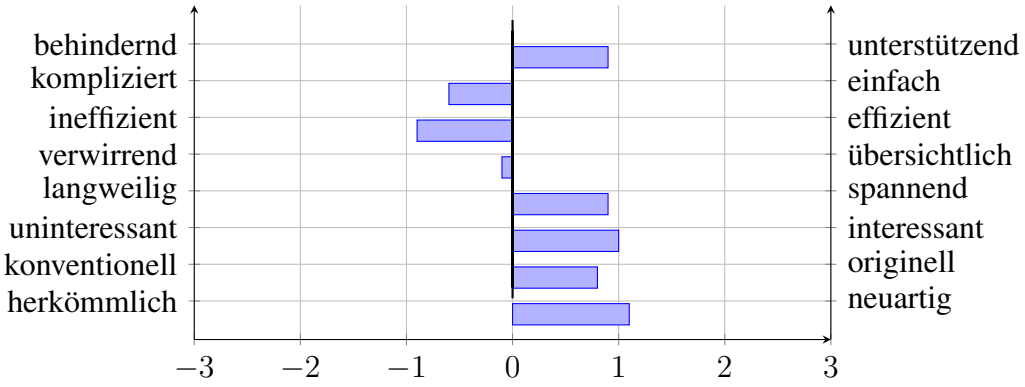

Abbildung 4.6: Mittelwert des UEQ-S Situation 2 - Version 3

Variante zu bevorzugen, während bei einer geringen, noch zu definierenden, Anzahl an Luftfahrzeugen eine individuellere Variante zweckmäßiger erscheint. Zusätzlich äußerten drei Teilnehmende Zweifel an der Zuverlässigkeit des Systems und dem Vertrauen in die verbleibenden Funktionen (n = 3, 37,5%), wenn bereits ein teilweiser Ausfall von Systemkomponenten das System schwächt.

Verbesserungsvorschläge:
Aus der Auswertung der Rückmeldungen ergeben sich zunächst mehrere Verbesserungsvorschläge für Variante 1. So wird empfohlen, die betreffenden Luftfahrzeuge im HI-DIRC Interface auch nach der Übergabe vom D-ATCO an den ATCO weiterhin markiert zu lassen. Die Markierung soll erst nach dem Quittieren durch den ATCO erlöschen. Darüber hinaus wird angeregt, den jeweiligen Konfliktpartner direkt im Radar-Label mit Callsign zu benennen, anstatt der Zahl des „Conflict Potential Rankings“. Zusätzlich sollte das Conflict Potential Ranking auch für Luftfahrzeuge genutzt werden, die nicht vom D-ATCO kontrolliert werden, um ein vollständiges Bild des Konfliktpotenzials im gesamten Kontrollsektor zu erhalten.

Übergreifend wird zudem eine Kombination der Varianten eins und zwei vorgeschlagen (n = 3, 42,9%). Hierin sollte ein einziger Klick sowohl die Auswahl des Unterstützungsmodus als auch die Redelegation auslösen. In diesem Zusammenhang wird weiter angeregt, die Zahl des Conflict Potential Rankings aus Variante 1 zur Anzeige des Konfliktpartners zu übernehmen, da es sich um eine ergänzende Information handelt. Schließlich wird eine konsistente Wortwahl empfohlen, etwa durch die einheitliche Verwendung der Begriffe „Transfer“ oder „Assume“ anstatt des Begriffs „Cancel“.

Geteilte Kontrolle eines Lfz durch D-ATCO und ATCO zur gleichen Zeit:
Die aufgeteilte Kontrolle eines Luftfahrzeugs zwischen ATCO und D-ATCO wird in den Antworten der Teilnehmenden ambivalent bewertet. Kritisch beurteilt wird eine getrennte Zuständigkeit für die laterale und vertikale Führung des Lfz. Sie wird teilweise auch als verwirrend wahrgenommen. Eine klare Trennung der Verantwortlichkeiten zwischen D-ATCO und ATCO wird daher bevorzugt. Dies wird auch damit begründet, dass eine solche Arbeitsweise einer flugzentrierten Flugverkehrskontrolle (Flight Centric Air Traffic Control) ähnelt, die für die Lotsen neu und ungewohnt ist. Des Weiteren sind die ATCOs für diese Arbeitsweise bislang nicht trainiert. Auf der positiven Seite wird betont, dass eine geteilte Kontrolle die Arbeitslast reduzieren kann, sofern die Zuständigkeitsbereiche eindeutig definiert sind. In diesem Fall kön-

nen sich Mensch und System sinnvoll ergänzen, vorausgesetzt, die Intentionen beider Parteien werden hinreichend synchronisiert. Unter diesen Rahmenbedingungen wird auch eine Ausgestaltung als Assistenzmodus als sinnvoll erachtet. Hier gibt es bereits operationelle Beispiele für vergleichbare Unterstützungssysteme, wie etwa im Kontext von Sequenzierungs- und Anflugmanagementsystemen (AMAN von der DFS).

Wichtige operationelle Anforderungen der betrachteten Situation:
Für die betrachtete Situation 2 lassen sich die folgenden zentralen operationellen Anforderungen identifizieren. Zunächst ist die Reihenfolge der Übergabe klar zu definieren. Dabei spielt die Aktualität der verwendeten Daten eine hervorgehobene Rolle. Es muss ersichtlich sein, von welchem Zeitpunkt die Informationen stammen, auf denen die Lösungsvorschläge zum Führen der Luftfahrzeuge basieren. (n = 2, 28,6%) Zudem wird gefordert, dass sämtliche vom D-ATCO bereitgestellten Informationen eindeutig sind und die verfügbaren Handlungsoptionen benannt werden. Die Aufteilung der Kontrolle sollte sich an aktuellen operationellen Verfahren orientieren und eine eindeutige Zuordnung der Lfz erfolgen. Dem ATCO muss stets klar dargestellt sein, was dieser vom D-ATCO an Funktionalität erwarten kann. Ergänzend sind eindeutige Hinweise auf Konflikte erforderlich.

Gruppendiskussion:
In der Gruppendiskussion wurde darauf hingewiesen, dass die Bewertung der Varianten durch die spezifische Ausgangssituation verzerrt sein könnte. In einigen Fällen ist eine letzte Aktion des ATCO nicht mehr erforderlich, wodurch bestimmte Versionen in diesem Setting den ATCO kognitiv weniger belasten als andere. Zudem wurde nachgefragt, warum die Schriftgestaltung von Version eins zu Version zwei geändert (verkürzt) wurde.

Ranking

Die in Tabelle 4.2 dargestellten Häufigkeiten zeigen, wie die drei Varianten der Situation 2 (Partieller Systemausfall) von den Teilnehmenden bewertet wurden.

	Variante 1	Variante 2	Variante 3
Platz 1	**4**	1	2
Platz 2	2	**3**	2
Platz 3	1	**3**	**3**

Tabelle 4.2: Ranking der Versionen in der Situation 2 - Partieller Systemausfall

Variante 1 erhielt vier Nennungen als beste Lösung (Platz 1), zweimal Platz 2 und einmal Platz 3. Variante 2 wurde einmal auf Platz 1 gesetzt, dreimal auf Platz 2 und dreimal auf Platz 3. Variante 3 wurde zweimal als beste Lösung bewertet, zweimal auf Platz 2 und dreimal auf Platz 3 eingeordnet. Insgesamt ergibt sich aus der Verteilung der Rangplätze, dass Variante 1 in dieser Situation am häufigsten bevorzugt wurde. Variante 2 und Variante 3 wurden weniger positiv bewertet.

4.3.3 Situation 3 - Pilot Request (Level Change)

User Experience Questionnaire - Short Version (UEQ-S)

Auswertung des Fragebogens

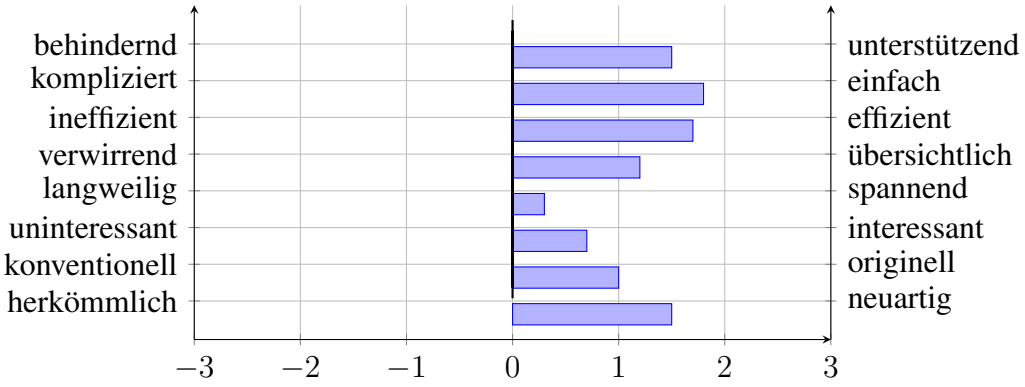

Abbildung 4.7: Mittelwert des UEQ-S Situation 3 - Version 1

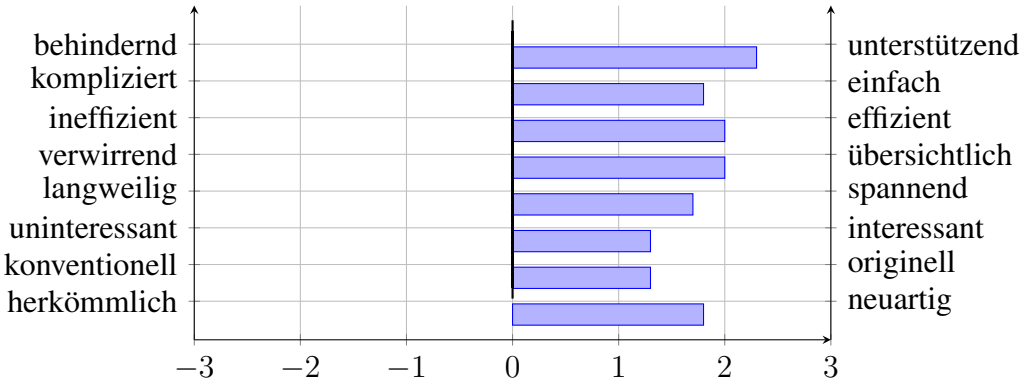

Abbildung 4.8: Mittelwert des UEQ-S Situation 3 - Version 2

Potentielle Probleme in der Ausführung oder im Betrieb:
Variante 1 In Bezug auf Variante 1 werden zwei potenzielle Probleme in der Ausführung und im Betrieb deutlich. Zum einen erscheint die Übergabe der Kontrolle an den ATCO bei sehr einfachen Anfragen nicht zwingend erforderlich, da diese Situationen möglicherweise effizienter direkt durch den D-ATCO bearbeitet werden können. Zum anderen besteht das Risiko, dass der ATCO nach der Bearbeitung des Requests vergisst, die Kontrolle über das Luftfahrzeug wieder an den D-ATCO zurückzugeben.

Variante 2 In Variante 2 werden die folgenden Punkte angemerkt. Lehnt der Pilot den vom D-ATCO vorgeschlagenen Alternativvorschlag ab, ist der ATCO gezwungen, die Kontrolle zu übernehmen und unmittelbar mit dem Piloten in Kontakt zu treten. Des Weiteren gehen beim Ablehnen eines Requests, welcher vom ATCO durch den D-ATCO übermittelt wird operationell relevante Informationen verloren. In der Praxis wird bei der Ablehnung von Freigaben häufig der Grund mitgeteilt, was zwar nicht zwingend erforderlich ist, aber als zusätzlicher Service zu einem verbesserten Situationsbewusstsein beiträgt. Hier sei das folgende Beispiel erläuternd angeführt, "FL 290 occupied, climb FL 300 instead.". Zuletzt weist ein Teilnehmer auf die möglich Gefahr eines Fehlklicks hin, welche sich aus einem sich bewegenden Menü am Radarbildschirm ergibt. Wenn auch die grundlegende Positionierung des Kontextmenüs in unmittelbarer Nähe zum Radarziel als vorteilhaft bewertet wird.

