

# Automatisierte Prognose von Bedienungsfehlern bei der Entwicklung von Pilotenassistenzsystemen

Andreas Lüdtkke<sup>1</sup> & Claus Möbus<sup>2</sup>

<sup>1</sup> Kuratorium OFFIS e.V., 26121 Oldenburg, luedtke@offis.de

<sup>2</sup> Carl von Ossietzky Universität, 26111 Oldenburg, claus.moebus@uni-oldenburg.de

## Einleitung

Ziel des hier behandelten Vorhabens ist die Entwicklung einer Methode zur Vorhersage von Bedienungsfehlern beim Design sicherheitskritischer Assistenzsysteme in Flugzeugen. Kern der Methode ist ein ablauffähiges kognitives Modell, mit einer Implementierung der Entstehung gelernter Sorglosigkeit bei der Verrichtung von Routineaufgaben. Hiermit ist es möglich, die Herausbildung stereotypischer Verhaltensmuster zu prognostizieren, die in abweichenden Situationen zu gefährlichen Bedienungsfehlern führen können. Der Schwerpunkt des Textes liegt auf dem Vergleich der Modellvorhersagen mit Pilotenverhalten, das im Rahmen einer Flugsimulatorstudie bei der Lufthansa Verkehrsfliegerschule in Bremen erhoben wurde. Es wird aufgezeigt, dass die generierten Fehlervorhersagen mit den tatsächlich beobachteten Fehlern übereinstimmen.

In dem folgenden Text wird zunächst behandelt, aufgrund welcher Eigenschaften die Bedienung moderner Cockpitassistenzsysteme eine kognitive Herausforderung für die Piloten darstellt. Anschließend wird mit der Gelernten Sorglosigkeit ein fehlerproduzierender kognitiver Prozess aufgezeigt, der charakteristisch für menschliches Verhalten ist und dem bei der Systementwicklung durch designseitige Maßnahmen begegnet werden muss. Es wird dann eine empirische Studie mit einer Analyse von Verhaltensdaten vorgestellt, die Hinweise auf die Adäquatheit gelernter Sorglosigkeit als Fehlerklärungshypothese liefert. Nach einer kurzen Präsentation des ablauffähigen kognitiven Modells wird schließlich das Modellverhalten mit den empirischen Verhaltensdaten verglichen. Der Text schließt mit einer Zusammenfassung und weist auf die Konsequenzen der Untersuchung für das Design von Assistenzsystemen hin.

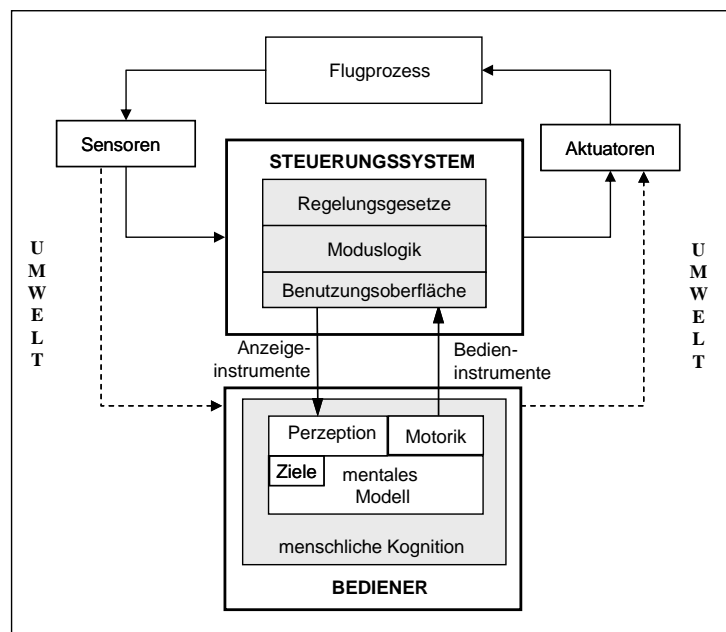
## Modusbasierten Assistenzsysteme als Herausforderung für die Menschlichen Kognition

Die Automatisierung bestimmter Pilotenaufgaben erlebte in den 80er Jahren einen entscheidenden Auftrieb. Mit der Einführung der Boeing 767 im Jahre 1982 konnte die Arbeitslast im Cockpit so weit reduziert werden, dass statt der Drei-Mann-Besatzung nur noch zwei Piloten notwendig waren (Billings 1997). In diesen Anfängen der Cockpitautomatisierung wurde der Mensch als schwächstes Glied im Flugablauf betrachtet und es galt, seine Tätigkeiten so weit wie möglich durch Automatisierung zu ersetzen (Rüegger 1990). Nicht der Pilot, sondern das technisch Machbare stand im Vordergrund. Die menschliche Steuerung wurde mehr und mehr durch eine automatische Steuerung in Form von Autopiloten und Flight Management Systemen ersetzt, wobei sich die Rolle des Piloten vom *aktiv Handelnden* zum *passiv Überwachenden* wandelte. Die neue Rolle wird als *Supervisory Control* (Sheridan 1997) bezeichnet. Der Pilot programmiert und überwacht die Systeme, die für ihn die Steuerung des Flugprozesses übernehmen. Steuerungssysteme lesen den Zustand des zu steuernden Prozesses über Sensoren und manipulieren diesen über Aktuatoren. Im Notfall wird von den Piloten verlangt, dass sie in die automatische Steuerung eingreifen und ggf. manuell übernehmen. Diese Sichtweise ist nicht konsistent mit der Vorstellung, dass der Mensch das schwächste Glied im Flugablauf ist. Besonders kritisch ist, dass die Piloten vor allem in Flugphasen mit ohnehin geringer Arbeitslast durch die Systeme entlastet werden, z.B. durch Reduzierung des körperlich-handwerklichen Aufwands während des Streckenfluges. In kritischen Phasen mit hoher Arbeitslast (z.B. beim Start- oder Landeabbruch) hingegen wird die Belastung durch die oft kontraintuitive Bedienung der Automatik verstärkt (Sarter & Woods 1995b). Wiener (1989) spricht in diesem Zusammenhang von einer „klobigen“ Automatisierung (clumsy automation). Unbestritten ist sicherlich, dass die Einführung moderner Automatisierungssysteme zur Erhöhung der Sicherheit beigetragen hat. Dennoch wurden neue Fehlerarten hervorgebracht, die weitgehend einem Missverständnis der menschlichen Fähigkeiten entspringen (Billings 1997).

LÜDTKE, A., MÖBUS, C., *Automatisierte Prognose von Bedienungsfehlern bei der Entwicklung von Pilotenassistenzsystemen*. In M. GRANDT (Hrsg.), *Verlässlichkeit der Mensch-Maschine-Interaktion*, 46. Fachausschussitzung Anthropotechnik der Deutschen Gesellschaft für Luft- und Raumfahrt e. V. DGLR-Bericht 2004-03, S. 241 - 270, Bonn: Deutsche Gesellschaft für Luft- und Raumfahrt, 2004, ISBN 3-932182-36-7.

Ein wesentlicher Faktor, der die Mensch-Maschine Interaktion erschweren kann, ist die Ausstattung der Systeme mit einer Vielzahl von Modi. Ein Modus kann als eine Systemkonfiguration mit einer spezifischen Funktionalität verstanden werden (Degani, Shafto & Kirlik 1999). Beispielsweise sind Autopilotensysteme mit Modi ausgestattet, in denen abhängig von den gemessenen Sensordaten und auf Basis bestimmter Regelungsgesetze Aktuatorwerte berechnet werden, um einen moduspezifischen Flugzustand, z.B. eine bestimmte Höhe, zu erreichen bzw. zu halten. Durch die Modi kann einerseits ein hohes Maß an Systemflexibilität erreicht werden, andererseits sprechen einige Forscher (z. B. Leveson & Palmer 1997) zu Recht bereits von einer Moduswucherung (proliferation of modes). Denn negativ stellt sich der erhöhte kognitive Aufwand für die Bedienung der Systeme dar. Die Piloten sind gefordert, den Überblick über das Angebot zu bewahren, d.h. die Funktionsweise der Systeme in jedem Modus zu kennen und zu wissen, wie sie in unterschiedlichen Kontexten angewendet werden. Eine Reihe von Unfällen und Vorfällen belegen, dass hier ein Problem existiert (Dornheim 1995).

Norman (1988) beschreibt, dass Menschen ein mentales Modell der Maschine, die sie bedienen, bilden und dass dieses maßgeblich die Interaktion mit dem Gerät bestimmt. Monk (1999) charakterisiert die Interaktion als zyklische Interaktion (cyclic interaction). Abbildung 1 zeigt das Schema der zyklischen Interaktion mit einem Steuerungssystem (z.B. Autopilot). Der Pilot nimmt den aktuellen Zustand des Gerätes und des Steuerungsprozesses (Flugprozess) mittels seiner Perzeption über die Anzeigeelemente der Benutzungsoberfläche wahr. Aus den eingehenden Informationen werden auf Basis des mentalen Modells Aktionen zur Erreichung der aktuellen Ziele abgeleitet. Diese mentale Verarbeitung wird durch die menschliche Kognition gesteuert. Die Aktionen werden motorisch über die Bedieninstrumente ausgeführt, wodurch sich der Zustand der Moduslogik ändert. Abhängig vom aktuellen Modus werden bestimmte Regelungsmechanismen aktiviert, die Sensorwerte einlesen und daraus Aktuatorwerte zur Veränderung des Steuerungsprozesses berechnen. Der neue Zustand wird wieder vom Bediener wahrgenommen und so setzt sich der Zyklus fort. Innerhalb der zyklischen Interaktion gewinnt der Bediener Erfahrungen im Umgang mit dem Gerät und passt sein mentales Modell entsprechend an, indem er sich merkt, durch welche Bedienaktionen er seine Ziele am effizientesten erreichen kann. Das mentale Modell soll im Folgenden als *mentales Bedienungsmodell* bezeichnet werden.



**Abbildung 1: Schema der zyklischen Interaktion**

Schwierig gestaltet sich der Aufbau eines korrekten mentalen Bedienungsmodells, wenn die Automatik kontraintuitiv entworfen wurde. Dies kann dazu führen, dass es Systemverhaltensweisen gibt, die dem Bediener gar nicht bekannt sind und solche bzgl. derer er inkorrekte Annahmen macht. Ein inkorrektes mentales Bedienungsmodell führt zu Modusfehlern (Norman 1981), d.h. der Bediener nimmt eine Aktion vor, die zwar in einem anderen Modus durchaus korrekt wäre, in dem aktuellen aber zu unerwünschten Effekten führt. Es handelt sich um „failures of commission“, d.h. Fehler, bei

LÜDTKE, A., MÖBUS, C., *Automatisierte Prognose von Bedienungsfehlern bei der Entwicklung von Pilotenassistenzsystemen*. In M. GRANDT (Hrsg.), *Verlässlichkeit der Mensch-Maschine-Interaktion*, 46. Fachausschussitzung Anthropotechnik der Deutschen Gesellschaft für Luft- und Raumfahrt e. V. DGLR-Bericht 2004-03, S. 241 - 270, Bonn: Deutsche Gesellschaft für Luft- und Raumfahrt, 2004, ISBN 3-932182-36-7.

denen der Bediener eine inkorrekte Aktion vornimmt. Degani, Shafto und Kirlik (1999) erweitern diese Sichtweise um „failures of omission“. Dies sind Modusfehler, bei denen eine in dem aktuellen Modus notwendige Aktion nicht durchgeführt wird. Modusfehler können zu einem unerwarteten Systemverhalten führen, das nur noch schwer nachzuvollziehen ist. Die Dramatik der Situation lässt sich eindrucksvoll durch den Ausruf eines Piloten beschreiben: "How in the world did we ever get into that mode?" (Sarter & Woods 1995a). Sarter, Woods und Billings (1997) haben für Situationen, in denen sich die Automatik anders verhält als erwartet, den Begriff Automatisierungsüberraschungen (automation surprises) geprägt.

## Prognose von Pilotenfehler auf Basis gelernter Sorglosigkeit

Bestehende Ansätze zur automatisierten Vorhersage von Pilotenfehlern lassen sich entweder als entwurfs- oder bedienerzentriert charakterisieren. Im Zentrum entwurfszentrierter Verfahren (z.B. Degani und Heymann (2002), Rushby, Crow und Palmer (1999)) stehen Systemmodelle. Mittels formaler Verifikation können diese auf die Einhaltung bestimmter Benutzererwartungen analysiert werden. Der Vorteil ist die mathematisch vollständige Analyse mittels formaler Verfahren. Die Herleitung realistischer Benutzererwartungen (mentales Modell) wird allerdings vorausgesetzt. Im Zentrum benutzerzentrierter Verfahren (z.B. Freed und Remington (2000), Corker (2000)) stehen Bedienermodelle. Diese werden genutzt, um potentielles Benutzerverhalten durch *Human Simulation* zu antizipieren. Der Vorteil ist, dass komplexe kognitive Prozesse berücksichtigt werden können. Nachteil ist jedoch auch hier, dass realistische mentale Modelle a-priori gegeben sein müssen. Darüber hinaus ist Simulation niemals vollständig.

