

VALIDIERUNG NEUER, SATELLITENGESTÜTZTER ANFLUGVERFAHREN IM COCKPITSIMULATOR

R. Geister, Deutsches Zentrum für Luft- und Raumfahrt e.V., Institut für Flugführung
Lilienthalplatz 7, 38108 Braunschweig, Germany

TU Braunschweig, Institut für Flugführung, Hermann-Blenk-Str. 27, 38108 Braunschweig,
Germany

Zusammenfassung

In diesem Beitrag wird ein neues, operationelles Anflugverfahren, basierend auf dem Ground Based Augmentation System (GBAS) beschrieben. Dieses Anflugverfahren wurde im generischen Experimentalcockpit (GECO) des DLR validiert. Bei den Anflugverfahren handelt es sich um Präzisionsanflüge, die einen größeren Gleitpfadwinkel besitzen, als es bislang üblich ist ($3,5^\circ - 5,5^\circ$ anstelle von 3°). Für die Untersuchungen wurde eine Software in den Simulator integriert, die die Ablageberechnungen vom Sollflugweg eines realen Multi Mode Receivers (MMR) nachbildet. Als Eingabe dienten eine simulierte Position und Final Approach Segment (FAS) Daten, die auch in einer realen Bodeninstallation in Braunschweig verwendet werden. Im Zuge dieser Arbeit wurden die Korrektheit der verwendeten Daten, die Integration der neuen, operationellen Verfahren, die Phraseologie für Flugfreigaben und die Arbeitsbelastung der Piloten untersucht.

1. EINLEITUNG

Durch das immer größer werdende Verkehrsaufkommen (ein Zuwachs von 2,3% von 2006 auf 2007, 57% von 1997 bis 2007 [7]) im zivilen Luftverkehr werden Themen wie Fluglärm und Umweltverträglichkeit immer wichtiger. Durch die Entwicklung neuer Systeme zur Unterstützung von Präzisionsanflugverfahren und die Kurzstart- und Kurzlandefähigkeit von neuen Luftfahrzeugen ergeben sich Möglichkeiten für neue, operationelle Verfahren, die die Lärmbelastung am Boden und den Schadstoffausstoß vermindern. In dieser Arbeit wurden Präzisionsanflüge betrachtet, die einen größeren Gleitpfadwinkel besitzen, als bisher üblich. Insbesondere wurden Anflüge mit einem Gleitwinkel von $3,5^\circ$ bis $5,5^\circ$ betrachtet. Voraussetzung für diese Präzisionsanflüge ist das Ground Based Augmentation System (GBAS), das mehrere Anflugwege für ein Landebahnende ausstrahlen kann. Dabei muss die Bodeninfrastruktur nicht verändert werden.

Durch eine GBAS Bodeninstallation werden, neben Korrektursignalen für die Berechnung der Position auch Sollanflugwege ausgestrahlt, die über zwei Koordinaten und ein Winkel vollständig definiert sind. Die Übertragung erfolgt über einen VHF-Datenlink. Üblicherweise werden die so ausgestrahlten Signale über die Localizer-Antenne von einem Multi Mode Receiver (MMR) im Flugzeug empfangen. In dem Luftfahrzeug kann dann über eine fünfstellige Kanalnummer der gewünschte Sollanflugweg ausgewählt werden. Daraufhin werden verschiedene Parameter angezeigt, die den gewählten Anflugweg definieren. Die Auswahl und die Anzeige der Anflugparameter sowie die Phraseologie wurden in verschiedenen Szenarios in dem generischen Cockpitsimulator (GECO) des Instituts für Flugführung des Deutschen Zentrums für Luft- und Raumfahrt (DLR) untersucht. Darüber hinaus wurde die Korrektheit der

verwendeten Koordinaten für die kreierten Final Approach Segmente (FAS) der realen GBAS Bodeninstallation mit Hilfe des Simulators validiert.