Gesamtbetrachtung Im Rahmen der Gesamtbetrachtung der Varianten eins und zwei sei er-

wähnt, dass es im Falle einer Abweichung von der angefragten Freigabe (Flughöhe, Wegpunkt. etc.) eine einfachere und schnellere Lösung ist, direkt mit den Piloten zu kommunizieren. Eine Antwort mit einem beliebigen, nicht explizit erfragten Wert würde zwangsweise zu unnötig hohem Kommunikationsbedarf führen.

Verbesserungsvorschläge:
Für die dritte Situation des Pilot Requests werden folgende Verbesserungsvorschläge angemerkt. Zum einen soll der entsprechende Flugstreifen nicht mehr unter den Requests im D-ATCO Interface angezeigt werden, sobald der jeweilige Request bearbeitet wurde. Darüber hinaus wird angeregt, Pilot Requests grundsätzlich wie andere Flugwegänderungen zu behandeln und nur dann an den ATCO zu übergeben, wenn die gewünschte Änderung außerhalb der operationellen Grenzen des D-ATCO liegt. In allen anderen Fällen soll das System die Freigabe selbstständig durchführen können. Ergänzend wird vorgeschlagen, das Kontextmenü weiterhin in räumlicher Nähe zum Radarziel anzuzeigen, es jedoch nicht gemeinsam mit diesem zu bewegen, um die Interaktion zu erleichtern und das Risiko von Fehlklicks zu reduzieren.

Wichtige operationelle Anforderungen der betrachteten Situation:
Als wichtige operationelle Anforderungen wurden die folgenden Kriterien identifiziert. Grundsätzlich ist sicherzustellen, dass durch die Annahme eines Requests kein neuer Konflikt verursacht wird. Dies sollte als Basiseigenschaft des Systems gelten, andernfalls ist auf einen potenziellen Konflikt explizit hinzuweisen. Darüber hinaus ist der Fall zu berücksichtigen, dass Piloten ein alternatives Vorgehen anregen. Dieses muss entsprechend geprüft und verarbeitet werden. Bei Standardausführungen und etablierten Verfahren sollte die Interaktion mit möglichst wenigen Klicks auskommen, um den Arbeitsaufwand gering zu halten. Es sind gleichzeitig stets Optionen anzubieten, die es dem ATCO ermöglichen, alternative Lösungen wählen zu können. Ergänzend wird gefordert, dem ATCO den Grund für einen Pilot Request anzugeben, um die Nachvollziehbarkeit der Anfrage zu erhöhen und das Situationsbewusstsein des Lotsen zu unterstützen.

Gruppendiskussion:
In der Gruppendiskussion wurde abschließend angeregt zu klären, welche Schritte zu unternehmen sind, sollte sich der ATCO verklickt haben und eine falsche Information an die Flugbesatzung geschickt haben.

Ranking Die in der Tabelle 4.3 dargestellten Häufigkeiten veranschaulichen, wie die Varianten der Situation 3 (Pilot Request) von den Teilnehmenden gerankt wurden. Variante 1 wurde einmal auf Platz 1 gesetzt und fünfmal auf Platz 2 eingeordnet. Variante 2 erhielt hingegen fünf Nennungen als beste Lösung (Platz 1) und wurde nur einmal auf Platz 2 bewertet.

	Variante 1	**Variante 2**
Platz 1	1	**5**
Platz 2	**5**	1

Tabelle 4.3: Ranking der Versionen in der Situation 3 - Pilot Request

Insgesamt zeigt die Verteilung der Rangplätze, dass Variante 2 in dieser Situation deutlich bevorzugt wurde, während Variante 1 überwiegend auf dem zweiten Rang erscheint und damit vergleichsweise weniger positiv beurteilt wurde.

4.3.4 Anmerkungen zur Methodik und prototypischen Darstellung

Methodik: In der vorliegenden Untersuchung merkten die Teilnehmenden an, dass sich die Vergleichbarkeit der Varianten als eingeschränkt erweist, da zwischen den einzelnen Varianten einer Ausgangssituation mehrere Variablen und Parameter gleichzeitig geändert wurden (n = 3, 37,5%). Dies erschwert ein eindeutiges Zurückführen beobachteter Effekte auf spezifische Gestaltungsentscheidungen und reduziert die Aussagekraft des durch den UEQ-S erhaltenen Feedbacks. Dieser für die Bewertung der Versionen und Situationen eingesetzte UEQ-S, hat sich jedoch nur als bedingt geeignet erwiesen, da er primär zu einem aggregierten Mittelwert pro Variante führt und einzelne Merkmale einer Variante nicht differenziert abbildet. Dadurch können Stärken und Schwächen einer Variante, die eine Entwurfsvariante kennzeichnen, nicht angemessen berücksichtigt und bewertet werden. Darüber hinaus baten die Teilnehmenden (n = 2, 25%) um mehr Hintergrundinformationen zu den dargestellten Szenarien sowie einer ausführlicheren Beschreibung der Randbedingungen.

Prototypische Darstellung: Für ein besseres Verständnis der Verkehrs- und Konfliktsituation wäre laut der Hälfte der Teilnehmenden (n = 4, 50,0%) eine erweiterte Darstellung des Radarschirms erforderlich gewesen, da nur so die betrachtete Gesamtsituation im Luftraum adäquat erfasst werden kann. Die begrenzte Darstellung beeinflusst den Bewertungsprozess, weil Informationen zu weiteren Luftverkehrsteilnehmern potenziell nicht oder nur unzureichend bewertet und berücksichtigt werden können. Die gewählte Darstellungsform eines einzelnen Verkehrsteilnehmers eignet sich aus diesem Grund bevorzugt für eine reine Darstellungs- oder Visualisierungsstudie, hat jedoch Schwächen in der Beurteilung eines Prozesses, der mehrere Luftverkehrsteilnehmer umfasst. Es wurde außerdem angemerkt, dass mit der relativ schnellen Abspielgeschwindigkeit der prototypischen Darstellung das Geschehen schwer zu überblicken ist.

4.3.5 Ergebnisse

Die Ergebnisse des UEQ-S sind für alle untersuchten Varianten in Tabelle 4.4 zusammengefasst. Sie listet die kombinierten Mittelwerte der einzelnen Parameter für die pragmatische-, hedonistische- und Gesamtqualität auf.

	Pragmatische Qualität	Hedonisstische Qualität	Gesamtqualität
Konflikt - Var. 1	1,00	-0,16	0,42
Konflikt - Var. 2	0,50	0,28	0,39
Konflikt - Var. 3	0,13	1,34	0,73
Part. Syst.ausfall - Var. 1	0,31	0,56	0,44
Part. Syst.ausfall - Var. 2	-0,75	1,16	0,20
Part. Syst.ausfall - Var. 3	-0,19	0.94	0,38
Request - Var. 1	1,54	0,88	1,21
Request - Var. 2	2,04	1,54	1,79

Tabelle 4.4: UEQ-S Pragmatische-, Hedonistische- und Gesamtqualität

Die pragmatische Qualität weist durchgehend niedrige Werte auf, mit Ausnahme von der Pilot Request – Variante 2 (2,04), welches jedoch bereits als seltener extremer Wert einzuordnen ist [34]. Die Konflikt-Varianten und die des partiellen Systemausfalls liegen im Bereich nahe der

Null, zwischen -0,19 und 0,50, was auf eine insgesamt neutrale Bewertung hindeutet. Die hedonistische Qualität zeigt eine heterogene Verteilung: Während Konflikt – Variante 1 mit -0,16 neutral bewertet wird, zeigen die Konflikt – Variante 3 mit 1,34 und die Partielle Systemausfall – Variante 2 mit 1,16 respektive gute Bewertungen. Die Pilot Request – Variante 2 erreicht mit 1,54 die beste Bewertung im Bereich der hedonistischen Qualität. Dieser kann als ein guter Wert gedeutet werden, da er knapp oberhalb der Schwelle von 1,5 liegt. In der Gesamtqualität präsentieren sich die einzelnen Varianten konsistenter. Die Pilot Request – Variante 2 erreicht mit 1,79 den Höchstwert und überschreitet damit die Schwelle für gute Bewertungen. Alle restlichen Varianten sind im neutralen bis positiven Bereich zwischen 0,20 und 0,73 einzuordnen. Insgesamt deuten die Ergebnisse des UEQ-S darauf hin, dass die Systemvarianten, mit Ausnahme von Pilot Request – Variante 2 eher neutral bewertet werden, wobei die hedonistische Dimension eine größere Variabilität aufweist als die pragmatische.

5 Empfehlungen für das Degradierungsverfahren

5.1 Arbeitsschritte

Ein Ausgangspunkt weiterer Bewertungen könnte die in Abbildung 5.1 gezeigte, verbesserte Darstellung des Radarlabels für den Konfliktfall sein.

Abbildung 5.1: Verbessertes Radarlabel Situation 1 - Systemgrenze (Konflikt)

Sie berücksichtigt das Feedback der Workshop- und Umfragenteilnehmenden, indem das Rufzeichen des Konfliktpartners durchgehend angezeigt wird, ein Countdown auf den Punkt der kürzesten Annäherung der Konfliktpartner herunterzählt und eine Konfliktlösung durch den D-ATCo angezeigt wird. Das linke Radarlabel zeigt den Zustand, in dem der D-ATCO die Konfliktkommunikation durchführen kann. Der grüne kasten um den Konflikt-Lösungsvorschlag signalisiert, dass das System eine Lösung gefunden hat, die rechtlich und unter Berücksichtigung der Leitungsparameter der Lfz möglich ist. Die Warnfarbe ändert sich mit erreichen des STCA auf Rot und beide Konfliktpartner werden direkt, ohne Klick an den ATCO übergeben. Wie es im rechten Radarlabel der Abbildung 5.1 zu sehen ist. Der ATCO muss in dem Fall durch einen Klick auf das Radarlabel eines der Konfliktpartner eine zusätzliche, gesteigerte Dringlichkeitswarnung quittieren.

Die Arbeitsschritte und Handlungsoptionen lassen sich für die Situation 1 - Systemgrenze Konflikt, nach Berücksichtigung des Feedbacks der Teilnehmenden, im folgenden Flussdiagramm der Abbildung 5.2 zusammenfassen. Hier wurde der von den Teilnehmenden am besten bewertete Prozess anhand des Feedbacks verbessert und ergänzt.

Zu dem vom D-ATCO angebotenen Lösungsvorschlag ist anzumerken, dass dieser eindeutig und frei von anderen Konflikten sein muss. Auf diesen, vom D-ATCO System angebotenen Lösungsvorschlag, müsste in einer zukünftigen Ausbildung der ATCOs gesondert eingegangen werden, um die Leistungsgrenzen des Systems zu berücksichtigen.

Der verbesserte Prozessablauf der Situation 2 - Partieller Systemausfall (Höhenmodul) ist eine Kombination mehrerer Eigenschaften der untersuchten Varianten zu Situation 2. Hier wird zusätzlich zu der ursprünglich Definierten Kernfunktion des Conflict Potential Rankings eine weitere Option gegeben, die verbliebenen, funktionsfähigen Module des D-ATCO Systems in einem Assistenzmodus zu nutzen. Dieser unterstützt den ATCO die vom D-ATCO übernommenen Lfz zu führen. Das Flussdiagramm dieses Prozesses ist in Abbildung 5.3 dargestellt.

Der Verbesserte Prozessablauf für Situation 3 - Pilot Request ist in Abbildung 5.4 dargestellt.