Unser Ansatz besteht in der Entwicklung einer integrierten Methodik, die erstens Konzepte und Methoden der kognitiven Modellierung anwendet, um realistische mentale Modelle psychologisch plausibel durch Human Simulation zu antizipieren. Der Fokus liegt dabei auf dem kognitiven Lernmechanismus *gelernter Sorglosigkeit*. Zweitens werden Teile der kognitiven Modellierung in Entwurfnotationen übersetzt, um mathematisch vollständige Verifikationstechniken anwenden zu können. Der Fokus dieses Textes liegt auf der Human Simulation.

Empirische Studien (Lüdtke & Möbus 2003; Javaux & Olivier 2001) zeigen, dass sich bestimmte Probleme mit modusbasierten Systemen durch einen kognitiven Lernprozess erklärt werden können, bei dem der Bediener sein mentales Modell entsprechend der statistischen Häufigkeiten des Auftretens von Modusübergängen vereinfacht. Javaux (2002) nennt diesen Prozess „*frequential simplification*“. Wir verwenden die Theorie gelernter Sorglosigkeit von Frey und Schulz-Hardt (1997), weil sie detailliert die kognitiven Vorgänge beschreibt.

Die Theorie der gelernten Sorglosigkeit (Frey und Schulz-Hardt 1997) beschreibt einen Lernprozess, der zur Vernachlässigung von Gefahren führt. Dabei erreichen Menschen Erfolge ohne großen Aufwand und obwohl beim Handeln Sicherheitsvorkehrungen außer Acht gelassen werden. Es ist den Handelnden also grundsätzlich bekannt, dass gewisse Gefahren bestehen und dass zur Vermeidung eines Unfalls bestimmte Vorsichtsmaßnahmen getroffen werden müssten. Diese Vorsichtsmaßnahmen stellen aber einen gewissen Aufwand dar. Sie erfordern beispielsweise das Tragen unbequemer Sicherheitskleidung oder die zeitaufwendige Überprüfung bestimmter Sicherheitsvoraussetzungen. Nach der Theorie streben Menschen danach, positive Zustände zu erreichen und aufrechtzuerhalten. Dabei wird „low-cost“ Verhalten gegenüber „high-cost“ Verhalten immer dann bevorzugt, wenn es einen positiven Zustand bewahrt. Je häufiger sich der Erfolg beim bequemen sicherheitswidrigen Handeln einstellt, ohne dass es zu gefährlichen Konsequenzen kommt, desto mehr verfestigt sich ein Zustand der Sorglosigkeit. Sorglose Menschen entwickeln eine Haltung nach dem Motto „alles ist gut und wird auch in Zukunft (von selbst) gut bleiben“. Als Symptom zeigt sich eine verringerte Motivation zur Gefahrenaufdeckung. Der Zustand verfestigt sich also motivational, was in der Konsequenz bedeutet, dass die Bereitschaft zur Verhaltensänderung nachlässt. Gefahrensignale werden nicht mehr wahrgenommen. Als weiteres Symptom zeigt sich sogar eine verringerte Fähigkeit zur Gefahrenaufdeckung. Mit anderen Worten, sorgsames Verhalten wird systematisch verlernt und das erneute Erlernen sorgsamen Verhaltens tritt, wenn überhaupt, nur verzögert ein.

Sorglosigkeit sollte allerdings in einem Kontinuum bewertet werden. Sorgloses Handeln bildet den einen Pol, den anderen bildet übervorsichtiges Handeln. Übervorsichtige Menschen verbrauchen zu viel Energie beim Ausspähen von Gefahrensignalen, was zur Handlungsunfähigkeit führen kann. Ein

LÜDTKE, A., MÖBUS, C., *Automatisierte Prognose von Bedienungsfehlern bei der Entwicklung von Pilotenassistenzsystemen*. In M. GRANDT (Hrsg.), *Verlässlichkeit der Mensch-Maschine-Interaktion*, 46. Fachausschussitzung Anthropotechnik der Deutschen Gesellschaft für Luft- und Raumfahrt e. V. DGLR-Bericht 2004-03, S. 241 - 270, Bonn: Deutsche Gesellschaft für Luft- und Raumfahrt, 2004, ISBN 3-932182-36-7.

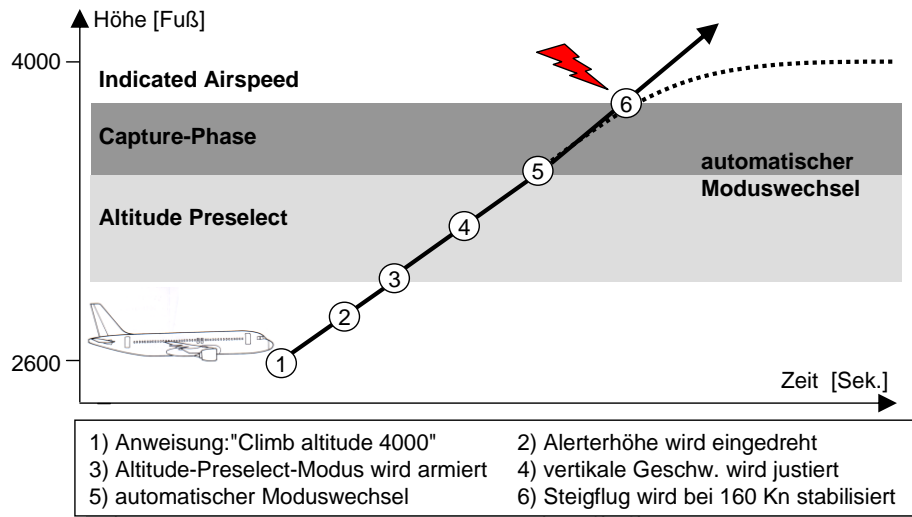
gewisses Maß an Sorglosigkeit ist somit sogar notwendig, um überhaupt in sicherheitskritischen Aufgabenumgebungen agieren zu können. Um darüber hinaus sicher handeln zu können, müssen potentielle Gefahren bewusst sein und auch zumindest ansatzweise erfahren werden. Nur dann wird der Sinn der Sicherheitsvorkehrungen tatsächlich anerkannt, sodass eine notwendige Sensibilität gegenüber Gefahrensignalen besteht.

Wie lässt sich gelernte Sorglosigkeit im Zusammenhang der Bedienung modaler sicherheitskritischer Systeme bewerten? In vielen modusbasierten Systemen gibt es so genannte *Entscheidungspunkte*, an denen es, abhängig vom aktuellen Modus, mehrere Möglichkeiten der Aufgabenfortführung gibt. Dies erfordert vom Bediener, dass er jedes Mal, wenn er an den Entscheidungspunkt gelangt, prüft, in welchem Modus sich das System aktuell befindet, und sein Verhalten entsprechend anpasst. Nach der Theorie besteht die Neigung, diese Überprüfung auszulassen, weil sie Zeit verbraucht und somit aufwendig ist. Unterlässt der Bediener die Überprüfung und verhält sich so, wie es meistens richtig ist, dann entsteht gelernte Sorglosigkeit, wenn die Aufgabe erfolgreich abgeschlossen wird und es nicht zu gefährlichen Konsequenzen kommt.

## Empirische Untersuchung

Ziel der Studie war es herauszufinden, unter welchen Voraussetzungen Modusfehler begangen werden, welche Vorgeschichte es gibt und ob sich eine Tendenz zu gelernter Sorglosigkeit zeigt. Die Studie wurde in Full-Motion-Flugsimulatoren des Flugzeugtyps Piper Cheyenne PA42 IIIA bei der Lufthansa Verkehrsfliegerschule in Bremen durchgeführt. Die Piper Cheyenne besitzt ein modernes Autopilotensystem, das zwar nicht die volle Funktionalität der Systeme großer Jets wie dem Airbus A320 oder der Boeing 737 umfasst, dennoch sind die Bedienungsabläufe ähnlich. Der Autopilot diente als Untersuchungsgegenstand der Studie. Insgesamt wurden vier Piloten (im Folgenden als Proband A, B, C und D bezeichnet) beim Simulatortraining beobachtet und die Trainingseinheiten auf Video aufgenommen. Jede Trainingseinheit hat eine Dauer von ca. 1,5 Stunden. Eine Videokamera wurde auf einem Stativ befestigt und auf das Cockpit ausgerichtet. Es handelte sich um eine reine Beobachtungsstudie, d.h., dass vom Studienleiter kein Einfluss auf den Ablauf genommen wurde. Aufgrund des Ziels der Studie, eine Hypothese über den Lernprozess der Probanden zu generieren, mussten möglichst durchgängige Verlaufsdaten gesammelt werden. Insgesamt liegen 22,5 Stunden Videomaterial vor, das sich wie folgt auf die einzelnen Probanden verteilt: Proband A wurde 8,4 (sieben Trainingseinheiten), B 4,9 (vier Trainingseinheiten), C 4,5 (drei Trainingseinheiten) und D 4,7 Stunden (drei Trainingseinheiten) gefilmt. Aus den Videoaufzeichnungen wurden die Phasen, in denen der Autopilot angewendet wurde, extrahiert und ereignisgetrieben transkribiert. Im ersten Analyseschritt wurden die Einträge in Episoden unterteilt. Jede Episode beschreibt die zeitliche Abfolge der Ereignisse bei der Durchführung einer einzelnen Flugaufgabe. Den Beginn kennzeichnet ein aufgabenauslösendes Ereignis (meist eine Fluglotsenanweisung). Die Episode endet, wenn das Aufgabenziel erreicht ist, die Aufgabe explizit abgebrochen wird oder eine neue Aufgabe beginnt. Die einzelnen Episoden werden im Folgenden als *Aufgabenprotokolle* bezeichnet.

In den Aufgabenprotokollen lassen sich bestimmte Phänomene bzgl. der Bedienungsfehler identifizieren, die auf gelernte Sorglosigkeit hinweisen. Diese Phänomene werden im Folgenden dargestellt. Zunächst wird zur Illustrierung der beobachteten Bedienungsfehler ein Fehlerszenario von Proband A beschrieben, das in ähnlicher Form wiederholt während der Studie aufgetreten ist. Der Verlauf des Szenarios ist in Abbildung 2 grafisch veranschaulicht.



**Abbildung 2: Flugbahn bei einem typischen Modusfehler**

Kurz nach dem Start wurde von den Fluglotsen die Anweisung erteilt, auf 4000 Fuß zu steigen (Abbildung 2 ①). Der Pilot stellte den Alerter auf 4000 (②) und betätigte die ALTS-Taste (③) zur Armierung des Altitude-Preselect-Modus. Anschließend erhöhte er die vertikale Geschwindigkeit um die für einen Steigflug empfohlenen 2000 Fuß/Min. zu erreichen. Dabei gilt es zu beachten, dass die angezeigte Geschwindigkeit (IAS für Indicated Airspeed) des Flugzeugs 160 Kn nicht unterschreiten darf, denn beim Steigen sinkt die Geschwindigkeit allmählich ab. Um dies sicherzustellen, wird empfohlen, den Indicated-Airspeed-Hold-Modus zur automatischen Stabilisierung der Geschwindigkeit bei Erreichen von 160 Kn zu aktivieren. Während der Pilot auf die sinkende Geschwindigkeit achtete und auf 160 Kn wartete, kam das Flugzeug der Alerterhöhe bereits sehr nahe, sodass der Autopilot automatisch den Altitude-Preselect-Modus von armiert auf aktiviert schaltete (⑤). Dies ist ein indirekter Moduswechsel, bei dem die Capture-Phase eingeleitet wird. In diesem Modus wird die vertikale Geschwindigkeit automatisch verringert, sodass das Flugzeug langsam auf die gewünschte Höhe „einschwebt“. Als schließlich die Geschwindigkeit von 160 Kn erreicht war, drückte der Pilot die IAS-Taste, um den Indicated-Airspeed-Hold-Modus zu aktivieren (⑥). Überraschend für den Piloten schwebte das Flugzeug nicht auf die intendierte Höhe von 4000 Fuß ein, sondern stieg darüber hinaus, d.h. die Höhe wurde „überschossen“.

