

Verhindern von Pilotenfehlern durch ein zustandsadaptives Assistenzsystem

Nikolaus Theißing, Anja Liegel & Axel Schulte

Zusammenfassung

Bei der Missionsführung moderner Fluggeräte wird zunehmend von komplexer Automatisierung Gebrauch gemacht, die den Piloten entlastet und im Falle eines unbemannten Fluggeräts die Abhängigkeit von einer durchgehend bestehenden Datenverbindung reduziert. Bedient der Pilot seine Systeme jedoch fehlerhaft, verhält sich auch die Automation fehlerhaft und es können Gefährdungen auftreten.

Ein solches menschliches Fehlverhalten soll vermieden werden, indem dem Piloten ein Assistenzsystem zur Seite gestellt wird. Dieses soll ihn im Vier-Augen-Prinzip bei der Systembedienung unterstützen. Das Assistenzsystem beobachtet dabei sowohl den Piloten als auch die Umwelt. Im Falle kritischer Situationen unterstützt es den Piloten kooperativ durch Hinweise, Vorschläge, Hilfestellung und Aufgabenübernahme.

Mit unserer Forschung stellen wir ein Assistenzsystem vor, das Zeitpunkt und Art seiner Intervention adaptiv an den mentalen Zustand des Piloten anpasst. Dazu nimmt es eine modellbasierte Beobachtung und Interpretation des Pilotenverhaltens vor. Das Ziel dieser Vorgehensweise ist es, den Piloten effektiv zu unterstützen, ohne ihn zu belasten, zu unterfordern oder abzulenken. In Abhängigkeit seiner kognitiven (Arbeits-)Prozesse soll er stattdessen zum passenden Zeitpunkt, auf passende Weise und mit der passenden Information unterstützt werden.

Das Assistenzsystem wurde am Anwendungsfall unbemannter Aufklärungsflüge umgesetzt. Der Nutzen der Unterstützungsleistung konnte in einer Mensch-Maschine-Experimentalkampagne gezeigt werden.

1 Hochautomation als Quelle menschlicher Fehler

1.1 Automatisierung im Luftverkehr

Im bemannten wie im unbemannten Luftverkehr wird zunehmend von Hochautomation Gebrauch gemacht. Durch komplexe Automatisierung wurde die Effizienz im Luftverkehr so weit gesteigert, dass sich die Anzahl der täglich abgewickelten Flüge und die Anzahl der Flugstunden in den vergangenen 20 Jahren annähernd verdoppeln konnte (Boeing, 2014).

Durch Einsatz komplexer werdender Automation werden dem Menschen zunehmend Aufgaben aus der Hand genommen und an technische Systeme delegiert. Die Nutzung eines modernen Autopiloten / Flight Management Systems reduziert die Flugführungsaufgaben des Piloten etwa auf das Bedienen und Überwachen des automatisierten Systems.

Dieses Delegieren von Aufgaben an die Maschine führt dazu, dass der Mensch vermehrt Funktionen der überwachenden Kontrolle (*Supervisory Control*) wahrnimmt (Sheridan, 1997). Anstatt unmittelbar und kontinuierlich auf einen technischen Prozess einzuwirken, interagiert der Mensch dabei mit dem technischen System, das den Prozess automatisiert (vgl. Bild 1). Die Aufgaben, die dem Menschen dabei zufallen, unterteilt Sheridan in fünf Funktionen: Planung, Befehlerteilung an das System, Überwachung, Intervention bei Abweichungen und anschließendes Lernen aus Erfahrungen.

Der Anteil der überwachenden Funktion kann sich, je nach Anwendungsfall, über den größten Teil der Arbeitszeit erstrecken. Im fehlerfreien Fall ist die Überwachung zudem eine rein passive Aufgabe: Da die Automation nicht auf Interaktionen mit dem Menschen angewiesen ist, muss er keinen aktiven Beitrag zum automatisierten Prozess leisten. Auf einem Langstreckenflug kann es etwa möglich sein, dass die Crew über einen Zeitraum von mehreren Stunden hinweg nicht mit dem Autopiloten interagiert.

Dieses Delegationsverhältnis hat zwei Effekte auf den Bediener des Systems:

1. Die Arbeitsbelastung des Menschen nimmt ab.
2. Die Mittelbarkeit der Bedieneingaben steigt, d.h. es werden weniger kontinuierliche Bedieneingaben nötig.

Dem Menschen stehen dadurch mehr mentale Ressourcen für höhere kognitive Aufgaben (Planen, Treffen von Entscheidungen etc.) zur Verfügung, anstatt durch die Aufgabe der Flugführung gebunden zu sein. Außerdem ist die Automation durch die Mittelbarkeit der Bedieneingaben weniger anfällig gegenüber Unterbrechungen des Bedienvorgangs als der automatisierte Prozess selbst. Im Falle etwa eines Ausfalls des Piloten (*Incapacitation*) im bemannten Flug oder eines Abrisses der Datenverbindung im unbemannten Flug ist die Automation länger in der Lage, den Flug mit den bestehenden Befehlen korrekt fortzusetzen.

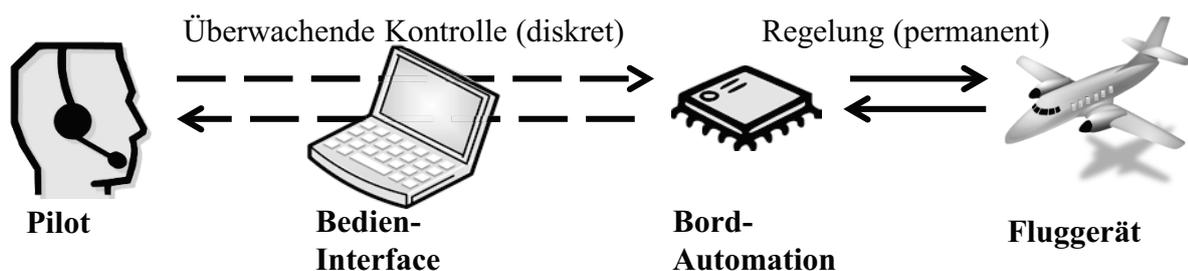


Bild 1: Die zwei Regelschleifen der diskreten überwachenden Kontrolle durch den Piloten und der permanenten Regelung durch die Automation

1.2 Durch Automation hervorgerufene menschliche Fehlhandlung

Die niedrige Beanspruchung, die die Aufgaben der überwachenden Kontrolle im Vergleich zu denen der manuellen Kontrolle verursachen, ist nicht mit einer niedrigen Kritikalität dieser Aufgaben gleichzusetzen. Die Aufgabe, einen Autopiloten zu bedienen, mag im Hinblick auf ihre Beanspruchung weniger ressourcenbelastend sein als die des manuellen Flugs. Ein Versagen in der Bedienung des Autopiloten kann jedoch ebenso zu einem Absturz führen wie ein Versagen bei der manuellen Flugsteuerung. Erschwerend kommt dabei hinzu, dass durch ungünstig gestaltete Automatisierung menschliches Fehlverhalten sogar begünstigt werden kann.