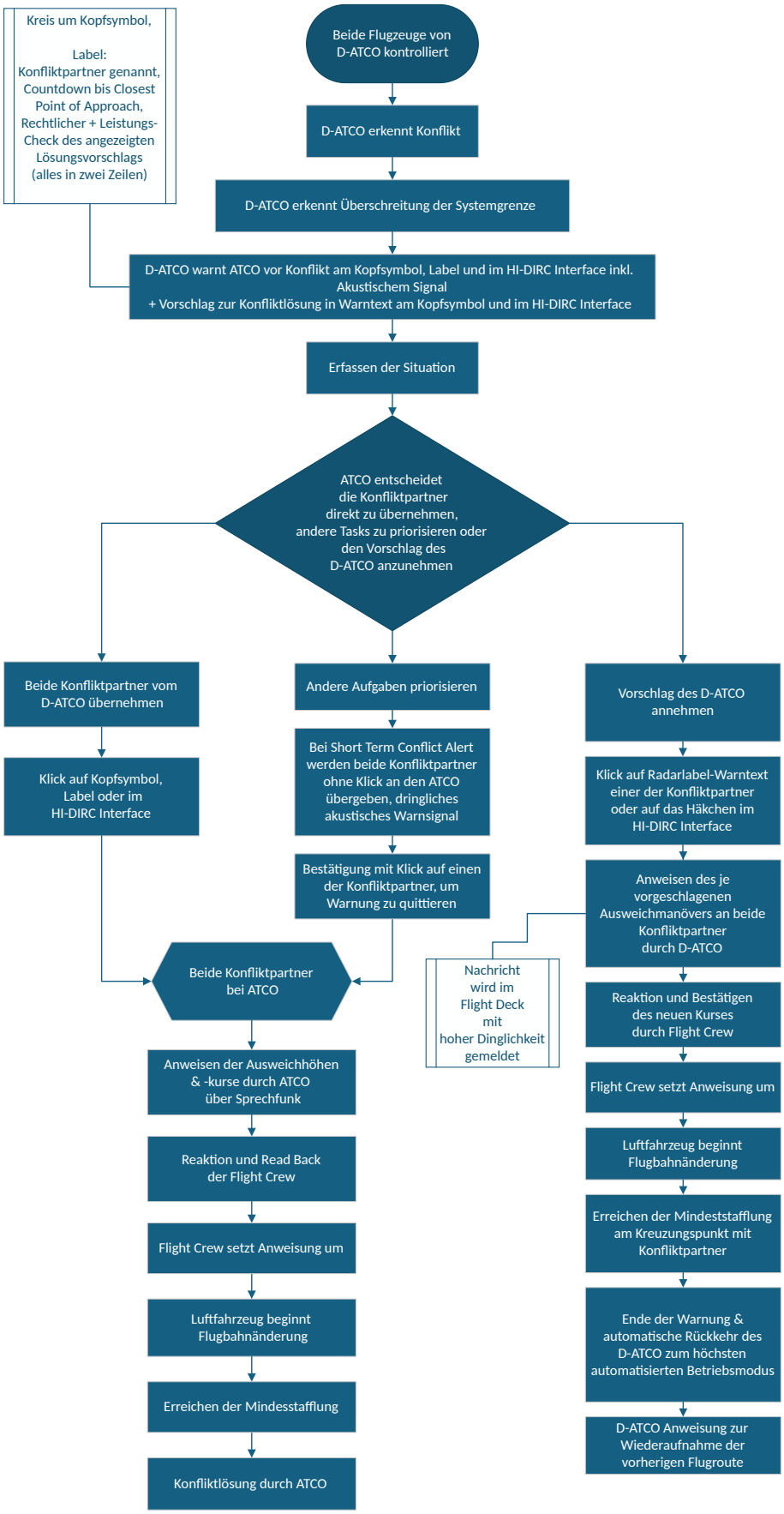

Abbildung 5.2: Flussdiagramm Situation 1 - Systemgrenze (Konflikt) - Verbesserter Prozess

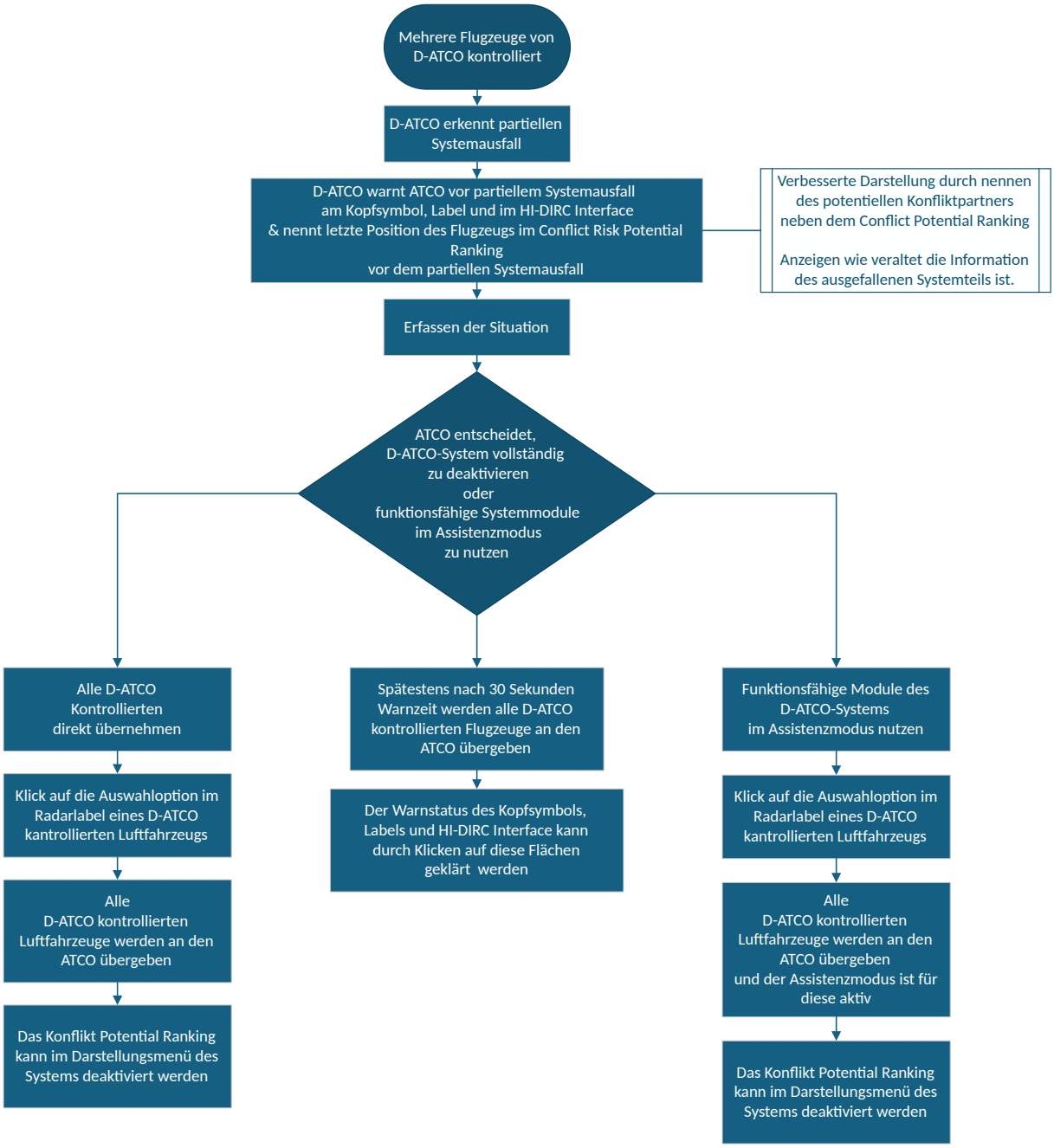

Abbildung 5.3: Flussdiagramm Situation 2 - Partieller Systemausfall (Höhenmodul) - Verbesserter Prozess

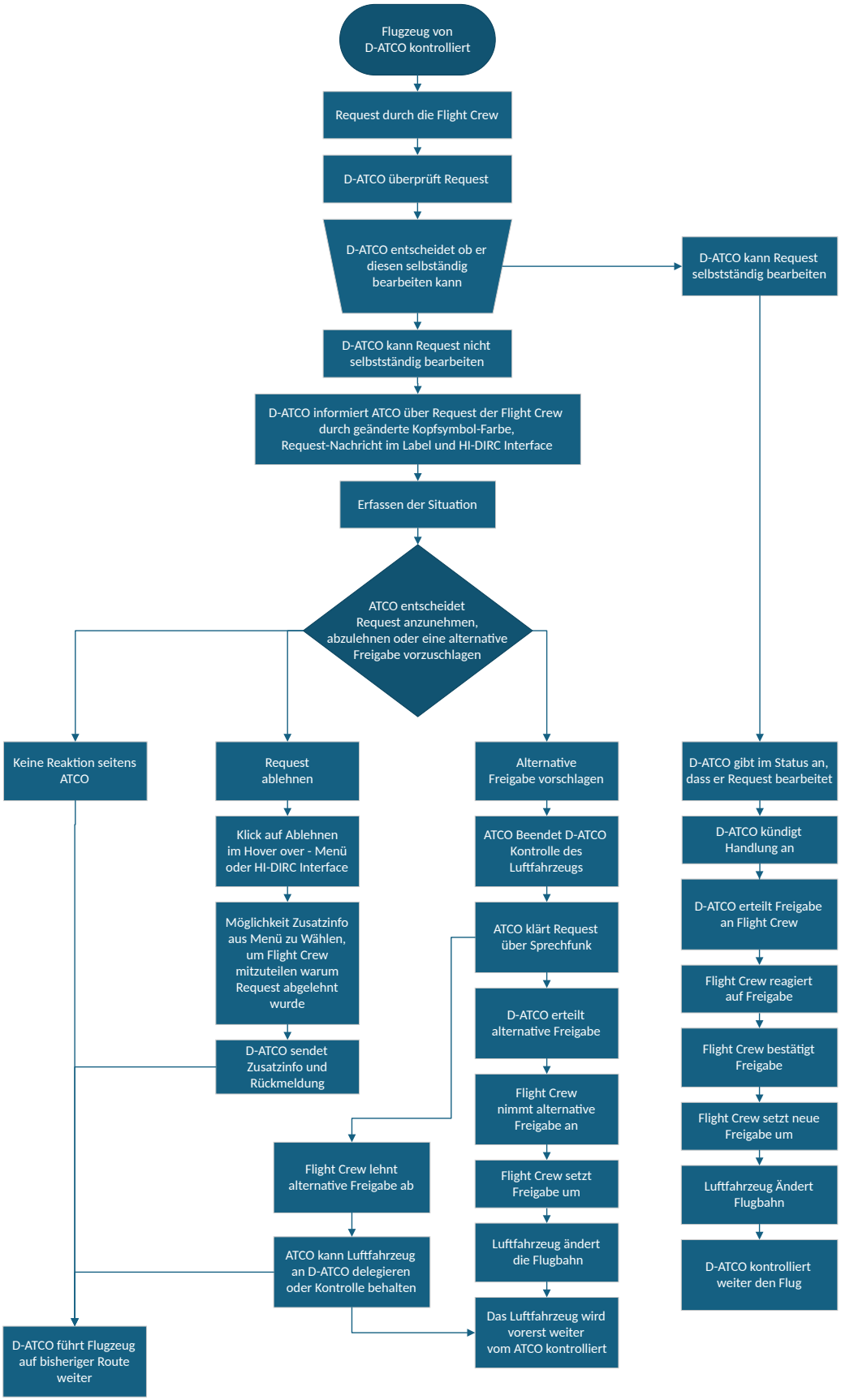

Abbildung 5.4: Flussdiagramm Situation 3 - Pilot Request (Level Change) - Verbesserter Prozess

5.2 Zeitlicher Vorlauf

Die Ermittlung des zeitlichen Vorlaufs kann nur anhand eines theoretischen Ansatzes abgeschätzt werden, da sich aus den Ergebnissen des Bewertungsbogens und des Feedbacks der Teilnehmenden keine genaueren Schlüsse bezüglich des Vorlaufs ableiten lassen.