Der Fehler in diesem Szenario besteht darin, dass der Proband den Indicated-Airspeed-Hold-Modus aktiviert, obwohl dies nicht mehr erlaubt ist, sobald der automatische Wechsel in die Capture-Phase stattgefunden hat. Betätigt der Pilot dennoch die IAS-Taste, wird dadurch dieser Modus zwar aktiviert, aber gleichzeitig auch der Altitude-Preselect-Modus deaktiviert. Durch die Deaktivierung werden die Capture-Phase und schließlich die gesamte Flugaufgabe abgebrochen. Der Grund dafür ist, dass beim Steigflug der Indicated-Airspeed-Hold-Modus ohne gleichzeitig armierten Altitude-Preselect-Modus nicht erlaubt ist. Ein Sinkflug wird auf analoge Weise durchgeführt, jedoch mit dem Unterschied, dass nicht die IAS, sondern die vertikale Geschwindigkeit (VS für vertical speed) stabilisiert werden muss. Dies wird bei einer empfohlenen VS von -1500 Fuß/Min mittels der VS-Taste vorgenommen. Analog zum Steigflug ist auch die VS-Taste in der Capture-Phase nicht erlaubt. Im Folgenden wird aufgrund der starken Durchführungsähnlichkeit nicht zwischen Sink- und Steigflug unterschieden. Deshalb wird nachfolgend auch allgemein von der VS/IAS-Taste zur Durchführung der Stabilisierungsaktion gesprochen.

Bzgl. der Stabilisierungsaktion (VS/IAS-Taste) verhält sich der Autopilot inkonsistent: Beim Betätigen der Taste vor der Capture-Phase wird der Stabilisierungs-Modus (entweder Indicated-Airspeed-Hold oder Vertical-Speed-Hold) aktiv, der Altitude-Preselect-Modus bleibt armiert und die Aufgabe wird korrekt beendet; beim Betätigen der Taste in der Capture-Phase hingegen wird der Altitude-Preselect-Modus deaktiviert und die Aufgabe abgebrochen. Somit liegt hier ein Entscheidungspunkt vor, wobei die Stabilisierungsaktion entweder durchgeführt werden darf oder nicht. Deshalb muss der Pilot jedes Mal vor der Aktion die Modusanzeige (mode annunciation) überprüfen und sich dann situationsadäquat verhalten. Ein Großteil der beobachteten Fehler passierte an solchen Entscheidungspunkten. Bedienungsfehler waren bei den Aufgaben zur Durchführung eines Steig- bzw. Sinkflugs (CHANGE-ALTIITUDE) und zum Einschalten des Autopiloten mit anschließender

LÜDTKE, A., MÖBUS, C., *Automatisierte Prognose von Bedienungsfehlern bei der Entwicklung von Pilotenassistenzsystemen*. In M. GRANDT (Hrsg.), *Verlässlichkeit der Mensch-Maschine-Interaktion*, 46. Fachausschussitzung Anthropotechnik der Deutschen Gesellschaft für Luft- und Raumfahrt e. V. DGLR-Bericht 2004-03, S. 241 - 270, Bonn: Deutsche Gesellschaft für Luft- und Raumfahrt, 2004, ISBN 3-932182-36-7.

Modusauswahl (ENGAGE-AUTOFLIGHT) zu verzeichnen. Im Detail werden in diesem Text die Ergebnisse bzgl. der Aufgabe CHANGE-ALTITUDE (CA) dargestellt. Die Ergebnisse bzgl. ENGAGE-AUTOFLIGHT können hier nur im Überblick aufgeführt werden, sodass auf eine ausführlichere Darstellung bei Lüdtkke (2004) verwiesen sei. Tabelle 1 enthält eine kurze Beschreibung der Entscheidungspunkte der Aufgabe CA.

**Tabelle 1: Entscheidungspunkte bei der Bedienung des Autopiloten**

Aufgabe	von Entscheidungspunkt betroffene Taste	Optionen	Bedingung
CHANGE-ALTITUDE	VS/IAS-Taste (IAS-Taste bei Steigflügen und VS-Taste bei Sinkflügen) <sup>1</sup>	Betätigen	Stabilisierungsmodus noch nicht aktiv und Zielwert erreicht (Geschwindigkeit von 160 Kn, bei Steigflügen, bzw. vertikale Geschwindigkeit $\leq -1500$ Fuß/Min., bei Sinkflügen) und zu diesem Zeitpunkt ist die Capture-Phase noch nicht eingetreten
		Nicht Betätigen	falls die Bedingung für Betätigen nicht erfüllt ist
	ALTS-Taste	Betätigen	Altitude-Preselect-Modus ist noch nicht armiert
		Nicht Betätigen	Altitude-Preselect-Modus ist bereits armiert
	ETRIM-Taste	Betätigen	Capture-Phase noch nicht eingetreten
		Nicht Betätigen	Capture-Phase bereits eingetreten

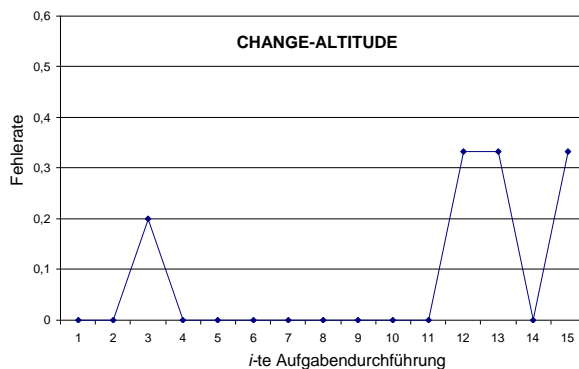
An den Entscheidungspunkten des untersuchten Autopiloten müssen die Piloten jeweils eine Wahl treffen zwischen Betätigen und nicht Betätigen. Inkorrektes Betätigen führt zu einem „Failure of Commission“. Wird ein notwendiges Betätigen unterlassen, liegt ein „Failure of Omission“ vor. Im Training kommt es vor, dass entweder das Betätigen oder das Nicht-Betätigen zur Routine wird. Beispielsweise wird das Durchführen der Stabilisierungsaktion (VS/IAS-Taste) zur Routine, weil in den meisten Fällen die notwendigen 160 Kn (bzw. -1500 Fuß/Min) erreicht werden, bevor die Capture-Phase eingetreten ist. Die empirischen Daten der Simulatorstudie belegen, dass den Probanden der Entscheidungspunkt zu Beginn des Trainings durchaus bewusst ist und dass sie auch in der Lage sind, sich hier korrekt zu verhalten. Deutlich zeigt dies die Verbalisierung von Proband A bei der fünften Durchführung der Aufgabe CA:

Co-Pilot: " Kann man gut IAS [Abkürzung für Indicated-Airspeed-Hold-Modus] nehmen, aber das passt ja auch so (...). Wenn man aus größeren Höhen kommt geht das wahrscheinlich besser."

Proband A: "Ja, aber jetzt captured er gleich [gemeint ist der Übergang in die Capture-Phase], da lass ich das lieber."

Zu Beginn ist also das Wissen für ein korrektes Verhalten bzgl. der Stabilisierung vorhanden. Später kommt es dabei zu Bedienungsfehlern. Um mögliche Routineeffekte genauer zu untersuchen, werden für jeden Probanden der zeitliche Verlauf der Fehlerrate und anschließend die vorherrschenden Situationen bei den Aufgabendurchführungen analysiert.

<sup>1</sup> Die Stabilisierung wird bei einem Steigflug mit der IAS- und bei einem Sinkflug mit der VS-Taste vorgenommen. Für die Analyse der Aufgabendurchführungen ist diese Unterscheidung nicht relevant. Wichtig ist lediglich, ob der Proband stabilisiert hat oder nicht. Deshalb sollen die beiden Tasten im Folgenden vereinfachend als VS/IAS-Taste bezeichnet werden.



**Abbildung 3: Verlauf der Fehlerrate für Proband A**

Abbildung 3 zeigt den Verlauf von Proband A bei der Aufgabe CA. Auf der x-Achse ist die Zeit als  $i$ -te Aufgabendurchführung eingetragen. Auf der y-Achse wird die Fehlerrate als Anzahl der Fehler bei der  $i$ -ten Aufgabendurchführung in Relation zur Anzahl der Aktionen bei der  $i$ -ten Aufgabendurchführung angegeben. Es zeigt sich, dass zu Beginn Fehler auftreten, dann eine gewisse Zeit nicht, bis schließlich wieder Bedienungsfehler zu verzeichnen sind. Interessant ist das Phänomen des plötzlichen Anstiegs der Fehlerrate nach einer zunächst fehlerfreien Phase. Die Fehlerraten der Probanden B und D sind im Anhang (Abbildung 13) zu finden. Das Phänomen des plötzlichen Anstiegs zeigt sich hier ebenfalls im Verlauf von Proband B jedoch nicht bei Proband D. Die letztere Sequenz hebt sich allerdings von den anderen dadurch ab, dass Proband durchgängig einen Motorikfehler begeht. Die Fehlerrate von Proband C liegt konstant bei 0 (keine Bedienungsfehler) und wird deshalb nicht abgedruckt. Die Fehlerraten der Aufgabe ENGAGE-AUTOFLIGHT bestätigen den Eindruck eines plötzlichen Fehleranstiegs nach einer fehlerfreien Phase, wobei aber auch hier ein Verlauf aus der Reihe fällt, was sich allerdings ebenfalls auf einen durchgängigen Bedienungsfehler zurückführen lässt (Luedtke 2004).

Im Folgenden werden die Bedienungsfehler der Aufgabendurchführungen, bei denen das Phänomen des plötzlichen Fehlerratenanstiegs zu beobachten ist, genauer untersucht. Fehler zu Beginn lassen sich meist durch mangelnde Praxis erklären. Diese Phase sollte allerdings kurz sein, weil die Probanden vor dem ersten Simulatorflug bereits das Type Rating durchlaufen und erfolgreich abschließen mussten. Dabei wurden die grundsätzlichen Prozeduren bereits am Part-Task-Simulator praktisch geübt. Wie lassen sich die späteren Fehler erklären? Zur Beantwortung dieser Frage soll das Verhalten an den Entscheidungspunkten näher analysiert werden. In der folgenden Analyse wird auf die Tabellen 3-5 im Anhang Bezug genommen. In diesen Tabellen sind in den Zeilen jeweils die an einem Entscheidungspunkt aufgetretenen Situationen gezeigt. Die Situationen werden jeweils durch die aktuellen Werte der aus Tabelle 1 bekannten Bedingungsvariablen, das normative Verhalten und das tatsächlich vom Probanden gezeigte Verhalten charakterisiert. Die folgende Untersuchung bestätigt, was sich oben bereits bei Proband A angedeutet hat: Zu Beginn sind die Probanden grundsätzlich in der Lage, sich korrekt zu verhalten; Fehler treten erst auf, nachdem über eine gewisse Anzahl von Aufgabenwiederholungen immer dasselbe Verhalten verlangt war und plötzlich eine abweichende Situation eintritt, in der das Verhalten umgestellt werden muss.

- **Verhalten von Proband A:** Untersucht werden die Entscheidungspunkte bzgl. der VS/IAS- und ALTS-Taste. Proband A hat Aufgabe CA 15 Mal durchgeführt.

**Entscheidungspunkt bzgl. VS/IAS-Taste:** Bei den ersten beiden Durchführungen wird die VS/IAS-Taste nicht betätigt, obwohl die Voraussetzungen gegeben sind (Tabelle 3). Der Fluglehrer macht ihn darauf aufmerksam und erklärt die korrekte Bedienung. Bei der 15. Durchführung (CA15) begeht er den oben geschilderten Bedienungsfehler aus Abbildung 2: Die Stabilisierung wird durchgeführt, obwohl der Zielwert erst in der Capture-Phase erreicht wird. Eine mögliche Erklärung für diesen Fehler ist die Entstehung von Routine, denn in CA5 verhält sich der Proband noch korrekt (siehe auch Verbalisierung zwischen Co-Pilot und Proband A auf der vorangehenden Seite). Auch in CA5 wird der Zielwert erst in der Capture-Phase erreicht. Anschließend ist die Capture-Phase durchgehend bis einschließlich CA14 noch nicht eingetreten. In CA15 liegt nach neun Wiederholungen zum ersten Mal eine bzgl. der Capture-Phase abweichende Situation vor, und der Proband begeht den Fehler.

**Entscheidungspunkt bzgl. ALTS-Taste:** Die ALTS-Taste zur Armierung des Altitude-Preselect-Modus darf nur dann gedrückt werden, wenn der Modus nicht schon armiert ist. Bis einschließlich CA12 ist diese Voraussetzung jeweils erfüllt (Tabelle 4). Bei der 13. Aufgabendurchführung liegt zum ersten Mal eine abweichende Situation vor. Der Proband verhält sich jedoch wie bei den Durchführungen vorher und drückt die ALTS-Taste, obwohl der Altitude-Preselect-Modus bereits armiert und somit die Aktion unnötig ist. Durch Drücken der Taste wird der Modus wieder deaktiviert.

- **Verhalten von Proband B:** Untersucht wird der Entscheidungspunkt bzgl. der VS/IAS-Taste. Proband B hat die Aufgabe CA fünf Mal durchgeführt.