2. SIMULATIONSUMGEBUNG

Das Institut für Flugführung des DLR betreibt verschiedene Simulatoren um alle Bereiche des Air Traffic Managements (ATM) untersuchen zu können. Durch die Simulatoren können Schnellzeitsimulation und Human-In-The-Loop Simulationen durchgeführt werden. Dabei kommen Tower- Radar und Cockpitsimulatoren zum Einsatz.

2.1. Generischer Cockpitsimulator

Das Generische Experimentalcockpit (GECO) ist ein modular aufgebauter Festsitz-Cockpitsimulator mit einem flugmechanischen Modell auf der Grundlage des DLR Flugversuchsträgers VFW614 (Advanced Technologies Testing Aircraft System, ATTAS). Dieses Leistungsmodell kann jedoch auch durch Modelle anderer Flugzeuge ausgetauscht werden. Als Anzeigen kommen sechs großformatige hochauflösende 15,4" LCD Displays zum Einsatz. Neben den Standardbediengeräten (wie z.B. Side-Sticks, Tiller, Schub-, Landeklappen- und Fahrwerkhebel, Bremsen) sind die eingebauten Bedienelemente auch für zukünftige Entwicklungen im Bereich Cockpit ausgelegt. So sind zum Beispiel für beide Piloten Keyboard und Cursor Steuergeräte (KCCU), verfügbar. Die Radio Management Panels (RMP) sind mit Displays ausgestattet und frei programmierbar. Die großformatigen Front-Displays sind über eine Matrix-Schalterbox mit den Signalquellen verbunden. Dadurch können die Anzeigen auf allen Displays variabel kombiniert werden. Weiterhin besitzt der Simulator ein kollimiertes Sichtsystem.

Darüber hinaus ist ein vollwertiges Flight Management System (FMS) verfügbar, mit dem eine hochgenaue 4D-Guidance möglich ist. Für die Außensichtssimulation kommt das im DLR entwickelte Tool ALICE zum Einsatz, welches eine detailgetreue 3D-Modellierung von Landschaften und Flughäfen, sowie auch Sensorsimulation ermöglicht. Standard-Displays wie Primary Flight Display (PFD) und Navigation Display (ND) sind verfügbar und durch zusätzliche Rollführungs- und graphische FMS-Displays ergänzt. All diese Displays und Systeme sind hierbei In-House-Entwicklungen und ermöglichen einen vollständigen Zugriff auf Inhalte und die Kommunikation mit anderen Systemen.



BILD 1. Generischer Cockpitsimulator des DLR

Während der hier beschriebenen Versuche saß der Versuchspilot auf der linken Seite. Auf den Displays wurde eine Karte mit der aktuellen Flugzeugposition und nahegelegenen Wegpunkten, ein Primary Flight Display (PFD) und ein Navigation Display (ND) dargestellt. Auf dem PFD und auf dem ND wurde die aktuelle Fluglage sowie die Informationen über die aktuelle Landehilfe angezeigt.

Die Parameter des zu Grunde liegenden flugmechanischen Modells des ATTAS wurden immer wieder durch reale Flugversuche angepasst und repräsentieren die Wirklichkeit in hohem Maße. Ein DLR-intern entwickelter Autopilot ist in die Simulation integriert. Er lässt sich über die Flight Control Unit (FCU) im Cockpit und über das Flight Management System (FMS) bedienen. Des Weiteren sind die Navigations- und Landehilfssysteme des ATTAS im Simulator nachgebildet.