Grundlagen Das Konzept der Sicherheitswarnungen (Safety Alerts) basiert laut [30] aus dem folgenden Algorithmus. Zunächst wird der Sicherheitsabstand $D_{\text{separation}}$ definiert, der den erforderlichen Mindestabstand zwischen zwei Luftfahrzeugen oder zwischen einem Luftfahrzeug und einem Hindernis beschreibt. Anschließend werden die für sicherheitskritische Situationen benötigte Zeit T_{critical} sowie der zeitliche Vorlauf (Look-Ahead-Zeit) $T_{\text{lookahead}}$ festgelegt. Hierbei gilt, das $T_{\text{lookahead}} \geq T_{\text{critical}}$ ist. Es wird so gewährleistet, dass sowohl die ATCOs als auch die Pilotinnen und Piloten im Falle einer kritischen Situation ausreichend Zeit zum Reagieren haben. Daraufhin werden die zukünftigen Positionen jedes Luftfahrzeugs vom aktuellen Zeitpunkt T_{current} bis zum Zeitpunkt $T_{\text{lookahead}}$ prognostiziert. Für jede dieser prognostizierten Positionen wird der Abstand $D_{\text{projected}}$ zwischen den Luftfahrzeugen beziehungsweise zwischen dem Luftfahrzeug und einem Hindernis berechnet. Eine Kollisionswarnung oder die der Mindestsicherheitshöhe [Minimum Safe Altitude Warning (MSAW)] wird ausgelöst, wenn für eine der prognostizierten Positionen $D_{\text{projected}} \leq D_{\text{separation}}$ gilt.

Generell muss der zeitliche Vorlauf nach [30] so bemessen sein, dass sämtliche nachfolgende Phasen und Handlungen durchgeführt werden können. Zuerst (1) muss der ATCO auf die Warnmeldung reagieren, damit er anschließend (2) die erforderlichen Informationen einholen und (3) eine Entscheidung hinsichtlich der geeigneten Maßnahmen treffen kann. Darauf folgt (4) die Kommunikation der Handlungsanweisungen an die Pilotinnen und Piloten. Darüber hinaus muss der zeitliche Vorlauf sicherstellen, dass die Pilotinnen und Piloten (5) die Anweisungen empfangen und bestätigen können. Sofern erforderlich, (6) setzen sie die Anweisung um und (7) das Lfz führt das notwendige Manöver rechtzeitig aus.

Werden die in Abschnitt 5.1 ausgewählten Arbeitsschritte den Phasen des zeitlichen Vorlaufs zugeordnet, lässt sich eine zeitliche Empfehlung für einen Beginn der Degradation der hochautomatisierten Systeme abschätzen. Hierzu wurden statistische Daten in der Tabelle 7.1 des Anhangs (Kap. 7) zusammengetragen, die den zuvor beschriebenen Phasen zugeordnet werden können.

Empfehlung des zeitlichen Vorlaufs Es wird der Konfliktfall, als zeitlich kritischste Situation gewählt. Hierfür werden aus Tabelle 7.1 die folgenden Zeiten für die Phasen der Redelegation ausgewählt und in Abbildung 5.5 dargestellt.

Die Reaktionszeit des ATCOs auf einen Alarm lässt sich nach [37] für alle Typen eines Konflikts mit einer durchschnittlichen Zeit von M = 3,6 s angeben. Für die reine Entscheidungszeit des ATCO stehen nur wenige quantitative Daten zur Verfügung. Auf Basis eines mathematischen Ansatzes schätzt [38] die Entscheidungszeit auf ca. 2–4 s. Nach [39] beträgt die Zeit im Mittel M = 10,58 s, die der ATCO für die Kommunikation mit den Piloten eines Lfz benötigt, das ein Manöver zum Ausweichen vor anderem Verkehr durchführen muss.

Der Maneuver Completion Detection Delay (MCDD) nach [40] umfasst die Reaktionszeit des Piloten auf die Anweisung des ATCO, die Zeit, die der Pilot zum Umsetzen der Anweisung benötigt sowie die Zeit, die das Luftfahrzeug zum Ausführen des angewiesenen Manövers benötigt. Der MCDD beginnt am Ende der Freigabe durch den ATCO und reicht bis zu dem

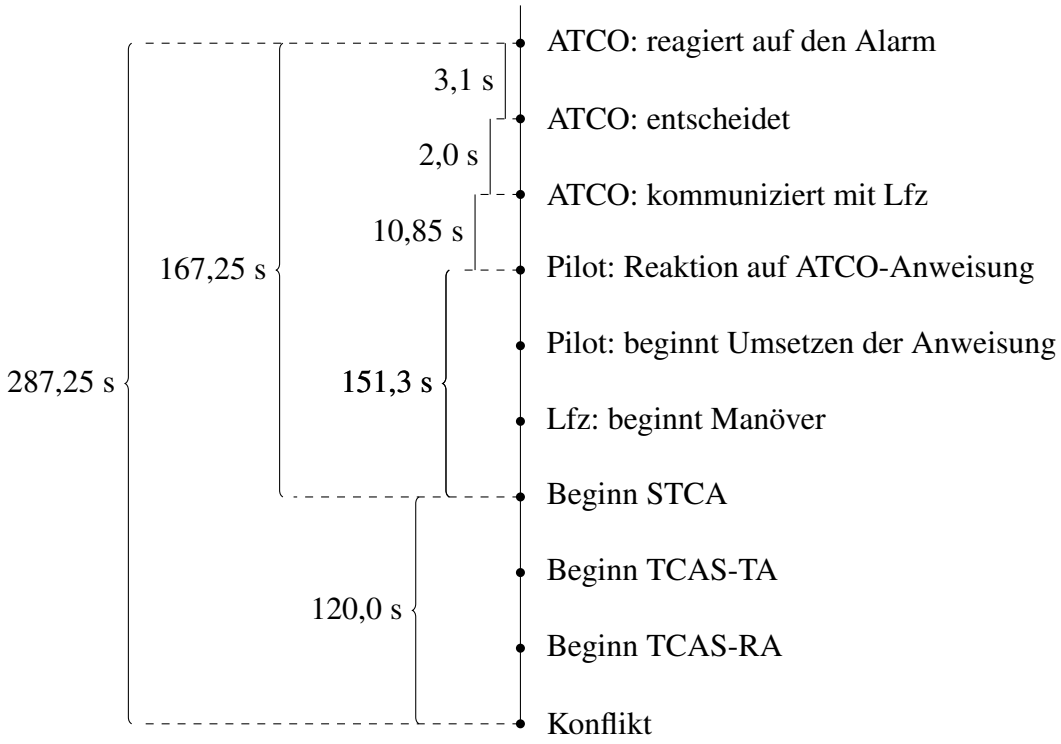

Abbildung 5.5: Empfohlener zeitlicher Vorlauf der Redelegation

Zeitpunkt, an dem das ausgeführte Manöver vollständig auf dem Radardisplay zu sehen war. Durch die Addition der genannten Zeiten ergibt sich für den Fall des Konflikts nach [40] eine Redelegationszeit von 167,25 s. Sie reicht vom Beginn des Alarms am Arbeitsplatz des ATCO bis zum vollendeten Ausweichmanöver.

Der Short Term Conflict Alert (STCA) setzt nach [41] ca. 90–120 s vor dem Konflikt ein und soll als Sicherheitsebene erhalten bleiben. Sie ist die Basis zum Abschätzen eines zeitlichen Vorlaufs des Redelegationsprozesses. Neben dem STCA steht zusätzlich das bordseitige Traffic Alert and Collision Avoidance System (TCAS) mit der Traffic Advisory (TA) und Resolution Advisory (RA) als letzter Schutz vor einer Kollision zur Verfügung. Unter der Annahme, dass die Redelegation und Ausführung des Ausweichmanövers im Konfliktfall vor Einsetzen des STCA abgeschlossen sein sollte, ergibt sich für die Redelegation ein zeitlicher Vorlauf von 287,25 s.

Annahmen Für den in Abbildung 5.5 dargestellten Ablauf werden die folgenden Annahmen getroffen. In der Abbildung werden die Zeiten von Sprechfunkverfahren verwendet. Dies geschieht auf der Grundlage, dass der Sprechfunk weiterhin das schnellste Verfahren der Flugsicherung zur Kommunikation mit einem Lfz ist. Eine Konfliktlösung mittels des D-ATCO und CPDLC kann folglich nur mit genügend Vorlaufzeit erfolgen. Sonst ist in jedem Fall das Sprechfunkverfahren anzuwenden. Eine Konfliktlösung mittels CPDLC, in der Geschwindigkeit eines Sprechfunkverfahrens benötigt eine schnellere Form des CPDCL als heute verwendet wird.

Einschränkungen Es sei darauf hingewiesen, dass sich die Zeiten bis zur geringsten Annäherung zweier Lfz unterscheiden können. Je nachdem wie sie relativ zueinander im Raum stehen und mit welcher Geschwindigkeit über Grund sie sich aufeinander zu bewegen. Weiterführend

kann die Leistung des Luftfahrzeugs einen Einfluss auf die Dauer haben, wie schnell ein Ausweichmanöver von dem Lfz durchgeführt werden kann. Die Forschungsergebnisse von [42] und [43] lassen außerdem darauf schließen, dass situationsbedingt die von den Piloten und ATCOs wahrgenommene Dringlichkeit einen Einfluss auf die Reaktionsgeschwindigkeit hat. [43] zählt als weitere Einflussfaktoren der Reaktionszeit die Faktoren Flughöhe, Tageszeit, initiales Manöver-Delta und Sekundärfaktoren auf. Ergänzt wird die Liste der Faktoren durch den Typ der vom ATCO erhaltenen Freigabe [40], die Flugphase [39] und die Arbeitsbelastung der Piloten [44].

Zuletzt sei erwähnt, dass es laut [45] Effekte auf die Dauer der Reaktionszeit gibt, wenn der Lösungsvorschlag eines KI-Assistenten dem Stil des Lösungsverhaltens des ATCO entsprach oder nicht. Die ATCOs reagierten schneller, wenn die Lösung ihren Vorstellungen entsprach und brauchten länger, wenn dies nicht der Fall gewesen ist.

6 Schlussbetrachtung

Die vorliegende Arbeit befasste sich mit der Gestaltung von Degradierungsprozessen in einer hochautomatisierten Flugsicherung und liefert erste Handlungsempfehlungen für den Übergang der automatisierten D-ATCO Kontrolle zurück zur konventionellen Kontrolle durch den Menschen. Die gewonnenen Handlungsempfehlungen müssen zukünftig weiter verfeinert und detaillierter in ihrer Umsetzung und Ausführung bewertet werden. Die Auswertung des Expertenworkshops zeigt, dass die Anzeige eines Countdowns für die Redelegation von den Expertinnen und Experten positiv bewertet wurde und als Unterstützung zur Handlungsplanung des ATCO beitragen könnte. Das Conflict Potential Ranking könnte sich nach weiterführenden Entwicklungsschritten zudem als eine Option erweisen, um die relevanten Konfliktpartner eines Luftfahrzeugs schneller zu identifizieren. Hier zeigte sich, dass im Konfliktfall das Rufzeichen des Konfliktpartners im Radarlabel genannt werden sollte. Weiter wurde deutlich, dass Konfliktpartner möglichst gleichzeitig vom D-ATCO an den ATCO übergeben werden sollten, um die notwendigen Handlungsschritte möglichst einfach und übersichtlich zu machen. Gleichzeitig wird hierdurch erfüllt, mit möglichst wenigen Klicks Handlungen auszuführen. Aus der Analyse des bisherigen Stands der Technik und dem Vergleich der entwickelten Konzeptprototypen ließen sich operationelle Anforderungen für den Einsatz von Redelegationsverfahren ableiten. Auf dieser Grundlage und den Ergebnissen Auswertung des Workshops wurden Empfehlungen formuliert, welcher zeitliche Vorlauf für eine Redelegation erforderlich ist und welche Arbeitsschritte in welcher Reihenfolge durchzuführen sind. Gleichzeitig unterliegt die Untersuchung mehreren Limitationen. Durch die breite Auswahl an betrachteten Situationen war der Nutzen der UEQ-S-Ergebnisse begrenzt, da die Instrumente nicht in der nötigen Tiefe auf einzelne Szenarien angewendet werden konnten. Zudem schränkten die zeitlichen Begrenzungen des Expertenworkshops und des Online-Fragebogens die Betrachtung auf exemplarisch gewählte Situationen ein. Zukünftige Arbeiten sollten sich daher stärker auf die detaillierte Ausgestaltung eines einzelnen Szenarios konzentrieren, um den Erkenntnisgewinn aus dem standardisierten UEQ-S zu erhöhen oder alternative Methoden zur Bewertung von Prozessentwürfen einsetzen.