Dieses Bild des durch Automation im Delegationsverhältnis hervorgerufenen Fehlers (*automation-induced error*) äußert sich in einer Reihe von Effekten, die das Bedienen komplexer Automation auf den Menschen haben kann und die als Konsequenz Fehlverhalten nach sich ziehen (Wiener & Curry, 1980). Im Rahmen der Aufarbeitung von Flugunfällen wurde eine Reihe solcher Fehlerursachen identifiziert (Bainbridge, 1983; Sarter, Woods & Billings, 1997).

Automation kann durch die Arbeit, die dem Piloten abgenommen wird, bewirken, dass er für die zukünftige Systembedienung an Fähigkeiten einbüßt. Durch die Passivität der Überwachungsaufgabe können Ermüdung und Langeweile eintreten und einen Verlust an Aufmerksamkeit und Situationsbewusstsein nach sich ziehen. Da die Ursache das Entfernen des Menschen aus der Bedienschleife ist, spricht man hier von *Out-Of-The-Loop*-Effekten (Kaber & Endsley, 1997).

Gefahr durch diese Effekte besteht dann, wenn die Automation versagt, etwa durch technische Ursachen oder aufgrund einer unvorhergesehenen Situation, und der Pilot die Aufgabe manuell wahrnehmen muss. Sind die Fähigkeiten des Piloten nun durch *Out-Of-The-Loop*-Effekte beeinträchtigt, ist er ausgerechnet in dieser kritischen Situation zusätzlich gefordert, indem er sich in die Situation neu einarbeiten muss.

Im folgenden Abschnitt soll nun als Lösungsansatz ein Konzept der kooperativen Automation motiviert und definiert werden. Damit soll die Automation im Delegationsverhältnis so ergänzt werden, dass die positiven Effekte der Automatisierung bestehen bleiben, die negativen aber stark gedämpft werden.

2 Fehlerreduktion durch kooperative Systeme

2.1 Kooperation von Mensch und Maschine

Im Rahmen dieses Artikels wird ein Konzept der Automatisierung erarbeitet, das das Auftreten menschlicher Fehlhandlungen verhindern bzw. korrigieren soll. Der Ansatz, im Delegationsverhältnis möglichst viele Aufgaben zu automatisieren, leidet darunter, dass dieses Vorgehen wiederum neue Aufgaben (der überwachenden Kontrolle) für den Menschen hervorruft. Innerhalb dieser Aufgaben kann der Mensch wiederum aus den oben geschilderten Gründen Fehlhandlungen begehen.

Es soll stattdessen ein Konzept der Automation gefunden werden, das die Automatisierung im Delegationsverhältnis in einer Art und Weise erweitert, die das Auftreten von Fehlhandlungen verringert. Die bestehende Form der Automation soll dabei nicht ersetzt werden; vielmehr soll konventionelle Automation durch weitere Systeme ergänzt werden. In menschlichen Teams kommt in vergleichbaren Situationen das Konzept der funktionalen Redundanz zum Einsatz: Eine Menge von Aufgaben wird nicht von einem, sondern von mehreren Menschen erledigt. Die Aufgaben werden dabei nicht aufgeteilt, sondern gleichermaßen von mehreren Menschen verantwortlich erledigt.

Ein Beispiel ist das Vier-Augen-Prinzip bei Überwachungsaufgaben, wie es auch im Cockpit zum Einsatz kommt. Die Aufgabe der Systemüberwachung wird dabei von Kapitän und erstem Offizier gleichermaßen wahrgenommen. Die Kooperation im Rahmen der geteilten Aufgabe (Absprache, Diskussion, gemeinsame Entscheidungen) findet, auch bei bestehendem Hierarchiegefälle, auf Augenhöhe statt: Initiative und Verantwortung liegen bei beiden Teammitgliedern gleichermaßen.

Indem die Zusammenarbeit kooperativ stattfindet, existiert kein Delegationsverhältnis. Dies hat zur Folge, dass dem Kapitän keine zusätzlichen Aufgaben entstehen. Im Fall eines notwendigen Eingriffs fällt zwar die Aufgabe der Kommunikation und Koordination an. Die reine Kooperation des ersten Offiziers im Rahmen der Überwachungsaufgabe findet allerdings statt, ohne dass der Kapitän die Aufgaben des Delegationsverhältnisses wahrnehmen (also den ersten Offizier kommandieren und überwachen) muss.

2.2 Kooperation im Assistenzverhältnis

Die Rolle des kooperativen Partners soll nun zusätzlich von einem technischen System wahrgenommen werden. Der Mensch soll der primäre Bediener der unterliegenden, konventionellen Automation sein, der Entscheidungen in erster Linie alleine trifft. Dabei soll er allerdings so von einem kooperativen technischen System unterstützt werden, dass menschliche Fehlleistungen vermindert werden können.

Das kooperative System soll dafür zum einen akut vorliegende Fehler korrigieren und zum anderen bewirken, dass keine neuen Fehler entstehen. Die Korrektur vorliegender Fehlhandlungen erfordert einerseits, dass das System eingreift. Die Prävention zukünftiger Fehler erfordert andererseits, den Menschen in einem Zustand zu halten, der ihn wenig anfällig für *Out-Of-The-Loop*-Fehler macht. Dies ist gleichbedeutend mit einer Aufrechterhaltung seiner mentalen Ressourcen (Aufmerksamkeit, Situationsbewusstsein, Fähigkeiten), um die Grundlage für zukünftige Fehler zu nehmen. Dies wiederum erfordert, den Menschen einen möglichst großen Teil seiner Aufgaben selbst erledigen zu lassen. Das kooperative technische System hat also die Anforderung, den Menschen so viel wie nötig, aber so wenig wie möglich zu unterstützen.

Eine dafür hinreichende Form der Kooperation ist die im Assistenzverhältnis. Die Zusammenarbeit erfolgt darin (im Unterschied zum Delegationsverhältnis) auf kooperativer Ebene. Dabei gilt die Maßgabe, dass die Autorität, die „kritische Initiative“ (Jones & Jacobs, 2000), beim Menschen verbleibt.

Schulte (2012) stellt Anforderungen an das Verhalten eines solchen Assistenzsystems, das möglichst wenig eingreifen und seine Eingriffe nur nach Notwendigkeit Schritt für Schritt intensivieren soll: Das Assistenzsystem soll im Rahmen dieser Eskalation den Menschen zunächst ungestört arbeiten lassen. Sofern nötig, soll es die Aufmerksamkeit des Menschen auf die momentan dringlichste Aufgabe lenken. Kann der Mensch diese Aufgabe dann nicht allein erfüllen, soll das Assistenzsystem sie ihm so weit vereinfachen, dass er sie lösen kann. Ist er mit der Aufgabe dann dennoch überfordert, soll das Assistenzsystem sie schließlich übernehmen (Schulte, 2012).