**Entscheidungspunkt bzgl. VS/IAS-Taste:** In CA1 bis 4 ist die Capture-Phase jeweils noch nicht erreicht. In CA5 kommt es schließlich zu einer Abweichung, die Capture-Phase ist bereits erreicht, aber der Proband betätigt trotzdem die VS/IAS-Taste.

Es zeigt sich, dass nach einer „längeren“ fehlerfreien Phase plötzlich wieder Bedienungsfehler auftreten. Die Analyse der Aufgabe EA zeigt 3 Routinefehler bei Proband A und einen bei Proband D (Lüdtke 2004). Diese Fehler bestätigen das genannte Ergebnis. Zusammenfassen lässt sich festhalten, dass die Analyse des Probandenverhaltens Hinweise dafür liefert, dass Bedienungsfehler dann auftreten, wenn über eine gewisse Anzahl von Aufgabenwiederholungen immer dasselbe Verhalten verlangt war und plötzlich eine abweichende Situation eintritt, in der das Verhalten umgestellt werden muss. Die identifizierten Abweichungen beziehen sich alle auf die aktuellen Modi des Autopiloten. Es zeigt sich weiterhin, dass die Probanden zu Beginn des Trainings grundsätzlich korrektes Wissen über die Entscheidungspunkte besitzen und auch in der Lage sind, dieses korrekt anzuwenden (siehe Proband A oben und Proband D bei Lüdtke (2004)). Dies lässt vermuten, dass das korrekte Wissen durch Routinebildung verlernt wird. Wird darüber hinaus berücksichtigt, dass die Bedienung eines Autopiloten eine sicherheitskritische Aufgabe ist, dann lässt sich die Routinebildung im Licht der oben beschriebenen Theorie gelernter Sorglosigkeit interpretieren. Die Berücksichtigung der aktuellen Modi des Autopiloten ist eine Sicherheitsmaßnahme, die einen zusätzlichen Aufwand bedeutet. Die Theorie gelernter Sorglosigkeit besagt, dass die Tendenz besteht, Sicherheitsmaßnahmen wegzulassen, um den Aufwand zu reduzieren. Dabei entsteht ein Zustand der Sorglosigkeit, der sich umso mehr verfestigt, je häufiger sich trotz des sicherheitswidrigen Handelns Erfolg einstellt und gefährliche Konsequenzen ausbleiben. Aus diesen Überlegungen haben wir die Hypothese abgeleitet, dass sich die Fehler an den Entscheidungspunkten durch die Theorie gelernter Sorglosigkeit erklären lassen. Die Piloten verzichten bewusst auf die Überprüfung der aktuellen Modi, wenn wiederholt derselbe Wert angezeigt wird, denn das Auslassen der Zustandsüberprüfung spart Zeit. Die in dieser Arbeit vertretende Fehlerklärungshypothese lautet:

*Durch den Flugbetrieb bildet sich bzgl. bestimmter Bedienungsaufgaben gelernte Sorglosigkeit, die, bei Vorhandensein kontraintuitiver Systemstrukturen, in „minimal“ abweichenden Situationen zu einer Gefahr werden kann, wobei die Auftretenswahrscheinlichkeit des gefährdenden Bedienungsfehlers von der Erfolgswahrscheinlichkeit des („Routine“-)Verhaltens und der Seltenheit sowie der Qualität der Abweichung abhängig ist.*

## Das Kognitive Model

Zum Zweck der Prognose von Bedienungsfehlern haben wir ein kognitives Modell des Pilotenverhaltens, insbesondere der Entstehung gelernter Sorglosigkeit, erstellt. Diese Prognose soll im Rahmen eines Cognitive Engineering Prozesses anwendbar sein. Cognitive Engineering bedeutet die Entwicklung interaktiver Systeme orientiert an den Fähigkeiten und Grenzen der menschlichen Kognition. Gelernt wird nach Hofstätter (1957, S. 195) in Folge von Erfahrungen: „Veränderungen in der Wahrscheinlichkeit, mit der Verhaltensweisen in bestimmten Reizsituationen auftreten, bezeichnet man als Lernen, sofern diese nicht durch Verletzung eines Organismus oder spontan im Zuge der Reifung zustande kommen, sondern auf frühere Begegnungen mit dieser oder einer ähnlichen Reizsituation zurückgehen.“ Somit kann ein Lernprozess nicht isoliert ohne die vorausgehende Aufgabenbearbeitung analysiert werden. Deshalb wird für das Pilotenmodell ein Zyklus zugrunde gelegt, in dem das Modell agiert, anschließend lernt und das Gelernte im nächsten Zyklus sofort anwendet. Dieser Zyklus wird innerhalb einer Simulationsplattform durchgeführt, die das Pilotenmodell einerseits mit einer kommerziellen Flugsimulatorsoftware und andererseits mit dem industriellen Case Tool Statemate (Harel & Politi 1999) integriert und für das Scheduling und den Datenaustausch sorgt.



LÜDTKE, A., MÖBUS, C., *Automatisierte Prognose von Bedienungsfehlern bei der Entwicklung von Pilotenassistenzsystemen*. In M. GRANDT (Hrsg.), *Verlässlichkeit der Mensch-Maschine-Interaktion*, 46. Fachausschussitzung Anthropotechnik der Deutschen Gesellschaft für Luft- und Raumfahrt e. V. DGLR-Bericht 2004-03, S. 241 - 270, Bonn: Deutsche Gesellschaft für Luft- und Raumfahrt, 2004, ISBN 3-932182-36-7.

Innerhalb dieser Plattform soll das Pilotenmodell angewendet werden, um ein neues mit State-Mate entworfenes Design eines Cockpitgerätes auf die Bedienbarkeit zu analysieren, genauer, es soll untersucht werden, ob bei der Bedienung des Gerätes gelernte Sorglosigkeit zu erwarten ist.

Dem kognitiven Modell unterliegt die Annahme, dass sich die menschliche Kognition als Informationsverarbeitungsprozess (Newell & Simon 1972) beschreiben lässt, der visuellen und akustischen Input erhält und auf Basis kognitiver Mechanismen Output in Form von Bedienaktionen erzeugt. Die Architektur des Modells orientiert sich an den Architekturen klassischer kognitiver Modelle wie ACT-R (Anderson & Lebiere 1998) und SOAR (Laird, Newell & Rosenbloom 1987). Kognitive Architekturen bieten einen Rahmen zur Modellierung und Analyse menschlichen Verhaltens. Die Konzeption kognitiver Architekturen basiert auf Erkenntnissen der Kognitionspsychologie und ist somit theoretisch fundiert. Daher kann die kognitive Modellierung als Schnittstelle zwischen den Theorien der Kognitionspsychologie und der Anwendung dieser Theorien betrachtet werden (Gray & Altmann 1999). Dabei wird die anwendungsspezifische Erstellung eines kognitiven Modells erleichtert, weil durch die Architektur bereits bestimmte Mechanismen vorgegeben sind und deshalb nicht mehr ad-hoc erstellt werden müssen. Die starke theoretische Fundierung kognitiver Architekturen bringt aber auch mit sich, dass die enthaltenen Mechanismen lediglich unter Laborbedingungen untersucht wurden. Nur unter Laborbedingungen lassen sich kontrollierte Experimente zur Validierung der modellierten Aspekte durchführen. Ziel der Kognitionspsychologie ist es, ein möglichst genaues Modell menschlichen Verhaltens zu entwickeln. Hiervon unterscheidet sich das Ziel des Cognitive Engineering. Beim Cognitive Engineering müssen die Vorhersagen über menschliches Verhalten nur in soweit exakt sein, als dass sie eine Unterscheidung zwischen alternativen Systementwürfen ermöglichen. Solange diese Maßgabe nicht verletzt wird, kann von irrelevanten Details kognitiver Prozesse abstrahiert werden. Aus diesem Grund wird das Pilotenmodell dieser Arbeit nicht im Rahmen einer bestimmten kognitiven Architektur A oder B realisiert. Vielmehr werden aus unterschiedlichen Architekturen die Aspekte übernommen und adaptiert, die für das Modellierungsziel der Vorhersage gelernter Sorglosigkeit relevant sind.

Unser kognitives Modell besteht aus einer Wissensbasis, einem Kurzzeitgedächtnis, einer Wissensverarbeitungskomponente und einer Lernkomponente als zentralem Element. Diese Architektur ist Aufgaben und Domänen unabhängig. Um eine Anpassung an eine spezifische Aufgabe zu erreichen, wird die Wissensbasis mit einem Aufgabenmodell geladen. Das Aufgabenmodell beschreibt das Wissen, das notwendig ist, um die Aufgabe korrekt durchzuführen. Dieses Wissen wird in Form von Goal-State-Means Produktionsregeln (Lüdtke & Möbus 2004) modelliert. Abbildung 4 zeigt das generelle Schema dieser Regeln. Der Goal- und der State-Teil bilden den Regelkopf, der Means- und der Subgoal-Teil den Regelkörper. Der State-Teil der Regeln besteht aus Booleschen Ausdrücken (*bool*) über Umgebungsvariablen und erlaubt dem Modell in einer dynamischen Umgebung zu agieren. Die Regel hat die Bedeutung: „*Wenn* das aktuelle Ziel mit dem Ziel im Goal-Teil übereinstimmt und die Umgebungsbedingungen im State-Teil erfüllt sind, *dann* führe die Aktionen im Means-Teil durch und bearbeite als nächstes die Subziele im Subgoal-Teil.“ Auf den Subzielen kann eine partielle Ordnung ( $\sqsubseteq$ ) definiert sein. Die Prädikate haben folgende Bedeutung: *goal* bezeichnet Ziele, *memory* bezeichnet Informationen aus dem Kurzzeitgedächtnis, *p\_act* steht für Perzept- und *m\_act* für physikalische Motoraktionen. Bei der Wissensverarbeitung werden entsprechend der aktuellen Umgebungssituation und des aktuellen Ziels Regeln aus der Wissensbasis ausgewählt und gefeuert. Dabei gelten folgende Verarbeitungsprinzipien:

- Ein Ziel wird nur dann abgearbeitet, wenn der zugehörige Zielzustand nicht schon zu Beginn erfüllt ist.
- Eine Zielbearbeitung wird solange wiederholt, bis der zugehörige Zielzustand erreicht ist.
- Bei der Regelverarbeitung wird immer erst der Means-Teil und erst anschließend der Subgoal-Teil ausgeführt.
- Aktionen im Means-Teil werden in einer beliebigen Reihenfolge ausgeführt

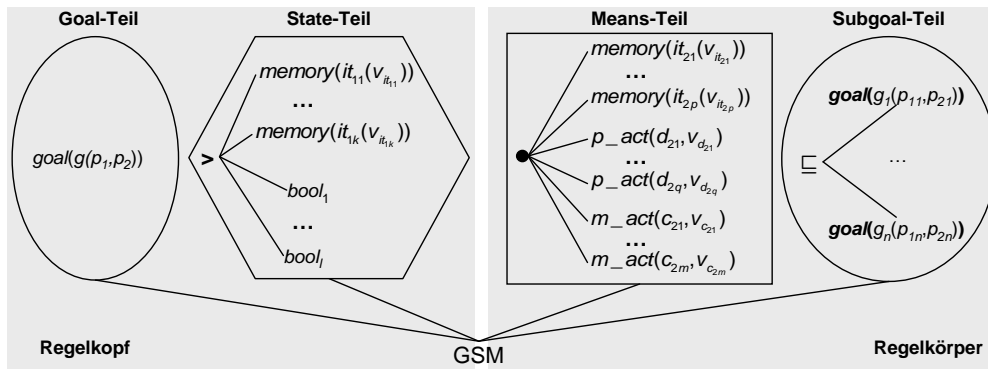
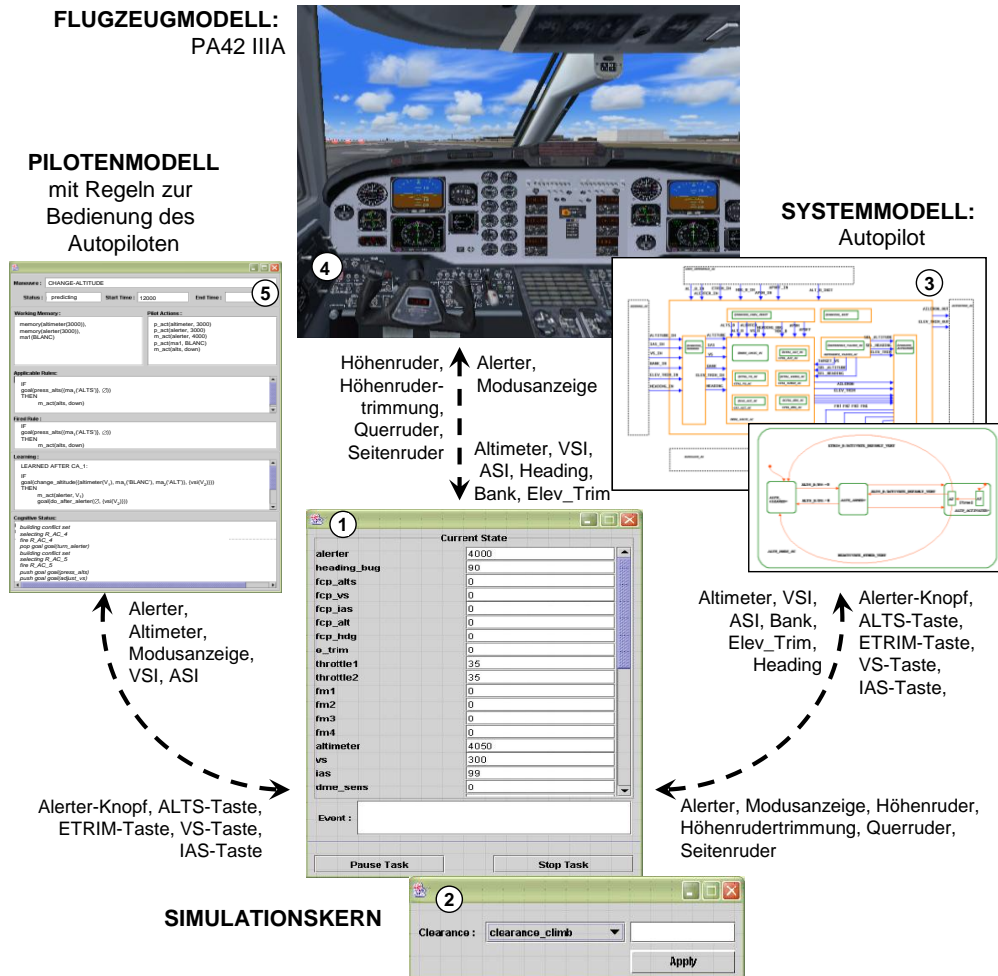