2.2. Simulierter Multi Mode Receiver

Im Zuge dieser Untersuchungen wurde ein MMR-Simulator entwickelt und in die bestehende Architektur des GECO integriert. In diesem ersten Schritt wurde der Anteil der Positionsbestimmung außer Acht gelassen. So empfängt der MMR-Simulator die wahre Position und Höhe von der Simulation und nutzt diese für die weiteren Berechnungen. Ebenso werden die Geschwindigkeit, der Steuerkurs, und die Landerichtung und die Uhrzeit als Eingabedaten vorausgesetzt. Wie ein realer Empfänger, benötigt der MMR-Simulator mindestens eine Kanalnummer, mit der der Sollanflugweg ausgewählt werden kann. Mit Hilfe dieser Kanalnummer und der aktuellen Position berechnet der MMR-Simulator die Abweichung vom Sollanflugweg.

Bei einem GBAS ist der Sollanflugweg durch wenige Parameter definiert. Dazu gehören z.B. die Koordinaten der Schwelle, der Gleitpfadwinkel und die Koordinaten des Flight Path Alignment Points (FPAP). Die Parameter der Sollanflugwege (FAS) werden von dem MMR-Simulator eingelesen. Sie enthalten die gleichen Werte, wie die, die

in der realen Bodeninstallation des DLR am Flughafen Braunschweig-Wolfsburg ausgestrahlt werden. Alle Parameter der FAS Daten sind so, wie in [1] beschrieben gespeichert und werden je nach eingestellter Kanalnummer eingelesen und für die Ablageberechnung benutzt. Neben den Ablagen gibt der MMR-Simulator auch Statusinformationen analog zum realen MMR aus. Eine Ausgabe aller Daten, die auch der reale MMR ausgibt, ist vorgesehen. Auch die Erweiterung der Funktionalität im Bereich der Positionsbestimmung ist geplant.

Für die Berechnung der Ablage vom Sollflugweg wird die aktuelle Position zunächst von dem geodätischen WGS-84 Koordinatensystem in ein geozentrisches, kartesisches Koordinatensystem umgewandelt. Die aktuelle Position liegt in der Simulation als Dezimalgrad vor. Sie wird dann in einen Vektor aus kartesischen Koordinaten mit dem Erdmittelpunkt als Ursprung umgewandelt. Dieses Koordinatensystem wird im nächsten Schritt in ein lokales, kartesisches Koordinatensystem transformiert, das seinen Ursprung im Aufsetzpunkt des jeweiligen Anflugwegs hat. Dieser Punkt ist der Glide Path Intersection Point (GPIP), der den Schnittpunkt von dem Gleitpfad mit der Landebahnenschwellenebene darstellt. Dieser Punkt ist der Ausgangspunkt für die Berechnungen der vertikalen Abweichung vom Sollflugweg. Dies ist nicht die Position des ILS-Gleitpfad Senders. Das Koordinatensystem wird außerdem so gedreht, dass die x-Achse auf der Centerline der Landebahn liegt. Der Ausgangspunkt für die Berechnung der horizontalen Ablagen, der Flight Path Alignment Point (FPAP) liegt in dieser Simulation auf der Position des realen ILS-Localizer-Senders (und auf der x-Achse des lokalen Koordinatensystems), um ähnliche ILS- und GLS-Ablagen zu generieren. Mit Hilfe der beschriebenen Punkte und des Gleitpfadwinkels werden in dem lokalen, kartesischen Koordinatensystem die Winkelablagen berechnet. Neben den Winkelablagen werden auch die Ablagen, rechtwinklig zu dem Sollflugweg berechnet. Für die Berechnung der horizontalen, rechtwinkligen Ablagen dient die Ebene, die durch die x/z-Ebene des lokalen Koordinatensystems aufgespannt wird.

Für die Berechnung der vertikalen, rechtwinkligen Ablagen wird die x-Koordinate der aktuellen Flugzeugposition als Distanz zu dem Aufsetzpunkt betrachtet. Der Einfluss der Erdkrümmung wird hierbei vernachlässigt. Mit dem Abstand und dem Tangens des Soll-Gleitpfadwinkels wird die Sollhöhe berechnet. Die Differenz zu der aktuellen Höhe des Flugzeugs in der Simulation ergibt dann die vertikale, rechtwinklige Ablage.