Es wird damit das technische Pendant eines Assistenten beschrieben, der sich als stiller Beobachter charakterisiert, der nur im Bedarfsfall und auch dann nur möglichst wenig eingreift. Das Verhalten ist mit dem eines Beifahrers im Straßenverkehr zu vergleichen, der (Kommunikation auf privater Ebene ausgenommen) sich still verhält, sofern die Fahrt ereignislos bleibt. Entsteht eine Gefährdung, greift der Beifahrer möglicherweise ein. Der Eingriff kann dann, je nach Kritikalität, von einem einfachen Hinweis bis zu einem Griff ins Lenkrad eskalieren.

Dieses Assistenzverhältnis erfüllt die Doppelbedingung, dass sowohl Fehler verhindert als auch der Mensch möglichst viel „*im Loop*“ gehalten wird, was eine Reduktion von Effekten wie einem Einbruch des Situationsbewusstseins oder der Aufmerksamkeit bewirken soll.

Ein solcher Assistent soll dem menschlichen Piloten daher in Form eines technischen Assistenzsystems zur Seite gestellt werden. Das Assistenzsystem soll ihm in Form einer technischen Komponente assistieren, die in seine Bedienchnittstelle im Cockpit bzw. beim unbemannten Flug in der Bodenkontrollstation integriert ist.

Bild 2 stellt die Rolle des Assistenzsystems in der Arbeitssystem-Notation dar: Das Assistenzsystem ist dem Piloten im Rahmen der kooperativen Kontrolle auf der hierarchisch gleichen Ebene zur Seite gestellt. Pilot und Assistenzsystem üben gleichermaßen überwachende Kontrolle über das im Delegationsverhältnis unterstellte, automatisierte Fluggerät aus.

Vor der Problemstellung der technischen Implementierung stellt sich die Frage der Konzeption des Assistenzsystems im Hinblick auf Einsatzzweck und Verhalten. Kriterien wie die Grundforderungen nach Schulte geben auf einer deskriptiven Ebene an, wie das Verhalten eines Assistenzsystems im Einsatz charakterisiert werden kann.

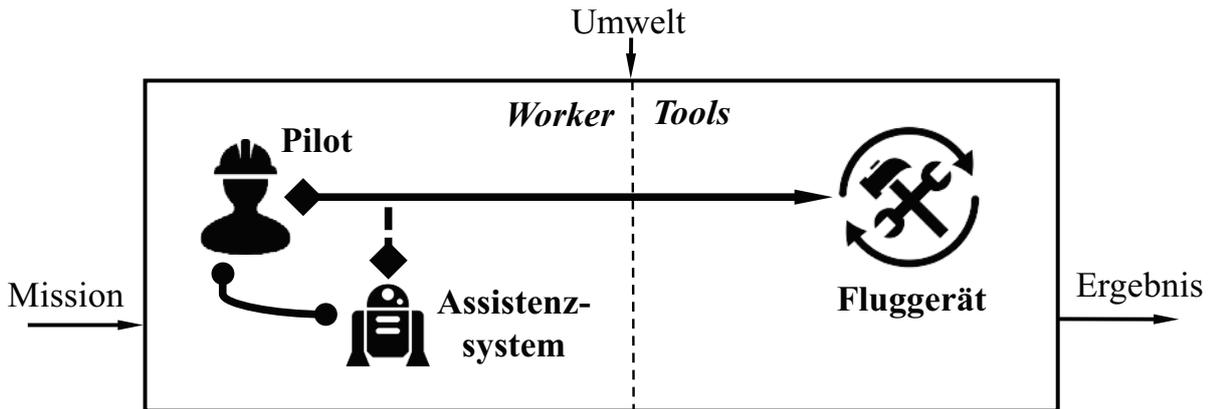


Bild 2: Integration des Assistenzsystems in das Arbeitssystem

Zur tatsächlichen Systementwicklung ist jedoch eine Definition konkreter Verhaltensregeln nötig, die in einer gegebenen Situation das beobachtbare Verhalten des Assistenzsystems definieren. Erst ausgehend davon können fundierte Anforderungen an Systemfähigkeiten abgeleitet und Strategien zur Implementierung gefunden werden.

Auf folgende Fragestellungen sind konkrete Antworten zu finden:

- In welcher Situation soll eingegriffen werden?
- Zu welchem Zeitpunkt soll der Eingriff erfolgen?
- In welcher Form soll der Eingriff erfolgen?
- Welche Information soll der Eingriff vermitteln?

Im folgenden Abschnitt soll mit dem Konzept der zustandsadaptiven Assistenz eine Definition von Assistenzverhalten getroffen werden, die Antworten auf diese Fragen liefert und das Systemverhalten zu jedem Zeitpunkt konkret und quantifizierbar festlegt.

3 Unterstützung durch ein zustandsadaptives Assistenzsystem

3.1 Anforderungen an das Assistenzverhalten

Das Assistenzsystem soll verhindern, dass menschliche Fehler sich negativ auf die Arbeitsleistung auswirken, die der Pilot erbringt. Dies soll durch Prävention von Fehlverhalten geschehen sowie durch kurative Maßnahmen bereits aufgetretener Fehlhandlungen.

Prävention von Fehlern soll zum einen indirekt erfolgen, indem die kognitiven Ressourcen des Piloten aufrechterhalten werden. Zum anderen sollen Fehler durch Unterlassen (*errors of omission*) (Hollnagel, 2000) verhindert werden, ehe sie eintreten. Ist beispielsweise abzusehen, dass der Pilot nicht rechtzeitig vor Eintritt in einen gesperrten Luftraum beidreht, soll er entsprechend frühzeitig hingewiesen werden.

Fehler durch fälschliches Handeln (*errors of commission*) (Hollnagel, 2000) können dagegen spontan und unvorhersehbar erfolgen. Hier soll die kurative

Maßnahme umgesetzt werden, den Piloten auf die Handlung hinzuführen, die den begangenen Fehler wieder korrigiert. Korrigiert der Pilot diesen Fehler nicht, begeht er wiederum einen Fehler durch Unterlassen. Damit lässt sich die Assistenzleistung bei der Korrektur eines begangenen Fehlers auf die der Prävention eines Fehlers durch Unterlassen zurückführen.

Das Anwendungsgebiet des Assistenzsystems sind damit Situationen, in denen der Pilot innerhalb eines gewissen Zeitrahmens bestimmte Handlungen tätigen muss, um Gefahr abzuwenden. Ziel des Assistenzsystems ist es dabei, diese Handlungen des Piloten zu unterstützen. Das Assistenzsystem arbeitet also darauf hin, die gegebene Situation im Falle einer Gefährdung auf eine Situation zurückzuführen, in der keine Gefährdung mehr besteht.

Der Pilot soll dabei durch das Assistenzsystem so wenig wie möglich, aber so viel wie nötig unterstützt werden. Die Unterstützung soll sich zum einen möglichst positiv auf das Arbeitsergebnis auswirken hinsichtlich der Korrektur von Fehlern. Zum anderen muss sie sich möglichst wenig negativ auf die kognitiven Ressourcen des Piloten auswirken.