Aus den Ergebnissen ergeben sich zahlreiche weiterführende Forschungsfragen und Entwicklungsperspektiven. So ist zu klären, wo genau die Grenzen eines Redelegationsprozesses liegen und wie man dessen Vorlaufzeit noch detaillierter bestimmen könnte. Daran knüpft die Frage an, auf welcher Basis ein solcher Lösungsvorschlag generiert wird, wie zulässige physikalische Parameter und rechtliche Anforderungen im System abgebildet werden könnten und dem ATCO anschließend transparent vermittelt werden. Weiter ist zu untersuchen, wie ein Prozessablauf anzupassen ist, wenn ein Luftfahrzeug nicht antwortet. Weiter können zusätzliche Szenarien wie der Kommunikationsverlust oder Luftnotfälle bei durch den D-ATCO geführten Lfz ausgestaltet werden. Ebenso stellt sich die Frage, wie mit der Sektorkapazität umzugehen ist, wenn das D-ATCO-System vollständig ausfällt und die zuvor durch den D-ATCO gewonnene Kapazität kompensiert werden muss. Daraus folgt, welches maximale Verkehrsaufkommen für den D-ATCO selbst als auch in der Kombination mit dem ATCO vertretbar ist. Weiterführend sollten die Ablaufschritte sowie die Darstellungsform der Redelegation iterativ durch die Befragung von ATCOs und weiteren Expertinnen und Experten aus der Flugsicherung verbessert werden. Der in dieser Arbeit vorgeschlagene zeitliche Vorlauf einer Redelegation ist bisher nur abgeschätzt und müsste anhand detaillierterer Prozessentwürfe validiert werden. Dabei wäre darauf einzugehen, ob die Vorlaufzeit einer Redelegation in Relation zur Sektorgröße und zur durchschnittlichen Verweildauer eines Luftfahrzeugs in einem Sektor des oberen Luftraums

umsetzbar ist. Ebenso könnte bewertet werden wie laufende Redelegationen bei Sektorübertritten zuverlässig fortgeführt werden könnten. Um die große Anzahl weiterführender Fragen abzuschließen, ist zu untersuchen, welche Verfahren greifen, wenn eine Redelegation aufgrund eines Konflikts im benachbarten Kontrollsektor initiiert wird. Schließlich lässt sich festhalten, dass der Bereich der Redelegationsprozesse in der hochautomatisierten Flugsicherung noch viel Raum für weiterführende Forschung bietet. Er ist ein Baustein für den sicheren und akzeptierten Einsatz zukünftig hochautomatisierter Systeme in der Flugsicherung.