Abbildung 4: Schema der GSM-Regeln

Innerhalb der Lernkomponente ist die Entstehung gelernter Sorglosigkeit durch Regelkomposition modelliert. Dabei werden zwei mehrfach erfolgreich nacheinander angewendete Regeln zu einer einzigen verschmolzen, wobei die Regelköpfe und Regelkörper miteinander vereinigt werden. Entscheidend dabei ist, dass Regelemente die sowohl im Regelkörper der ersten als auch im Regelkopf der zweiten Regeln vorhanden sind, eliminiert werden. Durch diesen Prozess werden Planungsschritte (*goal*-Prädikate) und dabei unter bestimmten Bedingungen auch Überprüfungen von Umgebungsvariablen (*p\_act*-Prädikate) eliminiert. Zu Beginn enthält die Wissensbasis normative Regeln. Nach mehrmaliger erfolgreicher Durchführung von Flugaufgaben können sorglose Regeln entstehen. Diese werden aber erst dann angewendet, wenn deren Regelstärke größer ist, als die der zugehörigen normativen Regeln. Individuelle Unterschiede im Bezug auf den Grad an Sorglosigkeit können durch einen Sorglosigkeitsparameter nachgebildet werden. Die symbolische Regelkomposition wird im nächsten Abschnitt anhand von Beispielen bei der Prognose des Verhaltens von Proband B illustriert. Weitere Details zu dem Modell, insbesondere zu der subsymbolischen Berechnung der Regelstärke, können bei Lüttke (2004) nachgelesen werden.

## Vergleich von Modell- und Pilotenverhalten

Die folgende Darstellung illustriert, wie die einzelnen Simulationsläufe im Rahmen der Fallstudie unter Verwendung einer Simulationsplattform durchgeführt wurden. Die Simulation dient der Analyse der Interaktion mit einem Systementwurf jeweils unter dem Blickwinkel einer vorher festzulegenden Aufgabe. Untersucht wurden die Aufgaben CHANGE-ALTITUDE und ENGAGE-AUTOFLIGHT. Es wurde für beide Aufgaben eine Aufgabenanalyse durchgeführt. Als Ergebnis liegen die Bedienungsregeln im GSM-Format vor. Die Bedienungsregeln bilden das normative Bedienungsmodell. In Statemate wurde der formale Entwurf des Piper Cheyenne Autopiloten rekonstruiert. Dieses Modell beschränkt sich auf die Modi, die für die untersuchten Aufgaben relevant sind. Abbildung 5 zeigt, welche Daten zwischen den einzelnen Komponenten bei den Simulationsläufen der Fallstudie ausgetauscht werden. Für den Datenaustausch ist der Simulationskern zuständig. Über das Simulationsfenster (❶) kann der Benutzer der Plattform die aktuellen Werte aller vom Kern verwalteten Variablen einsehen. Zur Initiierung einer Flugaufgabe muss eine Fluglotsenanweisung in das entsprechende AirTrafficControl-Fenster (❷) eingegeben werden. Während der Simulation erhält das Modell des Autopiloten in Statemate die aktuellen Werte der Bedieninstrumente und Sensoren und ändert seinen internen Zustand. Die Oberfläche des Statemate Simulation Environments (❸) erlaubt es, den aktuellen Zustand des Autopiloten direkt im grafischen Systemmodell anzeigen zu lassen. Auf Basis des aktuellen Zustands berechnet das Autopilotenmodell Werte für die Modusanzeige, den Alerter und die Steuerflächen des simulierten Flugzeugs. Die Steuerflächenwerte werden vom Simulationskern an den Flight Simulator geschickt. Dort wird die gesamte Aerodynamik des Flugzeugs simuliert und Änderungen der Höhe, der Geschwindigkeiten und des Steuerkurses berechnet. Neben der Simulation der Aerodynamik dient der Flight Simulator zur Visualisierung der Flugdaten (❹). Das Pilotenmodell erhält alle Daten, die durch die Perzeptionen abgefragt werden. In entgegengesetzter Richtung sendet das Pilotenmodell Werte der Bedieninstrumente an die Plattform. Der interne Verarbeitungszustand des Pilotenmodells kann über das zugehörige Fenster (❺) eingesehen werden.



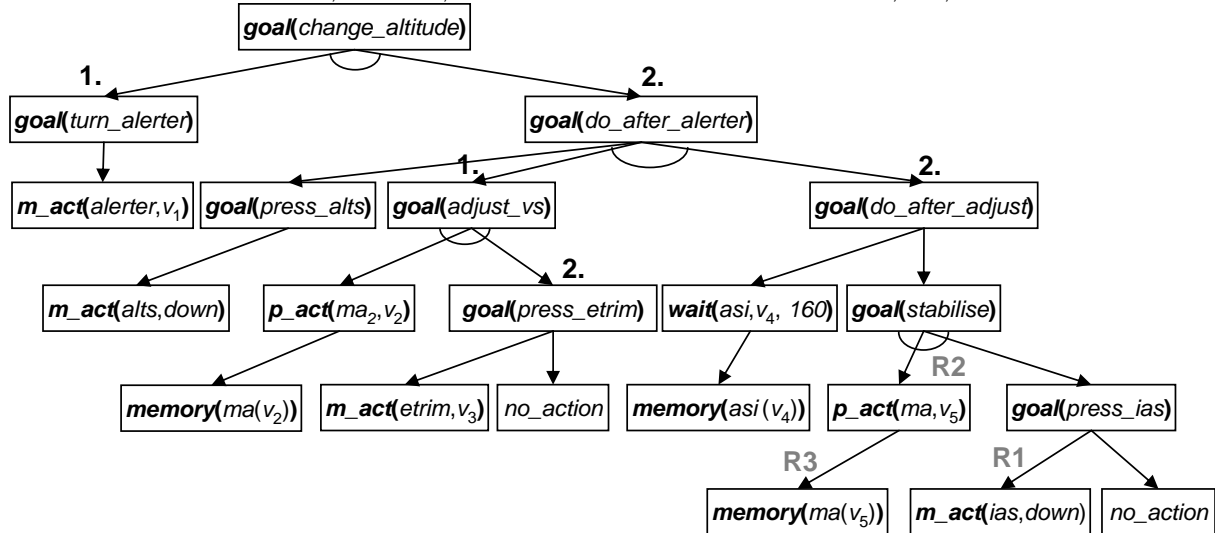
**Abbildung 5: Interaktion der Simulationskomponenten**

Unter Verwendung dieser Plattform wurden die Aufgaben in den Szenarien nachgespielt, die auch von den Probanden bewältigt werden mussten. Im Folgenden wird der Vergleich zwischen dem Probanden- und Modellverhalten beschrieben, um die Prognosefähigkeit des Pilotenmodells zu beurteilen. Dargestellt wird hier der Vergleich mit den Aufgabenprotokollen von Proband B.

### Prognose des Verhaltens von Proband B

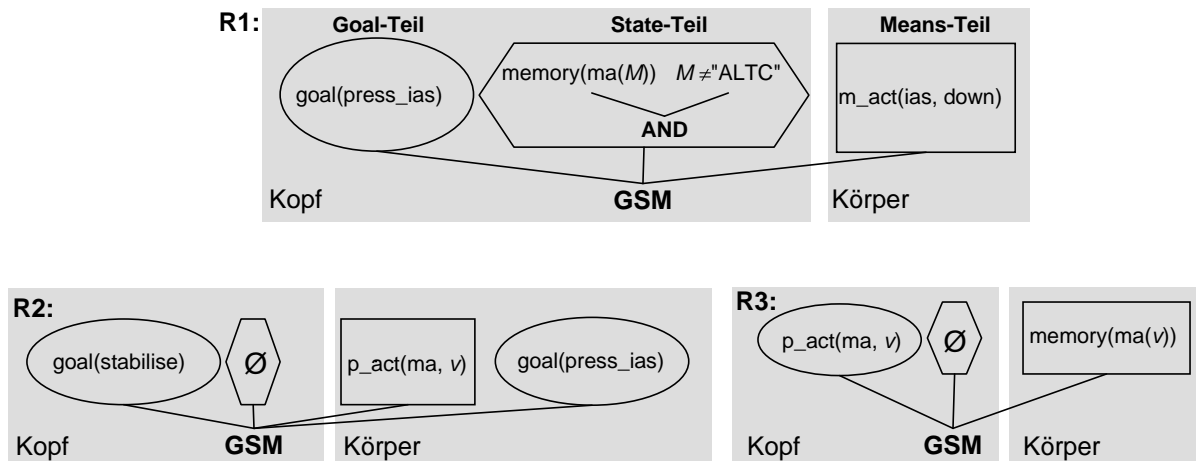
Von Proband B werden die Szenarien der Aufgabe CHANGE-ALTITUDE verwendet. Bei der Aufgabe ENGAGE-AUTOFLIGHT begeht Proband B durchgängig einen Reihenfolgefehler, sodass bei der Aufgabe keine Lerneffekte zu erwarten sind.

Für die Prognose wird das Pilotenmodell mit den normativen Bedienungsregeln im GSM-Format geladen. GSM-Regeln lassen sich als *Kontrollstruktur* in Form eines Baums darstellen. Kontrollstrukturen enthalten in den Knoten die Elemente aus den Goal-, State- und Means-Teilen der Regeln. Die Kanten stehen für Beziehungen, die in den Regeln modelliert sind: Beziehungen zwischen Zielen und Subzielen und Beziehungen zwischen Zielen und Mitteln. Partielle Ordnungen auf Subzielen werden durch die Nummerierungen der Knoten repräsentiert. Abbildung 6 zeigt die normative Kontrollstruktur der Aufgabe CHANGE-ALTITUDE.



**Abbildung 6: Normative Kontrollstruktur für die Aufgabe CHANGE-ALTITUDE**

Abbildung 7 zeigt drei Regelbeispiele (R1, R2 und R3). In Abbildung 6 ist gekennzeichnet, welchen Teil der Kontrollstruktur sie definieren. Die Bedeutung der Regel R1 lautet: WENN es das aktuelle Ziel ist, die IAS-Taste zu drücken und die Modusanzeige (ma) zeigt nicht an, dass der Capture-Modus ("ALTC") aktiv ist, DANN ist das Drücken der IAS-Taste erlaubt. Der aktuelle Zustand im State-Teil wird in zwei Stufen abgefragt: Erst wird mittels des Prädikats  $memory(ma(M))$  der Wert der Modusanzeige aus dem Kurzzeitgedächtnis abgerufen, anschließend wird der Wert durch  $M \neq "ALTC"$  abgefragt. Werte aus der Umgebung werden durch Perzeptaktionen, die grundsätzlich den Motoraktionen vorangehen, gelesen. In der Regel R2 wird das Ziel die IAS zu stabilisieren durch eine Perzeptaktion auf die Modusanzeige ( $p\_act(ma, v)$ ) und danach durch Ableiten des Subziels für das Betätigen der IAS-Taste erfüllt (dieses Subziel ist gleichzeitig das Hauptziel von R1). Der State-Teil ist hier leer. Ein gelesener Wert wird jeweils durch eine spezielle GSM-Regel in das Kurzzeitgedächtnis geschrieben. Die Regel R3 wird beispielsweise ausgewählt, nachdem R2 die Perzeptaktion auf die Modusanzeige abgeleitet hat. Dabei wird die Perzeptaktion mental zu einem Ziel umgeformt, das darin besteht, sich den gelesenen Wert zu merken.