Die Anforderungen an die Eingriffe des Assistenzsystems sind damit folgende:

- So spät wie möglich:
Dem Piloten soll ausreichend Gelegenheit gegeben werden, Probleme selbstständig zu lösen.
- Passend zum aktuellen Zustand des Piloten:
Die Unterstützung soll sich nahtlos in die aktuelle Tätigkeit einfügen und an der Ressourcenbelegung des Piloten orientieren, um ihn möglichst wenig abzulenken.
- Möglichst kleinschrittig:
Dem Piloten soll zwar weitergeholfen, dabei aber möglichst wenig Arbeit abgenommen werden, um ihn „im Loop“ zu halten.

3.2 Eingriffs-Strategie

Einer vorliegenden Gefährdung kann ein Zeitpunkt zugeschrieben werden, an dem anhand definierter Kriterien eine signifikante Verschlechterung des Arbeitsergebnisses eintreten wird. Im Beispiel der Flugverbotszone kann dies der Moment sein, an dem ein Abdrehen nicht mehr möglich sein wird. Der Zielzustand, den das Assistenzsystem bewirken soll, ist daher das Vorliegen einer gefährdungsfreien Situation spätestens zu dem Zeitpunkt, an dem sich das Ergebnis verschlechtert hätte.

Ausgangspunkt der Planung und Handlung des Assistenzsystems ist in jedem Zeitschritt der jeweils gegebene Zustand sowohl der Umwelt als auch des Piloten. Ziel ist der beschriebene gefährdungsfreie Zustand spätestens zum Zeitpunkt der Auswirkungen des Fehlers. Das Vorgehen des Assistenzsystems soll dann sein,

vom gegenwärtigen Ist-Zustand den Soll-Zustand der Gefhrdungsfreiheit zu erreichen (Theißing & Schulte, 2014b).

Grundlage ist die Erkennung sowohl des Zustands des Piloten als auch vorliegender Gefährdungen. Die Zustands- und Gefhrdungserkennung basiert auf Modellen, die das Domänenwissen über die Arbeitsaufgaben des Menschen sowie die möglichen Gefährdungen der Mission im Anwendungsfall vorgeben.

Das grundsätzliche Vorgehen ist dabei das Folgende:

- Rckwrtsplanung der Tätigkeiten des Piloten:

Das Assistenzsystem plant, mit welchen Tätigkeiten (mentalenen Prozessen sowie Handlungen) der Pilot, ausgehend von der gegenwärtigen Situation, den Soll-Zustand erreichen kann. Es plant dabei rückwärts vom spätesten Zeitpunkt an mit der Fragestellung: Wenn der Pilot die Gefährdung noch rechtzeitig abstellen soll, wann muss er spätestens damit begonnen haben? Dabei werden die Zeitdauern der benötigten Arbeitsschritte aufsummiert und vom spätesten Korrekturzeitpunkt abgezogen.

- Bestimmung des Eingriffsbedarfs:

Liegt der Zeitpunkt, an dem der Pilot die Gefährdung noch eigenmächtig effektiv abstellen kann, in der Zukunft, muss nicht eingegriffen werden. Nur dann, wenn der berechnete Zeitpunkt in der Vergangenheit liegt, also der Pilot nicht mehr in Eigenleistung eingreifen kann, muss das Assistenzsystem intervenieren.

- Bestimmung der Art des Eingriffs:

Eingegriffen wird, wenn die ersten Schritte (d.h. Handlungen und/oder mentale Prozesse) des Piloten nicht mehr rechtzeitig ausgeführt werden können. Die Eingriffe des Assistenzsystems sollen nun bewirken, dass die Effekte dieser ersten Schritte automatisiert, also durch die maschinellen Eingriffe, hervorgerufen werden. Ist der erste Schritt beispielsweise, dass der Pilot auf einen bestimmten Sachverhalt aufmerksam wird, ruft das Assistenzsystem denselben Effekt durch eine gezielte Aufmerksamkeitslenkung hervor. Ist der erste Schritt eine Flugplanung des Piloten, erzielt das Assistenzsystem den gewünschten Effekt, d.h. das Vorliegen eines gültigen Plans, durch den Vorschlag eines solchen Plans an den Piloten.

Bild 3 erläutert diese Strategie am Anwendungsfall eines Piloten, der im Begriff ist, gesperrtes Gebiet zu berfliegen. Nach der modellbasierten Erkennung der Luftraumverletzung wird, ausgehend von dem aus den Modellberechnungen prognostizierten Eintrittszeitpunkt, zurückgerechnet: Um die Verletzung gerade eben abzuwenden, muss das Fluggerät eine gewisse Zeit vorher abdrehen. Dafür ist nötig, dass der Pilot eine entsprechende Route aktiviert. Dazu ist eine Umplanung nötig, dazu wiederum eine Erkennung der Schwachstelle der aktuellen Route, vorher die Erkennung eines Umplanungsbedarfs und dazu die Erkennung der Lageänderung, die die Sperrung des Luftraums bedingt. Das

Zurückrechnen ergibt, dass dem Piloten für die Erkennung der Lageänderung zu wenig Zeit verbleibt, weshalb er bei diesem Prozess unterstützt wird. Die Unterstützung erfolgt entsprechend in Form einer Aufmerksamkeitslenkung auf die geänderte Lage.