Während dieser Versuche wurden die ILS Ablagen nicht von dem MMR-Simulator berechnet, sondern von dem bereits bestehenden ILS-Simulator. Dadurch konnten die berechneten GLS-Ablagen für den ILS-Look-Alike Anflug mit den bereits validierten ILS-Ablagen verglichen werden.

3. SIMULATIONSABLAUF UND SZENARIOS

Im Zuge dieser Simulatorversuche wurden mehrere simulierte Anflüge auf den Flughafen Braunschweig-Wolfsburg durchgeführt. Dabei wurden die Anflüge immer in Landerichtung 26 durchgeführt, da nur diese auch in der Realität über ein ILS System verfügt. Während der Versuche wurden vier Piloten des DLR eingesetzt. Den Piloten standen für die Anflüge alle Anflugkarten (ILS und

alle vier GLS), der Autopilot im Selected Mode, d.h. der Autopilot war aktiv und die Höhe, die Geschwindigkeit und der Steuerkurs wurden über die Flight Control Unit (FCU) gesteuert und ein Versuchsdurchführender als Copilot zur Verfügung. Während der Anflüge wurde auf die Simulation von Wind verzichtet, um die Untersuchungen um eine Variable zu reduzieren. Vor jedem Simulationstag wurde ein Briefing durchgeführt, in dem die Abläufe beschrieben wurden. Dabei wurden die geplanten Flugrouten, der Zeitpunkt der Konfigurationsänderungen (Landeklappen und Fahrwerk) und die Anfluggeschwindigkeit besprochen. Die Anfluggeschwindigkeit betrug während der Simulationen, wie bei dem ATTAS üblich, 136kts bei ausgefahrenen Landeklappen.

3.1. Design der Anflugprozeduren

Für die Untersuchungen wurde der Standard ILS Anflug auf die Landebahn 26 in Braunschweig sowie vier neu entworfene GLS Anflüge verglichen. Die GLS Anflüge besitzen alle das gleiche horizontale Profil und unterscheiden sich nur durch ihren Gleitpfadwinkel (GPA). Die vier Anflüge haben einen GPA von 3.5°, 4.5°, 5° sowie 5.5°. Dabei ist der GLS-Anflug mit dem Gleitpfadwinkel von 3.5° im Endsegment ein genaues Abbild des ILS-Anfluges in Braunschweig, obwohl sie geographisch nicht den gleichen Aufsetzpunkt haben. Flugvermessungen haben jedoch für den ILS-Anflug eine Reference Datum Height (RDH) von 50ft ergeben. Das entspricht der Threshold Crossing Height (TCH) des GLS-Anfluges (siehe [8]).

Nach [3] tragen GLS Anflüge einen Reference Path Identifier (RPID), der auf vier alphanumerischen Zeichen beruht. Dabei soll als erstes Zeichen ein „G“ für GLS verwendet werden, sofern die GBAS Bodenstation nicht über VDB Authentifizierungs-Protokolle verfügt. Das letzte Zeichen soll für alle Anflüge in einer Laderichtung eindeutig sein, also für mehrere Anflüge für eine Landerichtung als laufendes Zeichen verwendet werden. Für die mittleren zwei Zeichen gibt es keine Einschränkungen. Für die entworfenen Anflüge wurden die folgenden Daten verwendet.