7 Anhang

7.1 Flussdiagramme

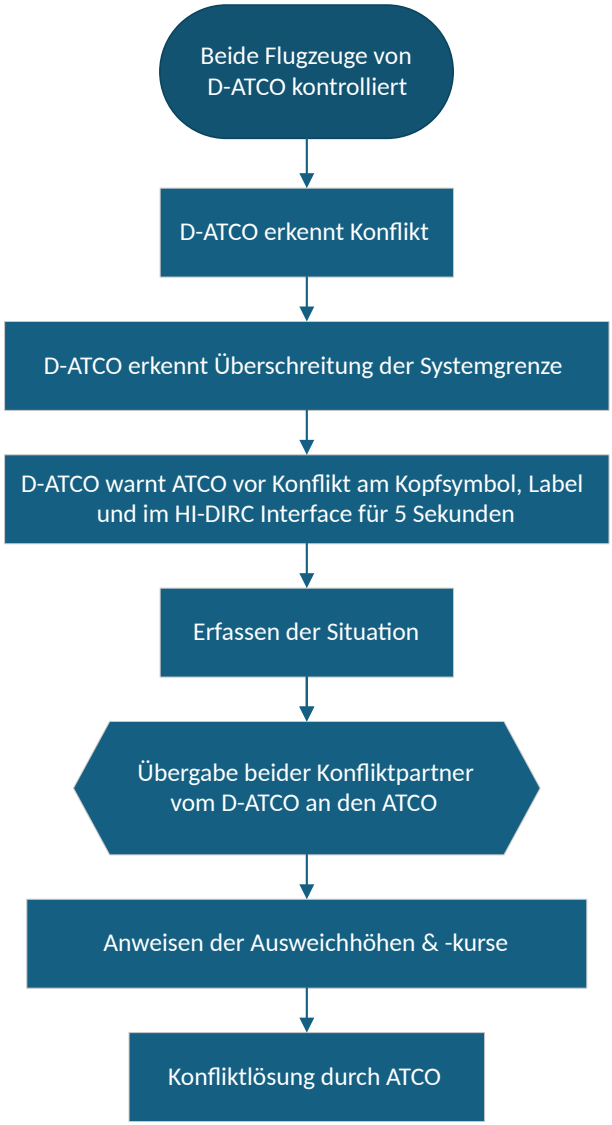

Abbildung 7.1: Flussdiagramm Situation 1 - Konflikt - Variante 1

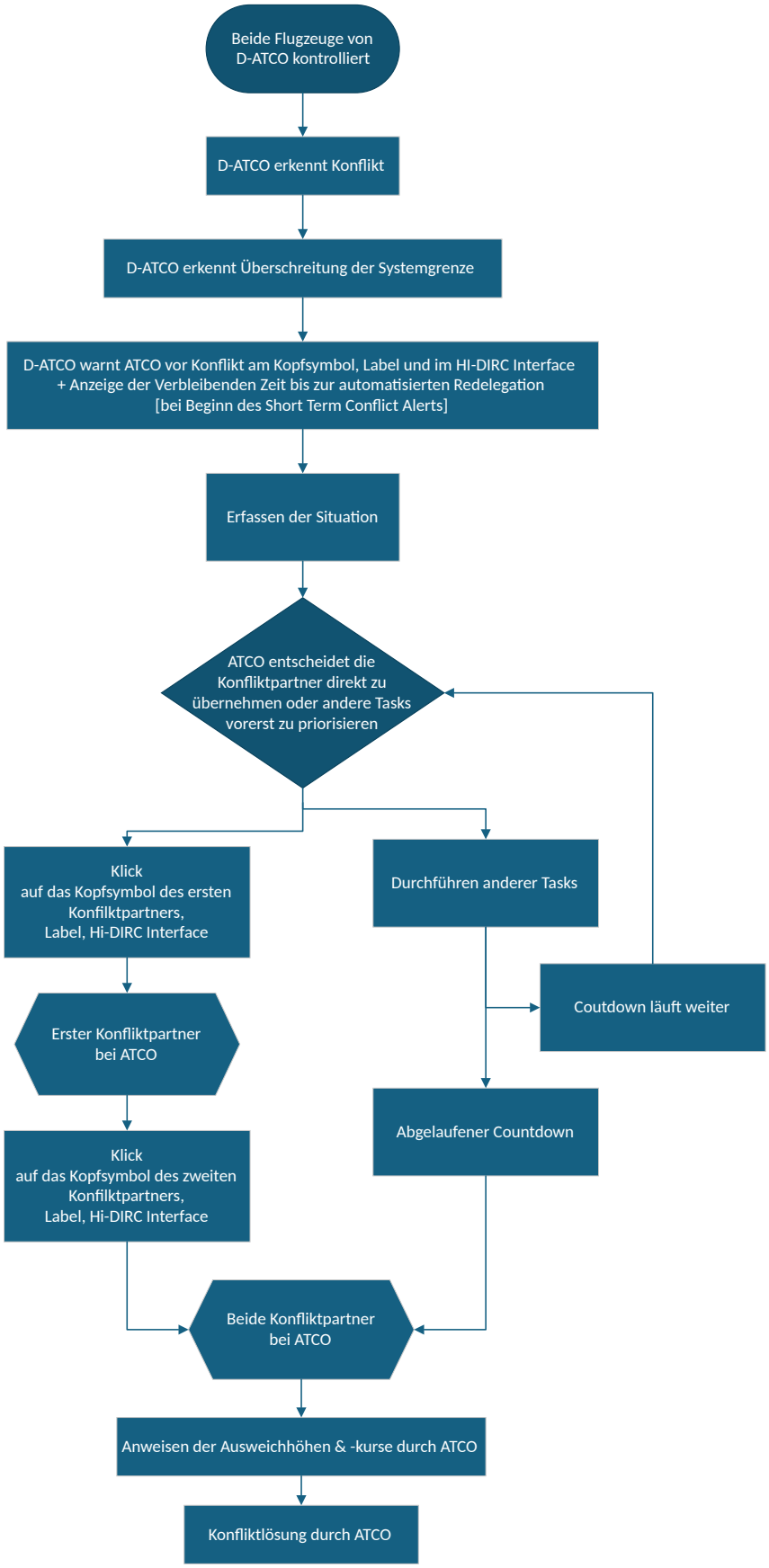

Abbildung 7.2: Flussdiagramm Situation 1 - Konflikt - Variante 2

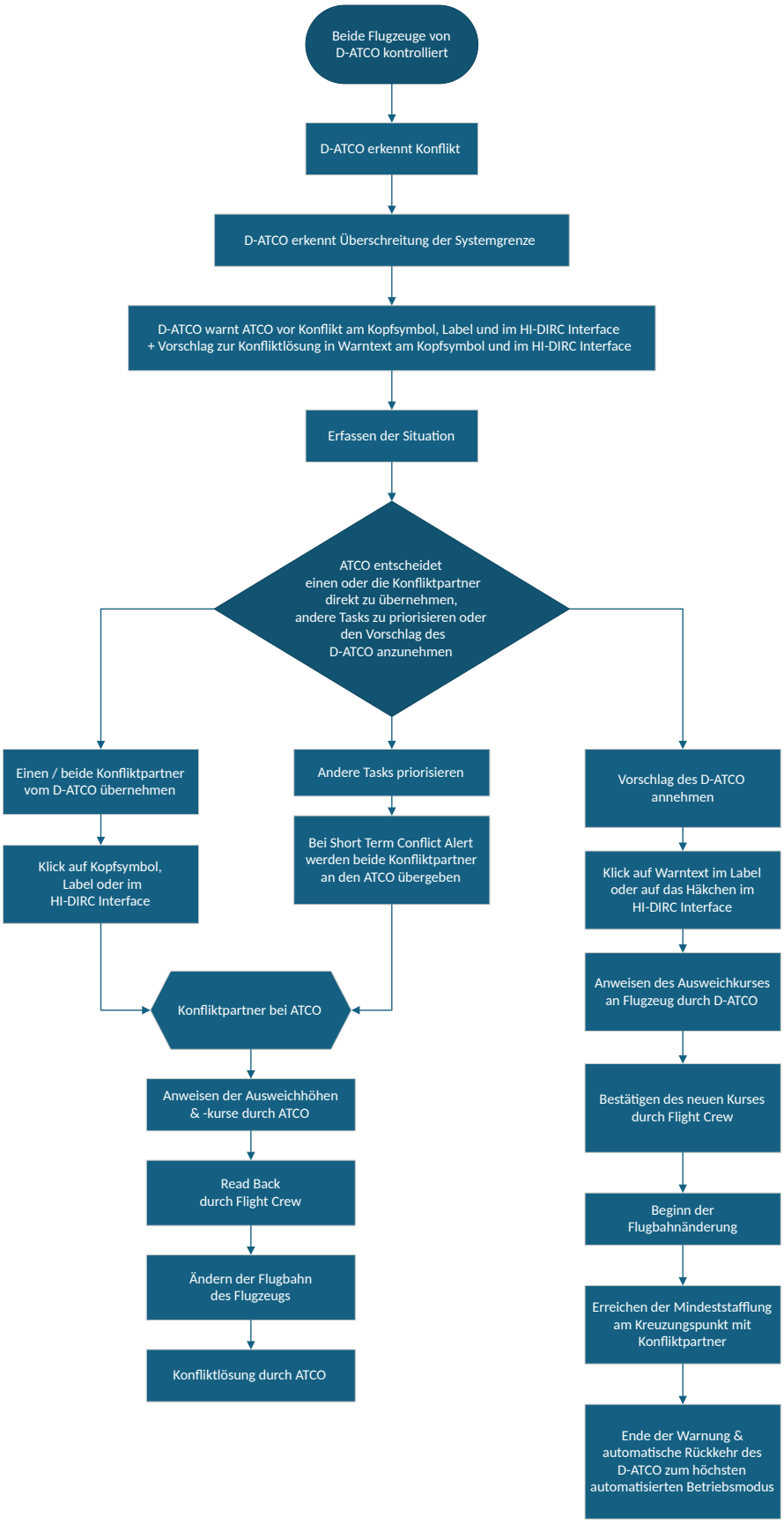

Abbildung 7.3: Flussdiagramm Situation 1 - Konflikt - Variante 3

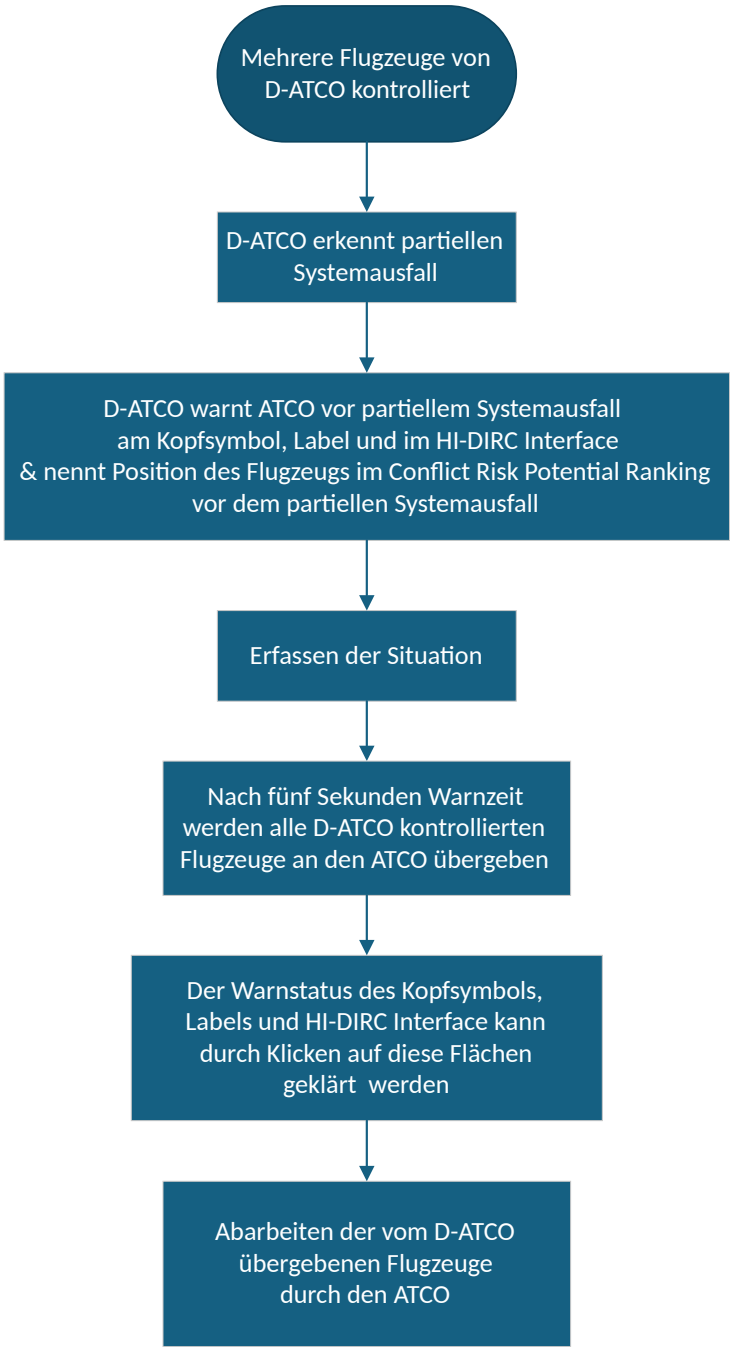

Abbildung 7.4: Flussdiagramm Situation 2 - Partieller Systemausfall - Variante 1

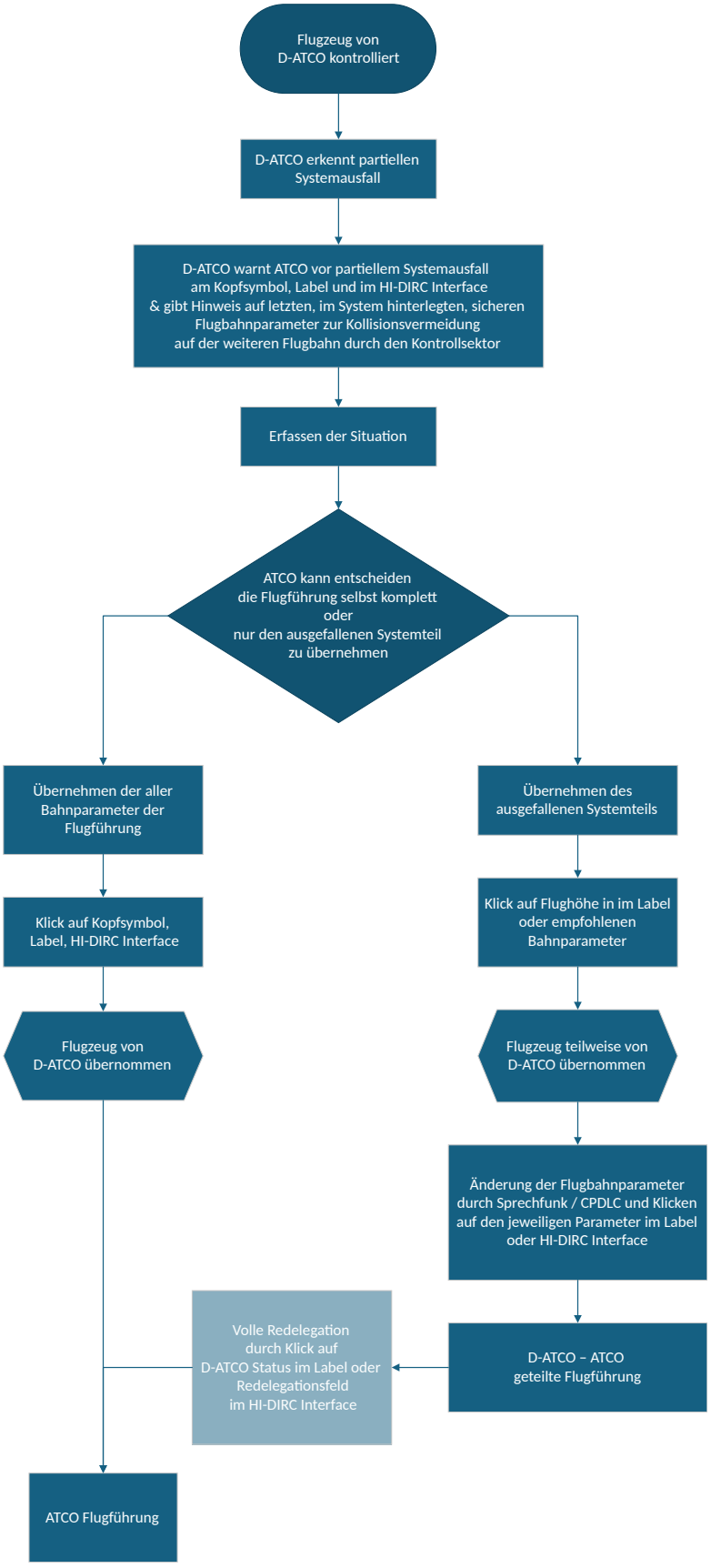

Abbildung 7.5: Flussdiagramm Situation 2 - Partieller Systemausfall - Variante 2

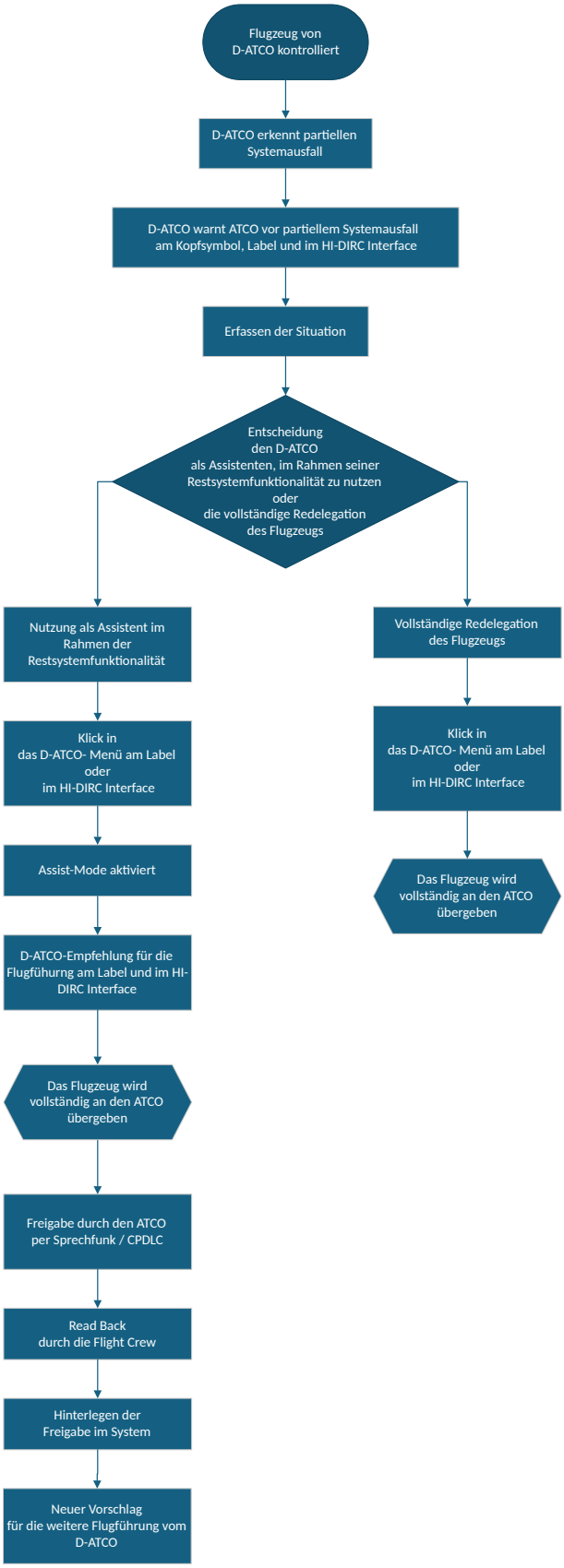

Abbildung 7.6: Flussdiagramm Situation 2 - Partieller Systemausfall - Variante 3

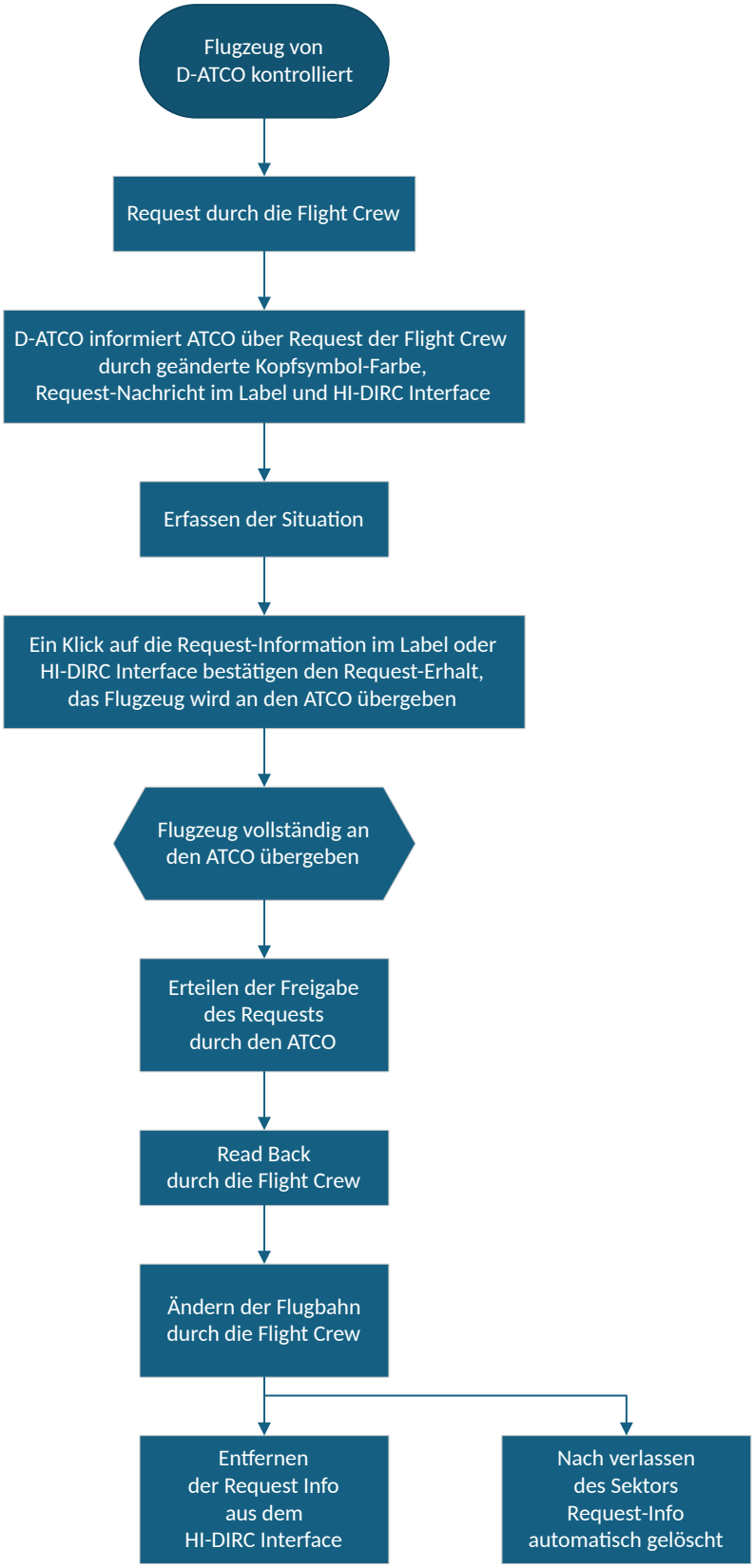

Abbildung 7.7: Flussdiagramm Situation 3 - Pilot Request - Variante 1

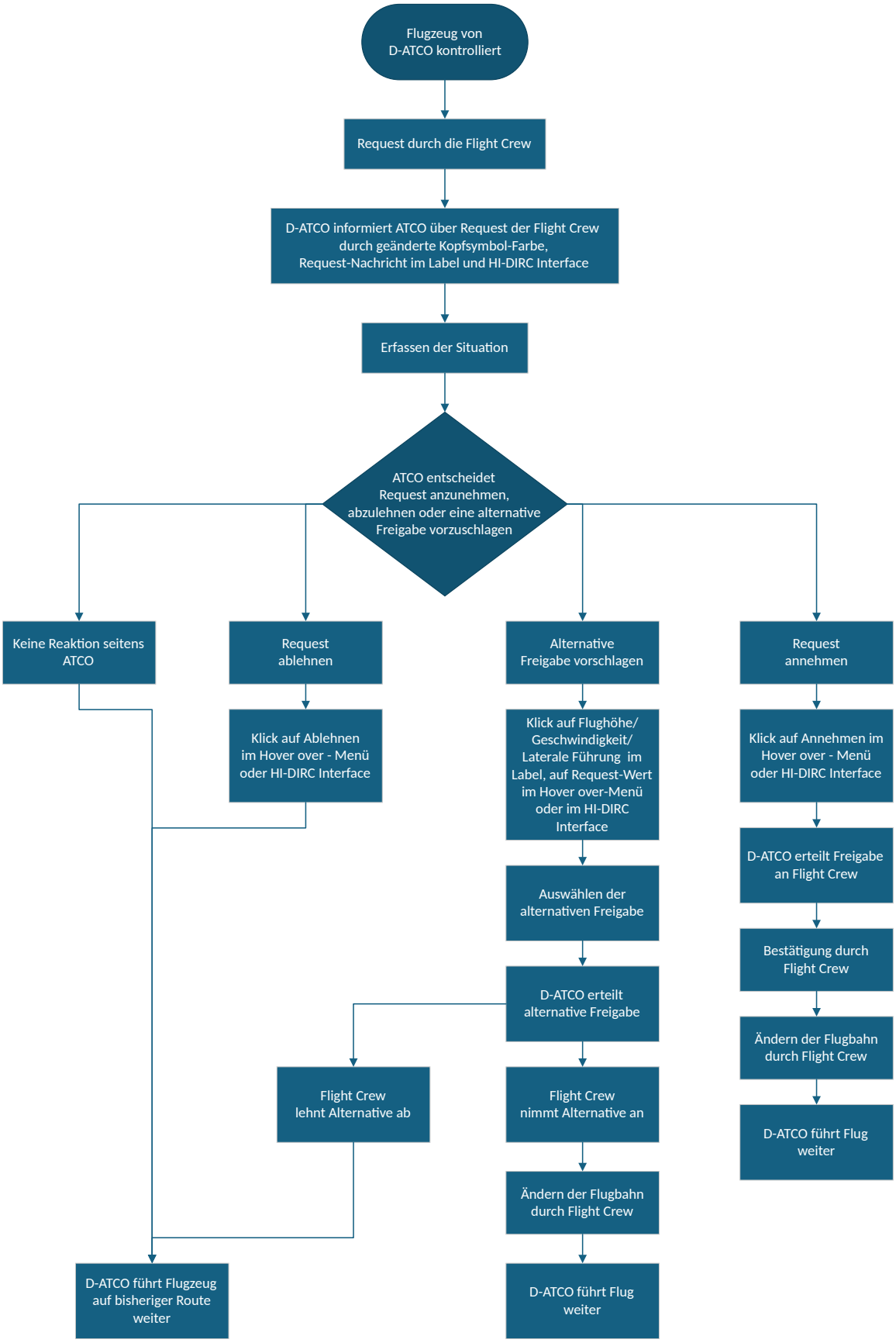

Abbildung 7.8: Flussdiagramm Situation 3 - Pilot Request - Variante 2

ATCO Reaktionszeit auf Alarm	Visual Escalation cue Noticing Times: [37]	Average for escalated Event: M = 8,3 s (SD: 10.2)	All types of Conflicts average: M = 3.1 s (SD: 3,0)	Highest Visual Escalation: M = 3,6 s (SD: 5,6)	Conflict alerts highest escalation level: M = 2,3 s (SD: 1,8)		
ATCO Entscheidungszeit	Estimated Average Decision and Communication delay (simple decision): 0,6 s [38]	Estimated Average Decision and Communication delay (complex decision): 2 - 4 s					
ATCO Kommunikationszeit zu Lfz	Single Communication event Average: M = 2,86 s (SD: 0,63) Single Communication Event for ATCO: M = 3,38 s (SD: 0,95) Single Communication Event for others: M = 2,41 s (SD: 0,60) [46]	Address: M = 15,1 s (SD: 5,4) Courtesy: M = 4,4 s (SD: 2,6) Advisory: M = 5,2 s (SD: 3,2)	Request: M = 2,6 s (SD: 2,3) Readback: M = 9,9 s (SD: 4,6) Instructional clearances: M = 3,8 s (SD: 2,1)	Frequency changes: M = 2,4 (SD:1,8)	All times for en-route: Maneuvers for traffic: M = 10,85 s (SD: 5,91) Turns not for traffic: M = 10,04 s (SD: 5,90) Traffic advisories: M = 10,96 s (SD: 7,26) [39]		
Pilot Reaktionszeit auf ATCO Anweisung	Pilot Readback Delay (End of ATC Clearance Heard on Frequency to Begin Pilot Readback) Approach: M = 0,67 s (SD: 0,326) Center: M = 0,93 s (SD: 0,949) Tower: M = 0,44 s (SD: 0,716) [40]	Maneuver Initiation Detection Delay (MIDD) (End of ATC Clearance Heard on frequency until. Maneuver Seen on ATC Display): Altitude: M = 16,69 s (SD: 11,23) Heading: M = 16,70 s (SD: 6,47) Speed: M = 25,47 s (SD: 16,35) All Commands: M = 20,7 s (SD: 13,60) [40]	Maneuver Completion Detection Delay (MCDD) (End of ATC Clearance to maneuver completion seen on ATC display): Altitude: M = 176,1 s (SD: 62,3) Heading: M = 69,3 s (SD: 43,5) Speed: M = 182,3 s (SD: 107,8) All Commands: M = 151,3 s (SD: 98,3) [40]	Initiation delay (time between the clearance being issued and the first pilot reaction): 20,5 s [43]		Avg. time to accept handoff: M = 25,91 s (SD: 27,58) Avg. time until initiated handoffs are accepted: M = 41,00 s (SD: 45,45) [46]	Estimated pilot response time in TMA with Pilot on alert: 0,33 s [38]