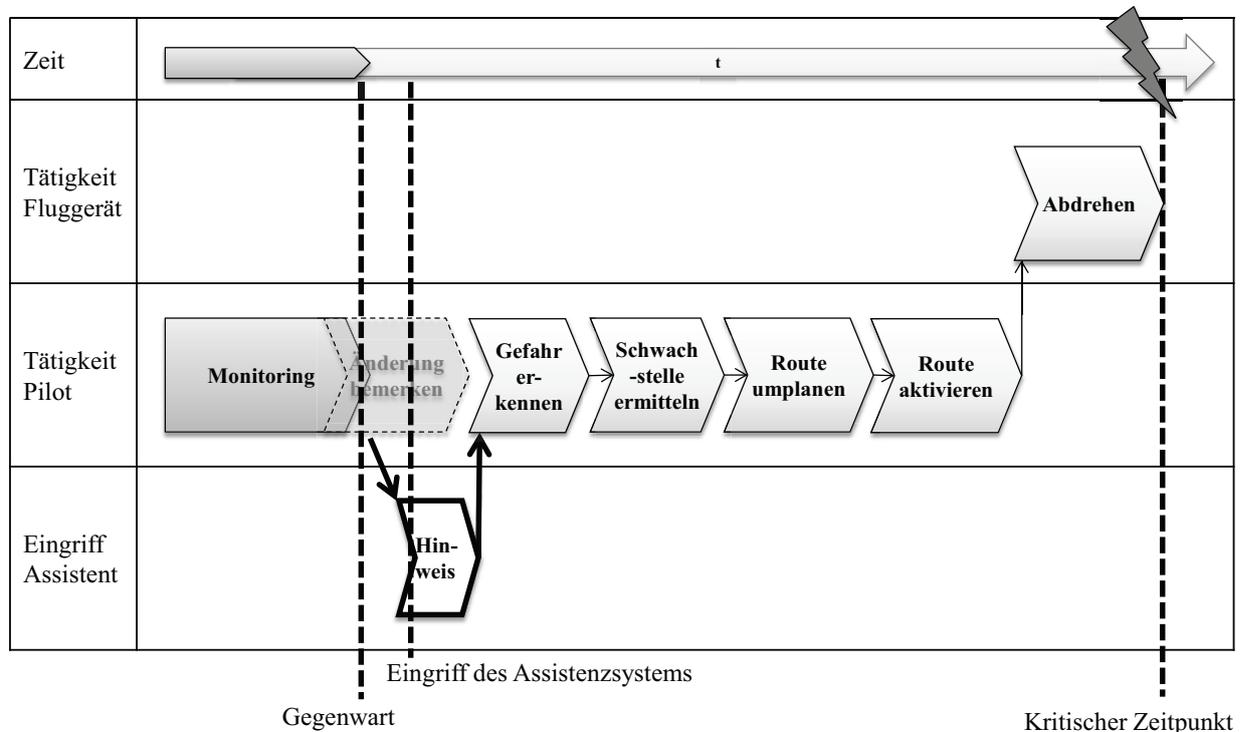


Bild 3: Beispiel zur Strategie der Eingriffsplanung des Assistenzsystems

3.3 Notwendige Systemfähigkeiten

Zur Umsetzung der beschriebenen Strategie benötigt das Assistenzsystem eine Reihe von Fähigkeiten:

- Erkennung von Gefährdung und Bestimmung des Zeitpunkts, zu dem spätestens eingegriffen werden muss.
- Bestimmung einer Lösung, die einen gefahrungsfreien Zustand herstellt, und des dazu nötigen Zustands (mentale Ressourcen, aktiver Arbeitsprozess) des Piloten.
- Erkennung des gegenwärtigen Zustands des Piloten.
- Planung, um vom Ist-Zustand zum Soll-Zustand des Piloten zu kommen.
- Ausführung der Intervention.

Das Assistenzsystem muss also, ähnlich wie der Beifahrer im Automobil, über Möglichkeiten zur Beobachtung und Wahrnehmung sowohl der Umwelt als auch des Menschen verfügen, Verarbeitungsmechanismen zur Planung eines Eingriffs besitzen und die Möglichkeit haben, auf den Menschen einwirken zu können. Dazu ist modellbasiertes Wissen über die Systemdomäne und den Piloten nötig. Eine Systemarchitektur, die das beschriebene Systemverhalten umsetzt, wird im Folgenden beschrieben.

3.4 Systemarchitektur

Unabhängig von der technischen Implementierung lässt sich die Architektur des beschriebenen Assistenzsystems konzeptionell in vier Segmente unterteilen (Theißing & Schulte, 2014a):

- Beobachtung und Interpretation der Mission (System und Umwelt)
- Beobachtung und Interpretation des Menschen
- Planung der Handlung
- Ausführung der Handlung

Die konzeptionelle Architektur des Assistenzsystems ist in Bild 4 dargestellt.

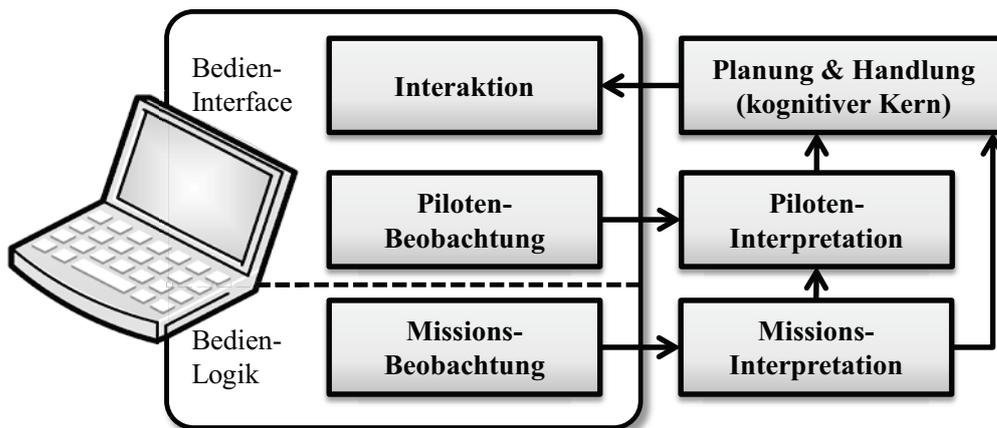


Bild 4: Architektur des in das Bedieninterface eingebetteten Assistenzsystems

Die Komponente der Missionsbeobachtung hat auf die Missionsdaten Zugriff, die auch dem Piloten zur Verfügung stehen, insbesondere auf die Missionsziele, den Status des bedienten Systems und äußere Umweltinformationen. Die Komponente der Missionsinterpretation analysiert auf Basis eines Domänenmodells der Mission die gewonnenen Daten im Hinblick auf vorliegende Gefährdungen. Sie stellt Information über vorliegende Gefährdungen zur Verfügung, insbesondere den kritischen Zeitpunkt und Gegenmaßnahmen.

Analog zur Beobachtung der Systemdaten gewinnt die Komponente der Pilotenbeobachtung Daten über das Verhalten des Piloten. Dies schließt aus Systemsicht beobachtbares Verhalten, etwa die Bedienung von Benutzerschnittstellen, sowie eine Beobachtung des Piloten, etwa seiner Blickbewegungen, mit ein. Die interpretierende Komponente zieht aus dieser Beobachtung anhand eines Modells Schlüsse über den Zustand des Piloten, insbesondere über seine gegenwärtige aufgabenbezogene Bedientätigkeit.

Die interpretierte Information über die Mission und den Piloten wird dem kognitiven Kern als Input zur Verfügung gestellt. Dieser Kern stellt die verarbeitende Einheit des künstlichen kognitiven Systems dar, die das Verhalten des Assistenzsystems generiert. Der kognitive Kern plant auf Basis der Eingangsdaten die Interaktionen mit dem Piloten bzw. dem bedienten System. Handlungen

werden ausgeführt, indem Kommandos an die Komponente der Interaktionsgenerierung erteilt werden.

Die Komponente, die Interventionen praktisch umsetzt, ist unmittelbar in die Mensch-Maschine-Schnittstelle integriert. Sie setzt Befehle des kognitiven Kerns in physische Handlungen um, die sich in Manipulationen der Schnittstelle äußern, z.B. in einer Einblendung von Information in einem Display.

Die technische Umsetzung des Systems hängt vom konkreten Anwendungsfall ab. Im folgenden Abschnitt wird die Implementierung des Assistenzsystems in der Bodenkontrollstation des Piloten eines unbemannten Systems beschrieben und die experimentelle Evaluierung des Systems dargestellt.

4 Experimentelle Validierung

4.1 Anwendungsfall unbemannte Luftaufklärung

Im Folgenden wird die Umsetzung des beschriebenen Assistenzsystems in der Domäne der unbemannten Luftaufklärung geschildert. Im Beispielfall bedient ein einzelner Pilot aus einer Bodenkontrollstation heraus ein einzelnes unbemanntes Fluggerät.