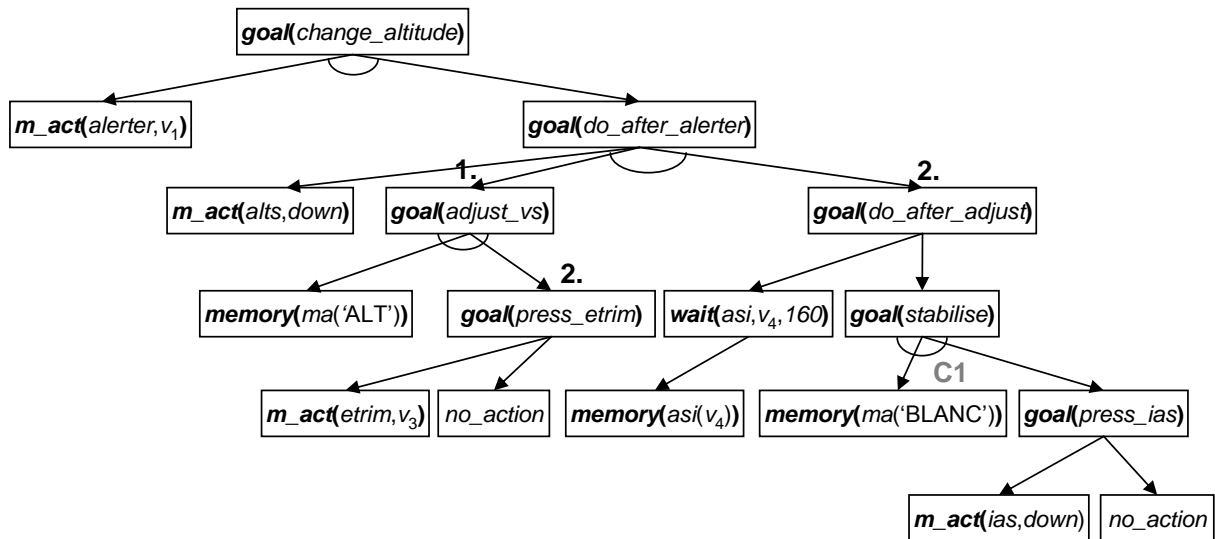


**Abbildung 7: Beispiele für GSM-Regeln**

Unter Verwendung der normativen Bedienungsregeln wurde das Modellverhalten sukzessive in den Szenarien von Proband B mit einem Sorglosigkeitsfaktor von 0,5 simuliert. Dieser Faktorwert hat zur Folge, dass sich das Verhalten des Modells aufgrund der Regelkomposition nach jeder zweiten Aufgabendurchführung ändert, wenn sich die simulierten Szenarien kaum unterscheiden, d.h. wenn dieselben Regeln zweimal hintereinander mit denselben Variablenbelegungen angewendet werden konnten. Die normative Kontrollstruktur wird dabei zum ersten Mal nach CA2 modifiziert. Die folgende Tabelle zeigt die möglichen Aktionsreihenfolgen des Modells und die tatsächlichen des Probanden bei den ersten beiden Aufgabendurchführungen (CA1, 2):

<b>Aufgabe</b>	CA1, 2
<b>Mögliche Reihenfolgen des Modells</b>	S1: < ALERTER-Knopf, ALTS-Taste, ETRIM-Taste, VS-Taste > S2: < ALERTER-Knopf, ETRIM-Taste, ALTS-Taste, VS-Taste > S3: < ALERTER-Knopf, ETRIM-Taste, VS-Taste, ALTS-Taste >
<b>Reihenfolgen des Probanden</b>	CA1: < ALERTER-Knopf, ALTS-Taste, ETRIM-Taste, VS-Taste > CA2: < ALERTER-Knopf, ALTS-Taste, ETRIM-Taste, VS-Taste >

Die auf den Subzielen *press\_alts*, *adjust\_vs* und *do\_after\_adjust* definierte partielle Ordnung erlaubt es, die ALTS-, ETRIM- und VS-Taste in drei unterschiedlichen Reihenfolgen (S1-3) zu betätigen. Proband B hat in CA1 und CA2 jeweils die erste Variante gewählt. Bei der folgenden Aufgabendurchführung (CA3) verwendet das Modell zum ersten Mal eine verkürzte Kontrollstruktur (Abbildung 8).



**Abbildung 8: Reduzierte Kontrollstruktur nach CA2 bei Proband B**

Die folgende Tabelle zeigt die Aktionsreihenfolgen des Modells und des Probanden in CA3 und 4:

<b>Aufgabe</b>	CA3, 4
<b>Mögliche Reihenfolgen des Modells</b>	S1: < ALERTER-Knopf, ALTS-Taste, ETRIM-Taste, VS-Taste >
<b>Reihenfolgen des Probanden</b>	CA3: < ALERTER-Knopf, ALTS-Taste, ETRIM-Taste, VS-Taste > CA4: < ALERTER-Knopf, ALTS-Taste, ETRIM-Taste, VS-Taste >
<b>Sorglosigkeit des Modells</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Überprüfung des Zielzustands für die Aktivierung des Altitude-Preselect-Modus nicht mehr möglich (Ziel <i>press_alts</i> wurde eliminiert)</li> <li>• Check der Modusanzeige vor IAS-Taste entfällt.</li> <li>• Check der Modusanzeige vor ETRIM-Taste entfällt.</li> </ul>
<b>Sorglosigkeit des Probanden</b>	Der Proband verhält sich korrekt.

Durch die Reduzierung der Kontrollstruktur werden die möglichen Aktionsreihenfolgen eingeschränkt. Das Modell kann nur noch eine Reihenfolge durchführen. Das liegt daran, dass kein explizites Ziel zur Durchführung der ALTS-Taste mehr vorhanden ist. Die zugehörige Bedienaktion befindet sich jetzt im Means-Teil der Regel zur Abarbeitung des Ziels *do\_after\_alerter*. Aufgrund der Verarbeitungsprinzipien von GSM-Produktionsregeln wird der Means-Teil immer vor dem Subgoal-Teil verarbeitet. Deshalb wird immer zuerst die ALTS-Taste betätigt. Mit der Bildung dieses Kompositums ist zudem Sorglosigkeit entstanden. Weil das Ziel zur Durchführung der ALTS-Taste eliminiert wurde, entfällt auch die Überprüfung des zugehörigen Zielzustands. Deshalb würde das Modell in einem Szenario, in dem Altitude-Preselect-Modus bereits zu Beginn armiert ist, einen Fehler begehen. Das Modell würde nicht bemerken, dass der Modus bereits armiert ist und inkorrektweise die ALTS-Taste drücken. Dies würde zur Dearmierung des Modus führen.

Weiterhin entfällt durch Regelkomposition die Prüfhandlung sowohl vor dem Betätigen der ETRIM-Taste als auch vor der IAS-Taste. Das Modell geht jeweils ohne Überprüfung davon aus, dass auf der Modusanzeige ( $ma_2$ ) „ALT“ bzw. „BLANC“ angezeigt werden. „ALT“ ist der Wert, der bei den letzten Aufgabendurchführungen jeweils vor dem Drücken der ETRIM-Taste angezeigt wurde, und „BLANC“ ist der Wert, der jeweils vor dem Betätigen der IAS-Taste zu sehen war. In Abbildung 9 ist das Kompositum C1 zur Betätigung der IAS-Taste zu sehen. C1 ist durch Komposition der Regeln R2 und R3 entstanden. Hier wurde die Perzeptaktion eliminiert, weil sie sowohl im Regelkörper von R2 als auch im Regelkopf von R3 vorhanden ist. Das Kompositum speichert unabhängig vom tatsächlichen Wert in der Umgebung immer „BLANC“ im Kurzzeitgedächtnis. Da weder CA3 noch CA4 kritische Szenarioeigenschaften für die drei geschilderten Sorglosigkeitsquellen aufweisen, kann keine Aussage darüber gemacht werden, ob Proband B sich ebenfalls sorglos verhalten würde.

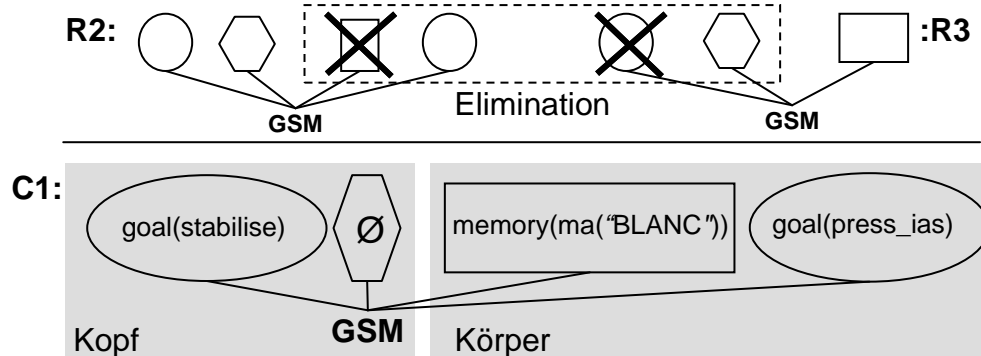


Abbildung 9: Komposition von R2 und R3

Nach CA4 wird eine weitergehend reduzierte Kontrollstruktur gebildet, die dann in CA5 zur Anwendung kommt (Abbildung 10).

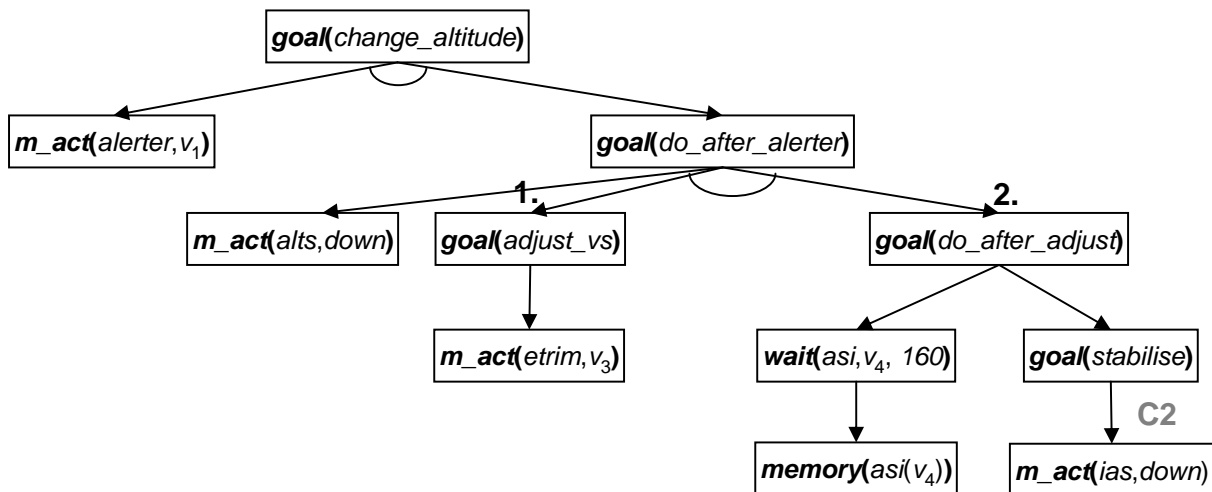


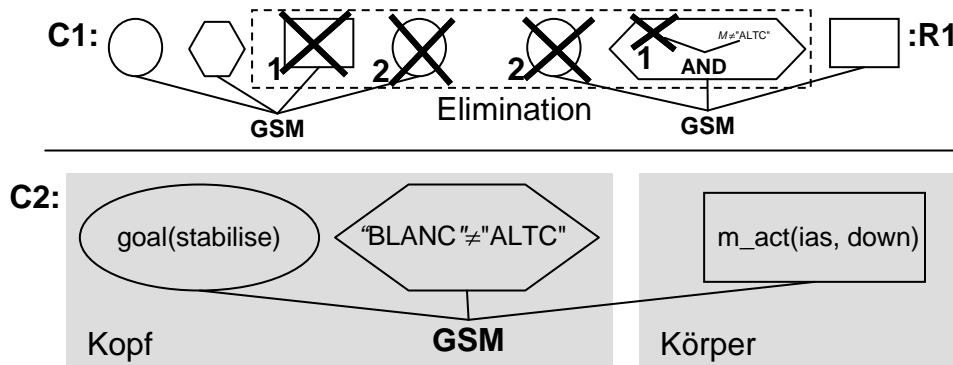
Abbildung 10: Reduzierte Kontrollstruktur nach CA4 bei Proband B

Die folgende Tabelle zeigt die Aktionsreihenfolgen des Modells und des Probanden in CA5:

<b>Aufgabe</b>	CA5
<b>Mögliche Reihenfolgen des Modells</b>	S1: < ALERTER-Knopf, ALTS-Taste, ETRIM-Taste, VS-Taste >
<b>Reihenfolge des Probanden</b>	CA5: < ALERTER-Knopf, ALTS-Taste, ETRIM-Taste, <b>VS-Taste</b> >
<b>Sorglosigkeit des Modells</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Überprüfung des Zielzustands für die Aktivierung des Altitude-Preselect-Modus nicht mehr möglich.</li> <li>• IAS-Taste wird völlig unabhängig von der Modusanzeige betätigt.</li> <li>• ETRIM-Taste wird völlig unabhängig von der Modusanzeige betätigt.</li> </ul>

**Sorglosigkeit des Probanden** CA5: IAS-Taste wird in der Capture-Phase betätigt.

Bzgl. der möglichen Reihenfolge findet keine Veränderung statt, aber die in der Kontrollstruktur enthaltene Sorglosigkeit weitet sich aus. Die ETRIM- und IAS-Taste werden völlig unabhängig von der Modusanzeige betätigt. Es entsteht unter anderen das Kompositum C2 (Abbildung 11). C2 entsteht durch verschmelzen von C1 mit R1. In dieser Regel ist der State-Teil immer erfüllt, sodass vor Betätigen der IAS-Taste der Umgebungszustands überhaupt nicht mehr in Betracht gezogen wird. Die Handlungsweise von Proband B bestätigt diese Sorglosigkeitsannahme. In CA5 wird eine sehr hohe vertikale Geschwindigkeit (-2000 Fuß/Min.) eingestellt, sodass der automatische Übergang in die Capture-Phase ungewöhnlich früh erfolgt. Proband B bemerkt dies nicht und betätigt die IAS-Taste, obwohl dies nicht mehr erlaubt ist.