Pilot Umsetzzeit der Anweisung							
Lfz ausführen des angewiesenen Manövers	Reaction time of Aircraft to Pilot control input (DC-8, approach): approx. 1,56 s From glide path sink rate of -10 ft/s to steady rate of climb at 600 ft/min (DC-8): 10,35 s [38]	Time required for aircraft in landing configuration to level off and start a climb: approx. 10 - 12 s [47]					

Tabelle 7.1: Statistische Zeiten der Prozessschritte in der Flugsicherung

7.2 Digitale Medien

Der dieser Arbeit beiliegende USB-Stick enthält:

1. Die Flussdiagramme der Redelegationsprozesse:
    - 8 Flussdiagramme aus den Konzeptentwürfen
    - 3 verbesserte Flussdiagramme nach Auswerten des Workshops
2. Die prototypische Darstellung der Redelegationsprozesse:
    - 8 Videodateien mit den Konzeptentwürfen
3. Die Ergebnisse des Excel UEQ-S Auswertungsbogens:
    - 8 Exceldokumente mit der UEQ-S Auswertung der Konzeptentwürfe

Literatur

[1] EUROCONTROL, "Aviation long-term outlook: Flights and co forecast 2024–2050," EUROCONTROL, Tech. Rep., December 2024, abgerufen: 31. Januar 2026. [Online]. Available: https://www.eurocontrol.int/publication/eurocontrol-forecast-2024-2050

[2] EUROCONTROL Performance Review Commission, "Performance review report 2024," EUROCONTROL, Tech. Rep., March 2025, abgerufen: 31. Januar 2026. [Online]. Available: https://www.eurocontrol.int/sites/default/files/2025-03/eurocontrol-performance-review-report-2024.pdf

[3] R. Hunger and S. Theis, "Importance of delegation and redelegation in human-autonomy-teamed air traffic control," in *Human-Computer Interaction. Theoretical Approaches and Design Methods. HCII 2025*, ser. Communications in Computer and Information Science, C. Stephanidis *et al.*, Eds., vol. 2529. Cham: Springer Nature Switzerland, 2025, pp. 312–322. [Online]. Available: https://elib.dlr.de/214569/2/978-3-031-94171-9_30.pdf

[4] DWDS. (2026) Degradierung. Digitales Wörterbuch der deutschen Sprache (DWDS), Berlin-Brandenburgische Akademie der Wissenschaften. Zugriff am 30.01.2026. [Online]. Available: https://www.dwds.de/wb/Degradierung

[5] E. Hollnagel, C. Martinie, P. Palanque, A. Pasquini, M. Ragosta, E. Rigaud, and S. Silvagni, "System performances under automation degradation (SPAD)," in *Proceedings of the First SESAR Innovation Days*, Toulouse, France, Nov. 2011, pp. 1–9, SESAR Workpackage E project paper. [Online]. Available: https://www.sesarju.eu/sites/default/files/documents/sid/2011/SID%202011-SPAD.pdf

[6] International Civil Aviation Organization, "Air traffic services planning manual," ICAO, Montreal, Doc 9426, 1984, first (provisional) edition, Air Traffic Services Planning Manual (ATSPM).