Arbeitsziel ist die Gewinnung von Aufklärungsdaten, beispielsweise von Information über Fahrzeugbewegungen in einem bestimmten Gebiet. Dem Piloten steht dazu ein Fluggerät zur Verfügung, das über bildgebende Sensoren verfügt. Zudem arbeitet an Bord ein künstlicher kognitiver Agent, d.h. ein hoch automatisiertes technisches System, das Methoden der künstlichen Intelligenz nutzt, um Aufgaben der Flugführung und Sensorführung übernehmen zu können (Clauß & Schulte, 2014). Bild 5 stellt den Systemaufbau dar.

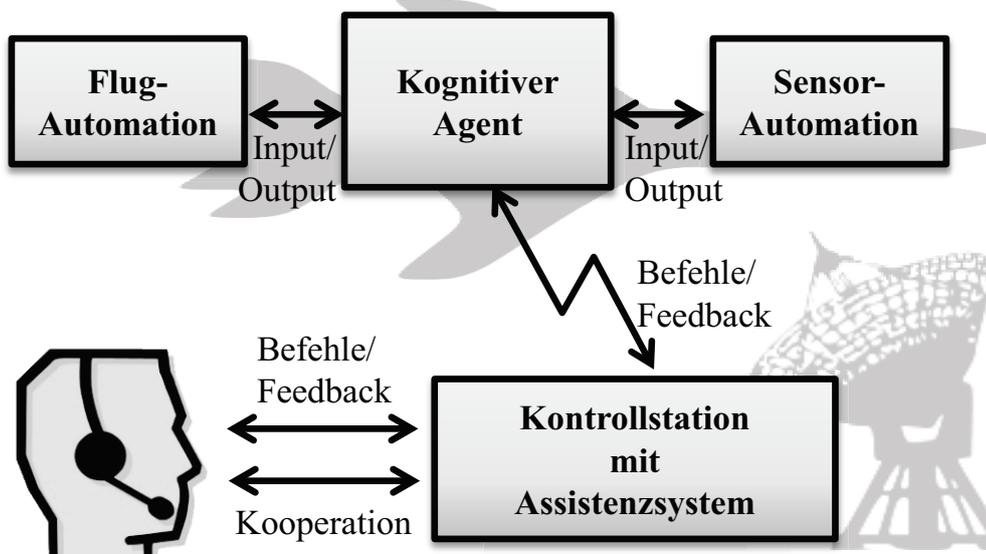


Bild 5: Der Aufbau des unbemannten Aufklärungssystems

Der hohe Grad an Bord-Automation ermöglicht es dem Piloten, das Fluggerät auf einer hohen Abstraktionsebene zu führen. Er befiehlt das Fluggerät durch das Erteilen von Aufträgen und das Spezifizieren von Rahmenbedingungen an diese

Aufträge. Der künstliche Agent an Bord kommt diesen Aufträgen nach und übernimmt dabei die Flugführung sowie die Bildgewinnung und –interpretation.

Der Agent erfüllt seine Aufträge innerhalb des vorgegebenen Rahmens, prüft aber nicht die Sinnhaftigkeit seiner Befehle auf einer missions-taktischen Ebene (die Ausführung der Befehle des Menschen hat die höchste Priorität).

Fehler des Menschen beim Bedienen des Systems können also nicht der Mission dienliches Verhalten des fliegenden Systems nach sich ziehen, etwa den Flug in gesperrte Gebiete oder den vollständigen Verbrauch allen Treibstoffs. Derartigen Gefährdungen soll durch den Einsatz des Assistenzsystems begegnet werden.

Der Pilot bedient das Fluggerät aus seiner Bodenkontrollstation heraus, in der ihm ein taktisches Kartendisplay zur Erteilung und Überwachung von Aufgaben sowie ein Sensordisplay zur Überwachung und ggf. manuellen Steuerung der Sensoren zur Verfügung stehen. In diese Systeme hinein ist das Assistenzsystem integriert. Dem Assistenzsystem stehen die zwischen Boden und Luft ausgetauschten System- und Umweltdaten als Input zur Verfügung sowie die Interaktionen, die der Pilot mit den Bediensystemen tätigt. Der Output des Assistenzsystems erfolgt durch Manipulation der Mensch-Maschine-Schnittstelle in Form von Hinweisen, Markierungen, Vorschlägen und Dialogfenstern auf den beiden Bildschirmen.

Die Modellierung der Domäne und die algorithmische Umsetzung des Systems werden in (Theißing & Schulte, 2014b) im Detail beschrieben.

4.2 Experimentaldesign

Durch den Einsatz des Assistenzsystems sollen Einbrüche in der Missionsleistung, die durch menschliches Fehlverhalten zustande kamen, reduziert werden. In einer Experimentalkampagne (Liegel, 2015) wurde untersucht, inwiefern dieser Effekt tatsächlich eintritt.

Folgende Auswirkungen des Assistenzsystems auf den Piloten werden erwartet:

- Verminderung der durch menschliche Fehler bedingten Einbrüche in der Missionsleistung.
- Unveränderte (also nicht in Folge der Assistenzsystem-Interaktion erhöhte) Beanspruchung des Piloten.
- Unverändertes (also nicht durch *Out-Of-The-Loop*-Effekte vermindertes) Situationsbewusstsein des Piloten.

Zur Prüfung dieser Sachhypothesen wurde ein Versuch durchgeführt, bei dem 12 Probanden in einem Simulationsaufbau die Rolle von Piloten einnahmen und simulierte Flugmissionen absolvierten. Die Probanden waren Offiziere der Luftwaffe ohne Erfahrung mit unbemannten Systemen, aber mit fachlichem Bezug zur Luftfahrt.

Jeder Proband absolvierte zunächst eine Trainingsmission, die ihn mit der Systembedienung vertraut machte. Im Anschluss an die Trainingsmission

absolvierten die Probanden drei Aufklärungsmissionen, die im Hinblick auf die unabhängige Variable des Assistenzsystem-Einsatzes in der Konfiguration A-B-A gestaffelt waren: In der ersten Mission war das Assistenzsystem ausgeschaltet, in der zweiten ein- und in der dritten wiederum ausgeschaltet. Diese Konfiguration ermöglichte es, Effekte der Assistenz-Unterstützung klarer von Lerneffekten abzugrenzen, die sich durch Mittelung über die erste und dritte Mission näherungsweise eliminieren ließen (Hussy, Schreier & Echterhoff, 2013).

Die drei Missionen waren unterschiedlich gestaltet, um auf das Missionsdesign bezogene Lerneffekte auszuschließen. Um jedoch eine Vergleichbarkeit der Missionen zu gewährleisten, waren sie so ausgelegt, dass im Hinblick auf die abhängigen Variablen wichtige Parameter (z.B. Zeitdauer, Anzahl der aufzuklärenden Objekte, Bedrohungslage) identisch waren.

Die Missionen wiesen einen sehr hohen Schwierigkeitsgrad auf, um ein Fehlverhalten der Probanden zu provozieren. Hintergrund ist das Anwendungsprofil des Assistenzsystems: Das Assistenzsystem kommt in seiner Wirkung nur im Falle von Fehlhandlungen zum Tragen. Daher hätte in normativen Arbeitssituationen (in denen Fehlverhalten die Ausnahme sein sollte) sehr viel Experimentalzeit darauf verwendet werden müssen, Fehlverhalten der Probanden zu beobachten. Durch den hohen Schwierigkeitsgrad der Missionen wurde dies künstlich beschleunigt.