**Abbildung 11: Komposition von C1 mit R1**

Die Prognose bis zur fünften Aufgabendurchführung zeigt, dass durch Regelkomposition das Potential für Sorglosigkeit ausgeweitet und die möglichen Aktionsreihenfolgen eingeschränkt werden. Im Hinblick auf die Aktionsreihenfolgen ist unter Berücksichtigung so genannter Interleaveeffekte ein weiterer Trend möglich: Regelkomposition kann dazu führen, dass mehrere Bedienaktionen im selben Means-Teil enthalten sind; dadurch werden alle Restriktionen bzgl. der Reihenfolge aufgehoben. Um auch diesen Trend zu illustrieren, ist in Abbildung 12 die maximal mögliche Verkürzung der Kontrollstruktur für CHANGE-ALTITUDE dargestellt. Bei dieser maximalen Reduzierung sind folgende Aktionsreihenfolgen möglich:

<b>Mögliche Reihenfolgen des Modells</b>	S1: < ALERTER-Knopf, ALTS-Taste, ETRIM-Taste, VS-Taste > S2: < ALERTER-Knopf, ETRIM-Taste, ALTS-Taste, VS-Taste > S4: < ALERTER-Knopf, ETRIM-Taste, ALTS-Taste, ETRIM-Taste, VS-Taste >
<b>Sorglosigkeit des Modells</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Überprüfung des Zielzustands für die Aktivierung des Altitude-Preselect-Modus nicht mehr möglich.</li> <li>• Überprüfung des Zielzustands für die Aktivierung des Stabilisierungsmodus nicht mehr möglich.</li> <li>• IAS-Taste wird völlig unabhängig von der Modusanzeige betätigt.</li> <li>• ETRIM-Taste wird völlig unabhängig von der Modusanzeige betätigt.</li> <li>• Warten auf den Stabilisierungswert entfällt.</li> </ul>

Die Tabelle zeigt, dass jetzt wieder mehr Aktionsreihenfolgen möglich sind. Dies liegt daran, dass die ETRIM- und ALTS-Taste im selben Means-Teil enthalten sind und deshalb in einer beliebigen Reihenfolge durchgeführt werden können. Darüber hinaus entfallen sämtliche Zustandsüberprüfungen, wodurch weitere Sorglosigkeit entsteht. Erhalten bleiben in der Kontrollstruktur lediglich die Bedienaktionen und die Reihenfolgeziele. Letztere werden aufgrund bestimmter Einschränkungen der Regelkomposition (Persistenz von Reihenfolgezielen, siehe Lüdtké (2004)) nicht eliminiert.

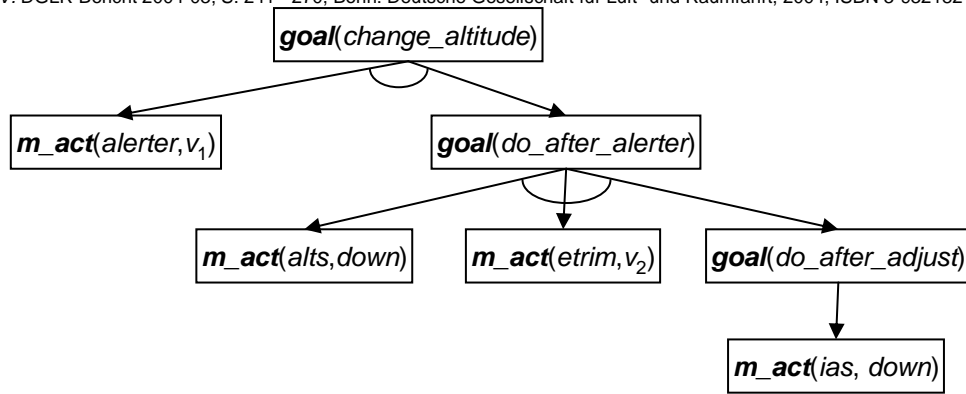


Abbildung 12: Maximale Kontrollstrukturreduktion für die Aufgabe CA

## Zusammenfassung

Die Verhaltensprognosen für die Probanden C und D können bei Lüdtkke (2004) nachgelesen werden. Tabelle 2 zeigt, welche der prognostizierten Verhaltensweisen durch die Daten bestätigt werden und welche nicht. Die Tabelle verdeutlicht zwei Ergebnisse:

- (1) Der Vergleich der prognostizierten und tatsächlichen Sorglosigkeit zeigt, dass die Routinefehler von Proband B in CA5 und von Proband D in EA9 korrekt vorhergesagt werden. Diese Fehler dienten oben neben weiteren Fehlern als Grundlage für die Ableitung der Fehlererklärungshypothese. Das Modell beinhaltet weitere Sorglosigkeit, die aber nicht zum Tragen kommen kann, weil keine entsprechenden Szenarien vorliegen. Diese Prognosen sollen als *latente Fehler* bezeichnet werden. Diese Bezeichnung wird auch von Reason (1994) verwendet, um eine Abgrenzung zu aktiven Fehlern vorzunehmen. Fehler sind aktiv, wenn sie bereits aufgetreten sind, während latente Fehler noch ruhende Fehler sind, die erst spürbar werden, wenn sie mit situativen Auslösern zusammenkommen. Eine Aussage zur Validität der latenten Fehler des Pilotenmodells kann aufgrund der Datenlage nicht getroffen werden.
- (2) Der Vergleich der vom Modell vorhergesagten und der tatsächlichen Aktionssequenzen zeigt kein eindeutiges Bild. Das Modell prognostiziert zum Teil Sequenzen, die sich nicht im Probandenverhalten widerspiegeln. Auf der anderen Seite wendet Proband C teilweise Sequenzen an, die durch das Modell nicht zugelassen sind. Für eine genauere Aussage wäre eine kontrollierte empirische Studie mit einer Gruppe von  $n$  Piloten, die alle dieselben Szenarien fliegen, notwendig. Das  $n$  müsste hinreichend groß gewählt werden. Eine derartige Studie wurde in der vorliegenden Arbeit nicht durchgeführt.

Hinsichtlich der Aktionssequenzen soll die charakteristische Änderung der Verhaltensvarianz des Pilotenmodells festgehalten werden: Mit zunehmender Kompositabildung wird die Anzahl der vorhergesagten Reihenfolgen zunächst eingeschränkt und anschließend durch Interleavingeffekte wieder vergrößert. Beispielsweise prognostiziert das Modell auf Basis der Szenarien von Proband C ab CA9 ein Interleaving der ALTS- und ETRIM-Tasten. Dasselbe Interleaving zeigt sich auch im Verhalten von Proband C (Luedtke 2004).

Tabelle 2: Ergebnisse der Verhaltensprognose

Szenarien	Vergleichskriterium	Modell	Proband
Proband B	Aktionssequenzen	3 potentielle Sequenzen (S1-S3)	S1 in CA1-5 S2,3 nicht beobachtet
	Sorglosigkeit	2 latente Fehler 1 aktiver Fehler in CA5	keine Aussage möglich gleicher Fehler in CA5
Proband C	Aktionsreihenfolgen	4 potentielle Sequenzen (S1-S4)	<ul style="list-style-type: none"> <li>• S1, S2 und S3 auch im Probandenverhalten zu beobachten</li> <li>• S4 nicht beobachtet</li> <li>• Proband zeigt 3 zusätzliche Sequenzen</li> </ul>
	Sorglosigkeit	4 latente Fehler	keine Aussage möglich



		0 aktive Fehler	0 aktive Fehler
Proband D	Aktionsreihenfolgen	4 potentielle Sequenzen (S1-S4)	<ul style="list-style-type: none"> <li>• S1, S3 auch im Probandenverhalten zu beobachten</li> <li>• S2, S4 nicht beobachtet</li> </ul>
	Sorglosigkeit	2 latente Fehler	keine Aussage möglich
		1 aktiver Fehler in EA9	gleicher Fehler in EA9

Die Daten von Proband A wurden im Rahmen einer Rekonstruktionsanalyse untersucht (Lüdtke & Möbus 2003). Dabei wurde eine Variante des Modells verwendet, bei der ein Versuchsleiter den Kontrollfluss beeinflussen kann. Mit dieser Modellvariante wurden die Aktionssequenzen des Probanden rekonstruiert und die dabei notwendigen Kontrollstrukturverletzungen ausgewertet. Um eine Aussage über die Erklärungsfähigkeit der Regelkomposition zu erhalten, wurde die Untersuchung zunächst ohne und erst anschließend mit dem Lernmechanismus durchgeführt. Die Auswertung ergab eine signifikante Reduktion der notwendigen Verletzungen (McNemar-Tests for Significance of Change mit einem Signifikanzniveau von 5%) bei Verwendung des Lernmechanismus für die Aufgabe CHANGE-ALTITUDE. Für die Aufgabe ENGAGE-AUTOFLIGHT konnte ebenfalls eine Reduzierung erzielt werden, die sich aber als nicht signifikant erwies. Bei Verwendung des Lernalgorithmus gelang es die oben aufgeführten Routinefehler in CA 15 (Tabelle 3) und CA 13 (Tabelle 4) korrekt ohne Kontrollstrukturverletzungen zu rekonstruieren. Dasselbe gilt für die 3 Routinefehler, die Proband A bei der Aufgabe ENGAGE-AUTOFLIGHT begangen hat.

## Zusammenfassung und Ausblick

Als Grundlage für die Erstellung eines kognitiven Pilotenmodells wurde eine Fehlerklärungshypothese abgeleitet, in welcher Bedienungsfehler auf gelernte Sorglosigkeit zurückgeführt werden. Als Rechtfertigung für die Hypothese wurden Routinefehler aufgezeigt, die bei der Analyse der empirischen Daten einer Simulatorstudie identifiziert werden konnten. Die Ergebnisse der vorgestellten Modellprüfung zeigen, dass das Modell Fehler begehrt, die mit den Routinefehlern der Probanden übereinstimmen. Dies wird als Hinweis dafür gewertet, dass die prognostizierten Fehler des Modells realistisch und damit zur Vorhersage potentieller Pilotenfehler geeignet sind. Aus statistischer Sicht erscheint das N der empirischen Studie mit vier Probanden etwas schmal. Dies ist jedoch durch den erheblichen Aufwand der Erhebung von Verlaufsdaten begründet und relativiert sich, wenn man die analysierte Datenmenge betrachtet. Insgesamt enthalten die Aufgabenprotokolle 3283 Zeilen, wobei jede Zeile ein Ereignis (Fluglotsenanweisung, Pilotenaktion oder Moduswechsel) beschreibt.

In weiterführenden Arbeiten befassen wir uns mit der Modellierung weitere Einflüsse auf die Bildung gelernter Sorglosigkeit. Hierzu gehören: Die Aufmerksamkeitsverteilung während der Aufgabendurchführung, die Regelmäßigkeit und Kontinuität der Regelnwendungen. In dem EU-Projekt ISAAC (Improvement of Safety Activities on Aeronautical Complex Systems, 6. EU-Förderrahmenprogramm) wird in Kooperation mit Airbus-Frankreich und ALENIA Aeronautica (Italien) geprüft, inwieweit sich das Modell in die industrielle Human Error Analyse integrieren lässt.