[7] DFS Deutsche Flugsicherung GmbH and EUROCONTROL. (2022) MAKAN agreement: Harmonisation of air navigation services in the upper airspace of Belgium, Germany, Luxembourg and the Netherlands. DFS Deutsche Flugsicherung GmbH. Press release. [Online]. Available: https://www.dfs.de/homepage/en/media/press/2022/17-11-2022-makan-vereinbarung/

[8] Aviation Week Network. (2023) Eurocontrol, germany expand free route airspace. Accessed: 31 Jan 2026. [Online]. Available: https://aviationweek.com/air-transport/safety-ops-regulation/eurocontrol-germany-expand-free-route-airspace

[9] DFS Aviation Services GmbH. (2024) Dfs center suite. Accessed: 31 Jan 2026. [Online]. Available: https://dfs-as.aero/en/portfolio/dfs-center-suite/

[10] NEC Corporation. (2024) Arts — automated radar terminal system. Accessed: 31 Jan 2026. [Online]. Available: https://www.nec.com/en/global/solutions/cns-atm/atc/arts.html

[11] DFS Deutsche Flugsicherung GmbH. (2026) Aip germany (ifr), enr 3.4 – basic ifp. Accessed: 31 Jan 2026. [Online]. Available: https://aip.dfs.de/BasicIFR/2026JAN27/chapter/e3a6579fc25b6a625607f9cee4f2e635.html

[12] H. Mensen, *Moderne Flugsicherung: Organisation, Verfahren, Technik*, 4th ed., ser. VDI-Buch. Berlin, Heidelberg: Springer, 2014.

[13] International Civil Aviation Organization, "Procedures for air navigation services – air traffic management," ICAO, Montreal, Doc 4444, 2016.

[14] Deutsches Zentrum für Luft- und Raumfahrt (DLR). (2025) LOKI - Kollaboration von Luftfahrt-OperateurInnen und KI-Systemen. Abgerufen am 30.01.2026. [Online]. Available: https://www.dlr.de/de/me/forschung-und-transfer/projekte/loki

[15] L. Tyburzy, M. Jameel, R. Hunger, and J. Böhm, "Empowering human-ai collaboration in air traffic control through smart interaction design," in *43rd AIAA/IEEE Digital Avionics Systems Conference (DASC 2024)*. IEEE, 2024. [Online]. Available: https://ieeexplore.ieee.org/document/10749379

[16] EUROCONTROL Maastricht Upper Area Control Centre, "Argos – digital controller at MUAC," EUROCONTROL, Maastricht, Netherlands, Factsheet, 2023, factsheet, February 2023.

[17] L. Save, P. Tomasello, B. Feuerberg, M. Morel, J.-P. Pinheiro, G. Paniccia, and et al., "Guidance Material for HP Automation Support (Condensed Version)," SESAR Joint Undertaking, Brussels, Tech. Rep. Project 16.05.01, Deliverable D04, 2013, edition 00.01.00, Identification and Integration of Automation Related Good Practices. [Online]. Available: https://ec.europa.eu/research/participants/data/ref/h2020/other/guides_for_applicants/h2020-sesar-er4-26-2019_d04_condensed_16.05.01_en.pdf

[18] EUROCONTROL, "Degraded Modes Safety for Operational Engineering," European Organisation for the Safety of Air Navigation (EUROCONTROL), Brussels, Tech. Rep., Oct. 2009. [Online]. Available: https://skybrary.aero/sites/default/files/bookshelf/1055.pdf

[19] SKYbrary Aviation Safety. (2022) Flight control laws. Accessed: 31 Jan 2026. [Online]. Available: https://skybrary.aero/articles/flight-control-laws

[20] ——. (2022) Electronic centralized aircraft monitor (ecam). Accessed: 31 Jan 2026. [Online]. Available: https://skybrary.aero/articles/electronic-centralized-aircraft-monitor-ecam

[21] Agile Business Consortium. (2022) Moscow prioritisation. Letzter Zugriff: 25.01.2026. [Online]. Available: https://www.agilebusiness.org/dsdm-project-framework/moscow-prioririsation.html

[22] International Civil Aviation Organization, *Manual on Air Traffic Controller Competency-based Training and Assessment. Volume I — Air Traffic Control (ATC)*, 2nd ed., ser. Doc 10056. Montréal, Canada: ICAO, 2022, electronic version: ISBN 978-92-9265-905-9. [Online]. Available: https://news.ncac.mn/uploads/bookSubject/2022-11/6364baa7534f9.pdf

[23] A. Hodgson, C. E. Siemieniuch, and E.-M. Hubbard, "Culture and the safety of complex automated sociotechnical systems," *IEEE Transactions on Human-Machine Systems*, vol. 43, no. 6, pp. 608–620, November 2013. [Online]. Available: https://ieeexplore.ieee.org/document/6650057

[24] C. E. Billings and B. H. Kantowitz, Eds., *Aviation Automation: The Search for a Human-centered Approach*. Boca Raton, FL: CRC Press, 2018.

[25] L. Thomas, "Pilot workload under non-normalevent resolution: Assessment of levels of automation and a voice interface," *Proc. 55th Annu. Meet. Human Factors Ergonom. Soc.*, pp. 11–15, 2011.

[26] G. Klein, D. D. Woods, J. M. Bradshaw, R. R. Hoffman, and P. J. Feltovich, "Ten challenges for making automation a team player in joint human-agent activity," *IEEE Intelligent Systems*, vol. 20, no. 6, pp. 91–95, November 2005.

[27] J. Kjær-Hansen, "Human factors in the development of air traffic management systems," EUROCONTROL, European Air Traffic Control Harmonisation and Integration Programme (EATCHIP), Tech. Rep. HUM.ET1.ST13.4000-REP-01, March 1998. [Online]. Available: https://skybrary.aero/sites/default/files/bookshelf/5461.pdf

[28] C. Karat, R. Campbell, and T. Fiegel, "Comparison of empirical testing and walkthrough methods in user interface evaluation," in *Proceedings of the SIGCHI Conference on Human Factors in Computing Systems (CHI '92)*. New York, NY, USA: ACM, 1992, pp. 397–404.

[29] S. Huber, J. Gramlich, S. Pauli, S. Mundschenk, E. Haugg, and T. Grundgeiger, "Toward user experience in atc: Exploring novel interface concepts for air traffic control," *Interacting with Computers*, vol. 34, no. 2, pp. 43–59, March 2022. [Online]. Available: https://academic.oup.com/iwc/article/34/2/43/6758495

[30] K. Allendoerfer, F. Friedman-Berg, and S. Pai, "Human factors analysis of safety alerts in air traffic control," Federal Aviation Administration, William J. Hughes Technical Center, Atlantic City, New Jersey, Tech. Rep. DOT/FAA/TC-07/22, November 2007. [Online]. Available: https://rosap.ntl.bts.gov/view/dot/71701/dot_71701_DS1.pdf

[31] D. S. A. Ten Brink, R. E. Klomp, C. Borst, and M. M. van Paassen, "Flow-based air traffic control: Human-machine interface for steering a path-planning algorithm," in *Proceedings of the 2019 IEEE International Conference on Systems, Man and Cybernetics (SMC)*, Bari, Italy, October 2019, pp. 2919–2925. [Online]. Available: https://pure.tudelft.nl/ws/portalfiles/portal/68296804/TenBrink2019_Flow_Based_ATC.pdf

[32] T. B. Sheridan, *Telerobotics, Automation, and Human Supervisory Control*. Cambridge, MA: MIT Press, 1992.

[33] Laboratoire d'Informatique Interactive (LII), ENAC. (2010) Definition and validation of an aeronautical font. Accessed: 31 Jan 2026. [Online]. Available: https://lii.enac.fr/projects/definition-and-validation-of-an-aeronautical-font/

[34] M. Schrepp, *User Experience Questionnaire Handbook: All you need to know to apply the UEQ successfully in your projects*, September 2023. [Online]. Available: http://www.ueq-online.org

[35] R. Lange, *Benchmarking, Rankings und Ratings*. Wiesbaden: VS Verlag für Sozialwissenschaften, 2010, pp. 322–333. [Online]. Available: https://doi.org/10.1007/978-3-531-91993-5_22

[36] C. Züll, *Offene Fragen*. Mannheim: GESIS - Leibniz-institut für Sozialwissenschaften, 2015. [Online]. Available: http://dx.doi.org/10.15465/sdm-sg_002

[37] O. Ohneiser, H. Gürlük, M.-L. Jauer, Á. Szöllősi, and D. Balló, "Successful guidance of air traffic controller's attention," in *9th SESAR Innovation Days*, Budapest, Hungary, 2019.

[38] D. Graham, W. F. Clement, and L. G. Hofmann, "Manual control theory applied to air traffic," in *Proceedings of the Seventh Conference on Manual Control*. NASA, 1972.

[39] K. M. Cardosi and P. W. Boole, "Analysis of pilot response time to time-critical air traffic control calls," Federal Aviation Administration, Washington, DC, Tech. Rep. DOT/FAA/RD-91/20, 1991.

[40] M. Lutz, "Characterization of response times based on voice communications and natural language processing," in *AIAA AVIATION 2022 Forum*. Chicago, IL: American Institute of Aeronautics and Astronautics, 2022.

[41] R. Mallwitz and H. Fischer, "„acas broadcast"-monitor – stand der arbeiten," *TE im Fokus*, no. 2/07, pp. 2–8, 2007.

[42] M. C. Consiglio, S. R. Wilson, J. Sturdy, J. L. Murdoch, and D. J. Wing, "Human-in-the-loop simulation measures of pilot response delay in a self-separation concept of operations," in *Proceedings of the 27th International Congress of the Aeronautical Sciences (ICAS 2010)*, Nice, France, 2010.

[43] N. Wüstenbecker, J. Renkhoff, D. Zeppenfeld, M. Jameel, and S. Schier-Morgenthal, "Analysis and prediction of pilot response time to air traffic control clearances," *CEAS Aeronautical Journal*, 2025.

[44] A. R. Pritchett, "Testing and implementing cockpit alerting systems," *Reliability Engineering & System Safety*, vol. 75, no. 2, pp. 193–206, 2002.

[45] C. Westin, C. Borst, E.-J. van Kampen, T. M. M. Nunes, S. Boonsong, and B. Hilburn, "Personalized and transparent AI support for ATC conflict detection and resolution: an empirical study," in *Proceedings of the 12th SESAR Innovation Days*, Budapest, Hungary, 2022.

[46] C. A. Manning, S. H. Mills, C. M. Fox, E. M. Pfleiderer, and H. J. Mogilka, "Using air traffic control taskload measures and communication events to predict subjective workload," Federal Aviation Administration, Office of Aerospace Medicine, Washington, DC, Tech. Rep. DOT/FAA/AM-02/4, 2002.

[47] R. Rogers, "Controlled flight into terrain avoidance maneuver in fly-by-wire transports," Air Line Pilots Association, Airworthiness Performance Evaluation and Certification Committee, Washington, DC, Tech. Rep., March 1999.