Fehlverhalten konnte sich unter anderem in folgenden Effekten äußern: Durchflug durch den Bedrohungsradius feindlicher Flugabwehrstellungen, Transit in gesperrte Gebiete, Durchflug gesperrter Korridore sowie Aufbrauchen der Treibstoffreserven. Die Missionen waren so gestaltet, dass die Probanden durch schwierige Hauptaufgaben (manuelle Aufklärung teils verdeckter Ziele) und Nebenaufgaben (Überwachung der taktischen Karte, Sprechfunk) stark beansprucht waren und daher zu Fehlhandlungen tendierten.

Es wurde folgende Reihe abhängiger Variablen der Probanden untersucht und auf die genannte Art und Weise operationalisiert:

- **Negativleistung:** Die beschriebenen Auswirkungen menschlichen Fehlverhaltens wurden erfasst und mit einem Bewertungsschema gewichtet, das z.B. Verletzungen des Luftraums weniger gravierend gewichtete als Abstürze. Die Negativleistung entspricht der gewichteten Summe der Auswirkungen von Fehlhandlungen, normiert auf die Menge der Situationen, die in der jeweiligen Mission Fehlhandlungen provozierten.
- **Positivleistung:** Als separate, da nicht unmittelbar durch die Assistenzleistung beeinflusste, Variable wurde die Leistung der Probanden in der Hauptaufgabe erfasst. Sie entspricht der Quote korrekt aufgeklärter Objekte.

- **Situationsbewusstsein:** Nach jeder Mission beantworteten die Probanden SAGAT-Fragebögen (Endsley, 1988). Während der Mission war eine der geforderten Nebenaufgaben das laute Mitdenken, auf dem eine Bewertung darüber basierte, ob der Proband wichtige Lageänderungen wahrnahm oder nicht. Die Ergebnisse des Fragebogens und des lauten Mitdenkens wurden gewichtet summiert.
- **Beanspruchung:** Die Beanspruchung der Probanden wurde durch NASA-TLX-Fragebögen (Hart & Staveland, 1988) nach jeder Mission erfasst.

Als Hypothese bezüglich der Negativeistung wurde formuliert, dass der Wert der Negativeistung in der zweiten Mission verschieden ist von dem gemittelten Wert aus der ersten und dritten Mission. Die untersuchten Hypothesen bezüglich der anderen abhängigen Variablen fordern jeweils, dass der untersuchte Wert bei der zweiten Mission sich nicht vom Mittel aus erster und dritter Mission unterscheidet.

4.3 Ergebnisse

Bild 6 stellt die im Experiment erhobenen Daten graphisch dar und vergleicht die Messwerte aus Mission 2 (mit Unterstützung durch das Assistenzsystem) mit denen aus den Missionen 1 und 3 (ohne Assistenzsystem).

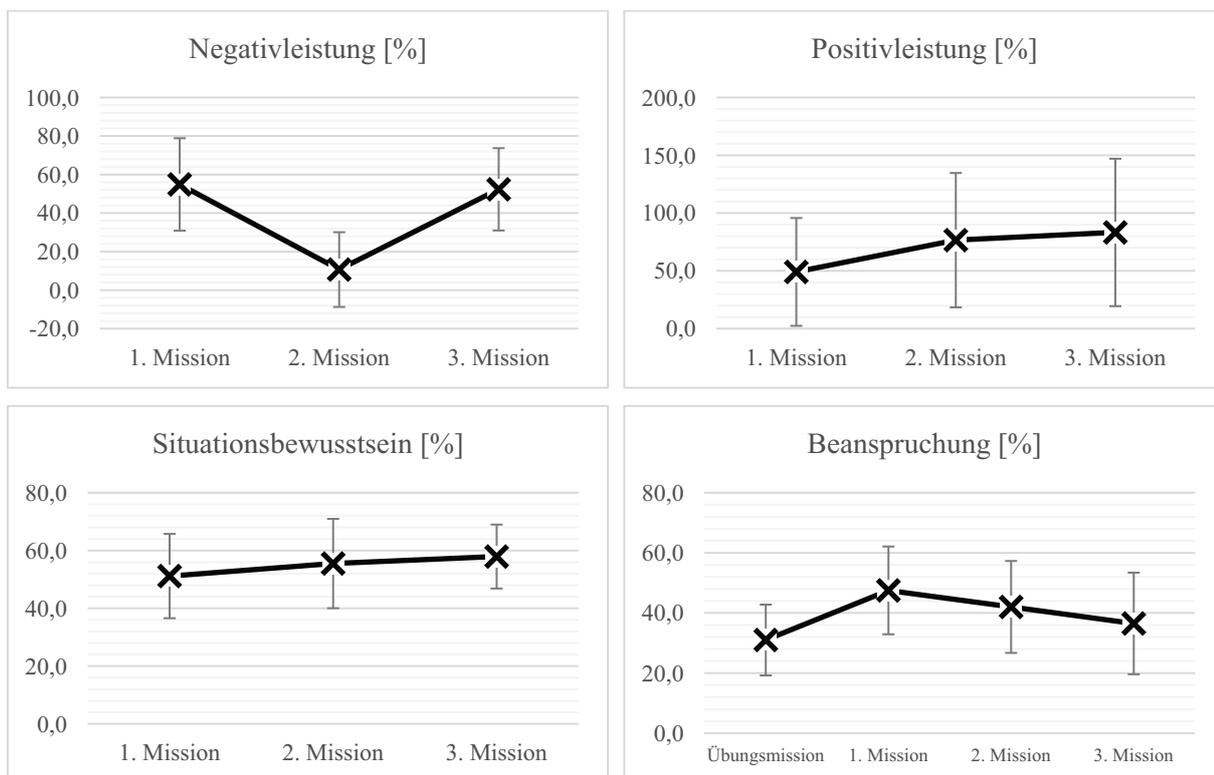


Bild 6: Im Versuch gemessene Werte der erhobenen Variablen, dargestellt als Mittelwert und Standardabweichung je Mission. (aus Liegel, 2015).

Die Negativeistung ist bei Mission 2 niedriger als bei den Missionen 1 und 3. Ein Zweistichproben-t-Test für abhängige Stichproben ergibt beim Vergleich der Leistung aus Mission 2 mit dem Mittelwert der Missionen 1 und 3, dass die

Variablenpaare sehr signifikant aus verschiedenen Grundgesamtheiten stammen. Die Nullhypothese, die Negativeleistungen seien durch die unabhängige Variable des Assistenzsystems unbeeinflusst, kann also wie erwartet verworfen werden.

Die Operationalisierungen der übrigen untersuchten abhängigen Variablen konnten keine statistisch signifikanten Unterschiede zwischen den Missionen aufzeigen, was der Erwartungshaltung entspricht. Als Gründe für den leichten Anstieg an Situationsbewusstsein und Positiveleistung sowie für den leichten Abfall an Beanspruchung der Probanden werden Lerneffekte vermutet.