## Literatur

- Anderson, J. R. & Lebiere, C. (1998). *The Atomic Components of Thought*. Hillsdale, NJ: Erlbaum.
- Billings, C.E. (1997). *Aviation Automation: the Search for a Human-Centered Approach*. Mahwah, NJ: Lawrence Erlbaum Associates.
- Corker, K. M. (2000). *Cognitive Models and Control: Human and System Dynamics in Advanced Airspace Operations*. In N.B. Sarter, R. Amalberti (eds), *Cognitive Engineering in the Aviation Domain*. Mahwah, NJ: LEA.
- Degani A., Heymann M. (2002). *Formal verification of human-automation interaction*. In *Human Factors*, 44(1).
- Degani, A., Shafto, M. & Kirlik, A. (1999). *Modes in Human-Machine Systems: Review, Classification, and Application*. In *International Journal of Aviation Psychology*, Volume 9, No. 2, pp. 125-138.

- LÜDTKE, A., MÖBUS, C., *Automatisierte Prognose von Bedienungsfehlern bei der Entwicklung von Pilotenassistenzsystemen*. In M. GRANDT (Hrsg.), *Verlässlichkeit der Mensch-Maschine-Interaktion*, 46. Fachausschussitzung Anthropotechnik der Deutschen Gesellschaft für Luft- und Raumfahrt e. V. DGLR-Bericht 2004-03, S. 241 - 270, Bonn: Deutsche Gesellschaft für Luft- und Raumfahrt, 2004, ISBN 3-932182-36-7.
- Dornheim, M. A. (1995). *Dramatic Incidents Highlight Mode Problems in Cockpits*. In *Aviation Week & Space Technology*, January 30, 1995.
- Freed, M.A., Remington, R.W. (2000). *Making Human-Machine System Simulation a Practical Engineering Tool: An Apex Overview*. In *Proceedings of the International Conference on Cognitive Modelling*, Groningen, Holland.
- Frey, D. & Schulz-Hardt, S. (1997). *Eine Theorie der gelernten Sorglosigkeit*. In H. Mandl (Hrsg.), *Bericht über den 40. Kongress der Deutschen Gesellschaft für Psychologie*, S. 604-611. Göttingen, Bern, Toronto, Seattle: Hogrefe Verlag für Psychologie.
- Gray, W. D. & Altmann, E. M. (1999). *Cognitive Modeling and Human-Computer Interaction*. In W. Karwowski (ed.), *International Encyclopedea of Ergonomics and Human Factors*, Volume 1, pp. 387-391. New York: Taylor & Francis, Ltd.
- Harel, D. & Politi, M. (1999). *Modeling Reactive Systems with Statecharts: The StateMate Approach*. McGraw-Hill.
- Hofstätter, P. R. (1957). *Das Fischer Lexikon: Psychologie*. Frankfurt am Main: Fischer Bücherei.
- Javaux, D. (2002). *A Method for Predicting Errors when Interacting with Finite State Systems*. In *Reliability Engineering and System Safety*, 75, pp. 147-165.
- Javaux, D., Olivier, E. (2001). *Explaining the Incompleteness of pilot's knowledge of autopilot behaviour. The frequential simplification hypothesis is confirmed*. In *Proceedings of the 11<sup>th</sup> Symposium on Aviation Psychology*, Columbus, OH, 5-8 March 2001.
- Laird, J. E., Newell, A. & Rosenbloom, P. S. (1987). *Soar: An Architecture for General Intelligence*. In *Artificial Intelligence*, Vol. 33, pp. 1-64.
- Leveson, N. G. & Palmer, E. (1997). *Designing Automation to Reduce Operator Errors*. In *Proceedings of the IEEE International Conference on Systems, Man, and Cybernetics*, Orlando, Florida, October, pp. 1144-1150.
- Lewis, R.L. (2001). *Cognitive Theory, Soar*. In *International Encyclopedia of the Social and Behavioral Sciences*. Amsterdam: Pergamon (Elsevier Science).
- Lüdtke, A. & Möbus, C. (2003). *Überprüfung eines Lernenden Pilotenmodells durch Rekonstruktion von Handlungsprotokollen*. In C. Steffens, M. Thüring & L. Urbas (Hrsg.): *Entwerfen und Gestalten: 5. Berliner Werkstatt Mensch-Maschine-Systeme 2003*, S. 160 – 180. Düsseldorf: VDI Verlag GmbH.
- Lüdtke, A., Möbus, C. (2004). *A Cognitive Pilot Model to Predict Learned Carelessness for System Design*. Accepted for *International Conference on Human-Computer Interaction in Aeronautics (HCI-Aero)*, 29.09.-01.10.2004, Toulouse, France.
- Monk (1999). *Modelling Cyclic Interaction*. In *Behaviour & Information Technology*, Volume 18, No. 2, pp. 127-139.
- Newell, A. & Simon, H. (1972). *Human Problem Solving*. Englewood Cliffs, NJ: Prentice-Hall.
- Norman, D. A. (1988). *The psychology of everyday things*. New York: Basic Books.
- Reason, J. (1994). *Menschliches Versagen: Psychologische Risikofaktoren und moderne Technologien*. Heidelberg: Spektrum, Akademischer Verlag.
- Rüegger, B. (1990). *Menschliches Fehlverhalten im Cockpit*. Schweizerische Rückversicherungsgesellschaft, Abteilung Luftfahrt, Mythenquai 50/60, Postfach, CH-8022 Zürich, Schweiz.
- Rushby, J., Crow, J., Palmer, E. (1999). *An Automated Method To Detect Potential Mode Confusions*. The 18th Digital Systems Avionics Conference, St Louis, October.
- Sarter, N. B. & Woods, D. D. (1995a). *How in the World did we get into that Mode? Mode error and awareness in supervisory control*. In *Human Factors*, Volume 37, No. 1, pp. 5-19.
- Sarter, N. B. & Woods, D. D. (1995b). *Strong, Silent and Out of the Loop: Properties of Advanced (Cockpit) Automation and their Impact on Human-Automation Interaction*, Cognitive Systems Engineering Laboratory Report, CSEL 95-TR-01, The Ohio State University, Columbus OH, March 1995. Prepared for NASA Ames Research Center.

LÜDTKE, A., MÖBUS, C., *Automatisierte Prognose von Bedienungsfehlern bei der Entwicklung von Pilotenassistenzsystemen*. In M. GRANDT (Hrsg.), *Verlässlichkeit der Mensch-Maschine-Interaktion*, 46. Fachausschussitzung Anthropotechnik der Deutschen Gesellschaft für Luft- und Raumfahrt e. V. DGLR-Bericht 2004-03, S. 241 - 270, Bonn: Deutsche Gesellschaft für Luft- und Raumfahrt, 2004, ISBN 3-932182-36-7.

Sarter, N. B., Woods, D. D. & Billings, C. (1997). *Automation Surprises*. In G. Salvendy (ed), *Handbook of Human Factors/Ergonomics*, 2<sup>nd</sup> edition, pp. 1926-1943. New York: Wiley.

Sheridan, T.B. (1997). *Supervisory Control*. In *Handbook of Human Factors and Ergonomics*. New York [u.a.] : Wiley.

Wiener, E. L. (1989). *Human Factors of Advanced Technology ("Glass Cockpit") Transport Aircraft*. NASA Contractor Report No. 177528. Moffett Field, CA: NASA Ames Research Center.

## Anhang

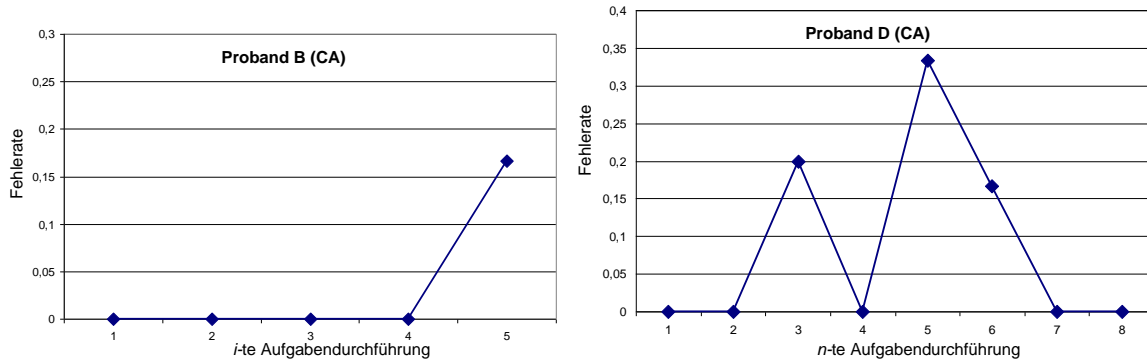


Abbildung 13: Fehllraten der Probanden B und D bei der Aufgabe CHANGE-ALTITUDE

Tabelle 3<sup>2</sup>: Verhalten von Proband A bzgl. der VS/IAS-Taste bei CA

Aufgabe	Werte der Bedingungsvariablen			korrekte Aktion	getätigte Aktion
	Stabilisierungsmodus	Zielwert	Capture-Phase		
CA1	deaktiviert	-1500 Fuß/Min.	deaktiviert	drücken	passiv
CA2	deaktiviert	-1500 Fuß/Min.	deaktiviert	drücken	passiv
CA3	deaktiviert	-1300 Fuß/Min.	deaktiviert	passiv	passiv
CA4	deaktiviert	-1000 Fuß/Min.	deaktiviert	passiv	passiv
CA5	deaktiviert	-1500 Fuß/Min.	aktiviert	passiv	passiv
CA6	deaktiviert	175 Kn	deaktiviert	passiv	passiv
CA7	deaktiviert	-1400 Fuß/Min.	deaktiviert	passiv	passiv
CA8	deaktiviert	-1500 Fuß/Min.	deaktiviert	drücken	drücken
CA9	deaktiviert	-1500 Fuß/Min.	deaktiviert	drücken	drücken
CA10	deaktiviert	-1700 Fuß/Min.	deaktiviert	drücken	drücken
CA11	deaktiviert	160 Kn	deaktiviert	drücken	drücken
CA12	deaktiviert	-1800 Fuß/Min.	deaktiviert	drücken	drücken
CA13	aktiviert	-1800 Fuß/Min.	deaktiviert	passiv	passiv
CA14	deaktiviert	-1200 Fuß/Min.	deaktiviert	passiv	passiv
CA15	deaktiviert	160 Kn	aktiviert	passiv	<b>drücken</b>

Tabelle 4: Verhalten von Proband A bzgl. der ALTS-Taste bei CA

Aufgabe	Wert der Bedingungsvariable	korrekte Option	gewählte Option
	Altitude-Preselect-Modus		
CA1	deaktiviert	drücken	drücken
CA2	deaktiviert	drücken	drücken
CA3	deaktiviert	drücken	drücken
CA4	deaktiviert	drücken	drücken
CA5	deaktiviert	drücken	drücken
CA6	deaktiviert	drücken	drücken
CA7	deaktiviert	drücken	drücken

<sup>2</sup> In den folgenden Tabellen sind Routinefehler fett hervorgehoben.

LÜDTKE, A., MÖBUS, C., *Automatisierte Prognose von Bedienungsfehlern bei der Entwicklung von Pilotenassistenzsystemen*. In M. GRANDT (Hrsg.), *Verlässlichkeit der Mensch-Maschine-Interaktion*, 46. Fachausschussitzung Anthropotechnik der Deutschen Gesellschaft für Luft- und Raumfahrt e. V. DGLR-Bericht 2004-03, S. 241 - 270, Bonn: Deutsche Gesellschaft für Luft- und Raumfahrt, 2004, ISBN 3-932182-36-7.

CA8	deaktiviert	drücken	drücken
CA9	deaktiviert	drücken	drücken
CA10	deaktiviert	drücken	drücken
CA11	deaktiviert	drücken	drücken
CA12	deaktiviert	drücken	drücken
CA13	armiert	passiv	<b>drücken</b>
CA14	deaktiviert	drücken	drücken
CA15	deaktiviert	drücken	drücken

**Tabelle 5: Verhalten von Proband B bzgl. der VS/IAS-Taste bei EA**

Aufgabe	Werte der Bedingungsvariablen			korrekte Option	getätigte Option
	Stabilisierungsmodus	Zielwert	Capture-Phase		
CA1	deaktiviert	-1500	deaktiviert	drücken	drücken
CA2	deaktiviert	-1600	deaktiviert	drücken	drücken
CA3	deaktiviert	-1500	deaktiviert	drücken	drücken
CA4	deaktiviert	-1000	deaktiviert	passiv	passiv
CA5	deaktiviert	-1700	<b>aktiviert</b>	passiv	<b>drücken</b>