Die Operationalisierung der Beanspruchung durch den ermittelten Wert des NASA-TLX-Bogens lieferte keinen statistisch signifikanten Unterschied zwischen den Missionen.

Sie kann jedoch insofern validiert werden, als dass der Wert, wie in Bild 6 dargestellt, auch in der Trainingsmission erhoben wurde. Im Vergleich zur Trainingsmission ist der Anstieg des Wertes im Kontext der Hauptmissionen signifikant, was auf eine Validität der Messmethode schließen lässt.

5 Zusammenfassung und Ausblick

Es wurde das Konzept für ein Assistenzsystem vorgestellt, das einen Piloten bei seiner Flugmission unterstützt, indem es menschliche Fehler zu verhindern und deren Auswirkungen abzuschwächen versucht. Neben dem Beheben aktuell vorliegender Probleme zielt die Unterstützungsleistung darauf ab, den mentalen Zustand des Piloten aufrechtzuerhalten, um zukünftige *Out-Of-The-Loop*-Fehler zu unterbinden. Es passt Zeitpunkt und Art seiner Eingriffe dazu an den Zustand des Piloten an, den es sich aus der Beobachtung des Piloten erschließt.

Das Konzept wurde am Anwendungsfall des unbemannten Aufklärungsflugs implementiert. Im Mensch-Maschine-Experiment konnte die Wirksamkeit der Unterstützungsleistung im Hinblick auf die Unterdrückung akuter Gefährdungen nachgewiesen werden. Im Rahmen des Experiments konnte keine signifikante Veränderung von Beanspruchung und Situationsbewusstsein des Piloten gezeigt werden. In zukünftigen Untersuchungen gilt es, die Auswirkung der Assistenzleistung auf diese kognitiven Parameter des Piloten im Langzeitexperiment zu erforschen.

Das vorgestellte Konzept wurde in der Domäne der Luftfahrt erarbeitet und erprobt. Neben dem vorgestellten Anwendungsfall der unbemannten Flugführung kann davon auch die bemannte Luftfahrt profitieren, beispielsweise durch die Unterstützung eines einzelnen Piloten im Kontext von *Single-Pilot Operations*.

Grundsätzlich eignet sich das Assistenzsystem für Situationen, in denen ein Mensch eine komplexe Automation bedient. Ein Anwendungsfall abseits der Luftfahrt ist etwa die Steuerung hochautomatisierter Kraftfahrzeuge, gerade im Hinblick auf die aufkommende Vollautomation der Autofahrt. Werden dem Fahrer durch moderne Fahrerunterstützungssysteme zunehmend manuelle Steuer-

aufgaben aus der Hand genommen, ist mit *Out-Of-The-Loop*-Effekten zu rechnen, denen mit zustandsadaptiver Assistenz begegnet werden kann.

Literatur

- Bainbridge, L. (1983). Ironies of automation. *Automatica*, 19(6), 775–779.
- Boeing. (2014). *Statistical Summary of Commercial Jet Airplane Accidents. Worldwide Operations | 1959 – 2013*. Seattle, Washington, USA.
- Clauß, S. & Schulte, A. (2014). Task delegation in an agent supervisory control relationship capability awareness in a cognitive agent. In *2014 IEEE International Conference on Systems, Man, and Cybernetics (SMC)* (pp 825–830). IEEE.
- Endsley, M.R. (1988). Situation awareness global assessment technique (SAGAT). In *Proceedings of the National Aerospace and Electronics Conference (NAECON)*, New York (pp 789–795).
- Hart, S.G. & Staveland, L.E. (1988). Development of NASA-TLX (Task Load Index): Results of empirical and theoretical research. *Advances in Psychology*, 52, 139–183.
- Hollnagel, E. (2000). Looking for errors of omission and commission or The Hunting of the Snark revisited. *Reliability Engineering and System Safety*, 68(2), 135–145.
- Hussy, W., Schreier, M. & Echterhoff, G. (2013). *Forschungsmethoden in Psychologie und Sozialwissenschaften fr Bachelor*. Springer-Verlag.
- Jones, P.M. & Jacobs, J.L. (2000). Cooperative problem solving in human-machine systems: Theory, models, and intelligent associate systems. *IEEE Transactions on Systems, Man and Cybernetics Part C: Applications and Reviews*, 30(4), 397–407.
- Kaber, D. & Endsley, M. (1997). Out-of-the-loop performance problems and the use of intermediate levels of automation for improved control system functioning and safety. *Process Safety Progress*, 16(3).
- Lee, J.D. & See, K.A. (2004). Trust in automation: designing for appropriate reliance. *Human Factors*, 46(1), 50–80.
- Liegel, A. (2015). *Experimentelle Untersuchungen mit hoher Aussagekraft trotz geringer Stichprobengre: Strategieentwicklung und -erprobung am Anwendungsfall eines UAS-Operateur-Assistenzsystems*. Universität der Bundeswehr München.
- Parasuraman, R., Molloy, R. & Singh, I. L. (2009). Performance Consequences of Automation-Induced ' Complacency '. *The International Journal of Aviation Psychology*, 3(1993), 1–23.
- Sarter, N.B., Woods, D.D. & Billings, C.E. (1997). Automation Surprises. In G. Salvendy (Ed.), *Handbook of Human Factors & Ergonomics(2nd edition)* (pp 1–25). New York: Wiley.
- Schulte, A. (2012). Kognitive und kooperative Automation zur Fhrung unbemannter Luftfahrzeuge. In *2. Interdisziplinrer Workshop Kognitive Systeme: Mensch, Teams, Systeme und Automaten – Verstehen, Beschreiben und Gestalten Kognitiver (Technischer) Systeme*. Duisburg, Germany (pp 1–10).
- Sheridan, T.B. (1997). Task Analysis, Task Allocation and Supervisory Control. In M.G. Helander, T.K. Landauer & P.V. Prabhu (Eds.), *Handbook of Human-Computer Interaction* (pp 87–103). Amsterdam: Elsevier Science.
- Theißing, N. & Schulte, A. (2014a). A UAS Mission Assistant System Employing a Theory-Of-Mind about the Human Operator. In *International Conference on Human-Computer Interaction in Aerospace (HCI-Aero)*. Santa Clara, CA, USA.

- Theißing, N. & Schulte, A. (2014b). Flight Management Assistance Through Cognitive Automation Adapting to the Pilot ' s State of Mind Mentalizing Pilot Assistance. In *31st Conference of the European Association for Aviation Psychology (EAAP)*.
- Wiener, E.L. & Curry, R.E. (1980). Flight-deck automation: promises and problems. *Ergonomics*, 23(10), 995–1011.
- Woods, D.D., Johannesen, L.J., Cook, R.I. & Sarter, N.B. (1994). *Behind Human Error: Cognitive Systems, Computers, and Hindsight*. Columbus, Ohio.

Autoren

Dipl.-Ing. N. Theißing
A. Liegel, M.Sc.
Univ.-Prof. Dr. A. Schulte

Universität der Bundeswehr München
Institut für Flugsysteme

Kontakt: nikolaus.theissing@unibw.de