	FAS Daten block 1	FAS Daten block 2	FAS Daten block 3	FAS Daten block 4
Kanal-Nr.	29029	29440	29851	30262
Route Indicator	Z	Y	X	W
RPDS	21	22	23	24
RPID	GZSA	GZSB	GZSC	GZSD
TCH	50ft	50ft	50ft	50ft
GPA	3.5°	4.5°	5°	5.5°

TAB 1. Erstellte Anflugwege

Der RPID wurde auch als Identifizierung des eingestellten Sollanflugwegs auf dem Display zur Anzeige gebracht. Die Anflugwege besitzen alle eine TCH von 50ft. Dadurch verschiebt sich der Aufsetzpunkt des Sollanflugwegs immer weiter in Richtung der Landebahnschwelle. Die Anflüge besitzen eine Kanalnummer, über die sie in der Avionik ausgewählt werden können. Diese ergibt sich aus der VHF Frequenz der Bodeninstallation und dem Reference Path Data Selector (RPDS). Der Route

Indicator ist für jeden Anflug pro Landebahnende eindeutig (siehe [1])

Um die Unterschiede zwischen den Anflugwegen so gering wie möglich zu halten, verfügen sie alle über das gleiche horizontale Profil und die gleichen Wegpunkte. Für den Übergang von der Standard Arrival Route (STAR) zu dem Präzisionsanflug wurde der für die Landebahn 26 bereits existierende RNAV Anflug verwendet. Lediglich das Final Approach Segment wurde durch ein GLS Präzisionsanflug ersetzt. Alle anderen Segmente (Initial, Intermediate und Missed) wurden beibehalten. Daher besitzen alle Prozeduren lateral den gleichen Final Approach Point (FAP), an dem der Sinkflug zur Landung eingeleitet wird. Lediglich die Höhe dieses Punktes und der verschiedenen Anflugsegmente unterscheiden sich. In der nachfolgenden Tabelle sind die verschiedenen Höhen des FAP für einen GLS-Anflug dargestellt. Die Höhe des Initial Approach Fix (IAF) ist für alle Anflüge 4000ft MSL. Die Höhe der folgenden Segmente unterscheidet sich ja nach Gleitpfadwinkel.

Anflugweg	Höhe (MSL) des FAP
GZSA (ILS)	2500ft
GZSB	3100ft
GZSC	3400ft
GZSD	3700ft

TAB 2. Höhe des FAP für verschiedene Anflugwege

Nachdem die Anflüge erstellt waren, wurden die zugehörigen Karten entworfen. Die Karten basieren alle auf den Standard Karten aus [5] der Deutschen Flugsicherung. Dabei wurde als Grundgerüst der RNAV Anflug benutzt und das horizontale Profil komplett übernommen. Das Final Approach Segment wurde um den Präzisionsanflug ergänzt und die Höhen der einzelnen Segmente wurden angepasst. Darüber hinaus wurden die Informationen zur Identifizierung des Anflugs nach [2] ergänzt. Zur grundlegenden Identifizierung wurde der RPID verwendet. Er befindet sich in der linken, oberen Ecke der Anflugkarte und neben der Kanalnummer analog zu einer ILS Anflugkarte. Die beispielhafte Anflugkarte für einen GLS-Anflug mit einem Gleitpfadwinkel von 5.5° ist in BILD 2 dargestellt.

Für das vertikale Profil wurden die jeweiligen Höhen und das vertikale Geschwindigkeitsprofil in der Karte angepasst. Alle vier Anflüge besitzen eine Reference Datum Height (RDH) von 50ft. Dieses ist im vorliegenden Fall gleich der TCH und entspricht der RDH des realen ILS Anfluges. Für die Simulationen hatten alle Anflüge die gleiche Hindernisfreiheitshöhe (OCH) von 380ft. Dies entspricht der OCH für einen RNAV oder für einen LOC-DME Anflug. Die Höhe wurde der Einfachheit halber nicht an einen Präzisionsanflug angepasst. Da sie aber für einen Präzisionsanflug tendenziell kleiner wird, wäre sie für einen realen GLS-Anflug geringer. Die OCH von 380ft wurde gleichzeitig als Entscheidungshöhe (DH) für die GLS und ILS Anflüge benutzt. Der Fehlanflug ist für alle GLS Anflüge gleich und entspricht dem Fehlanflug der RNAV Prozedur.



DLR experimental procedure design

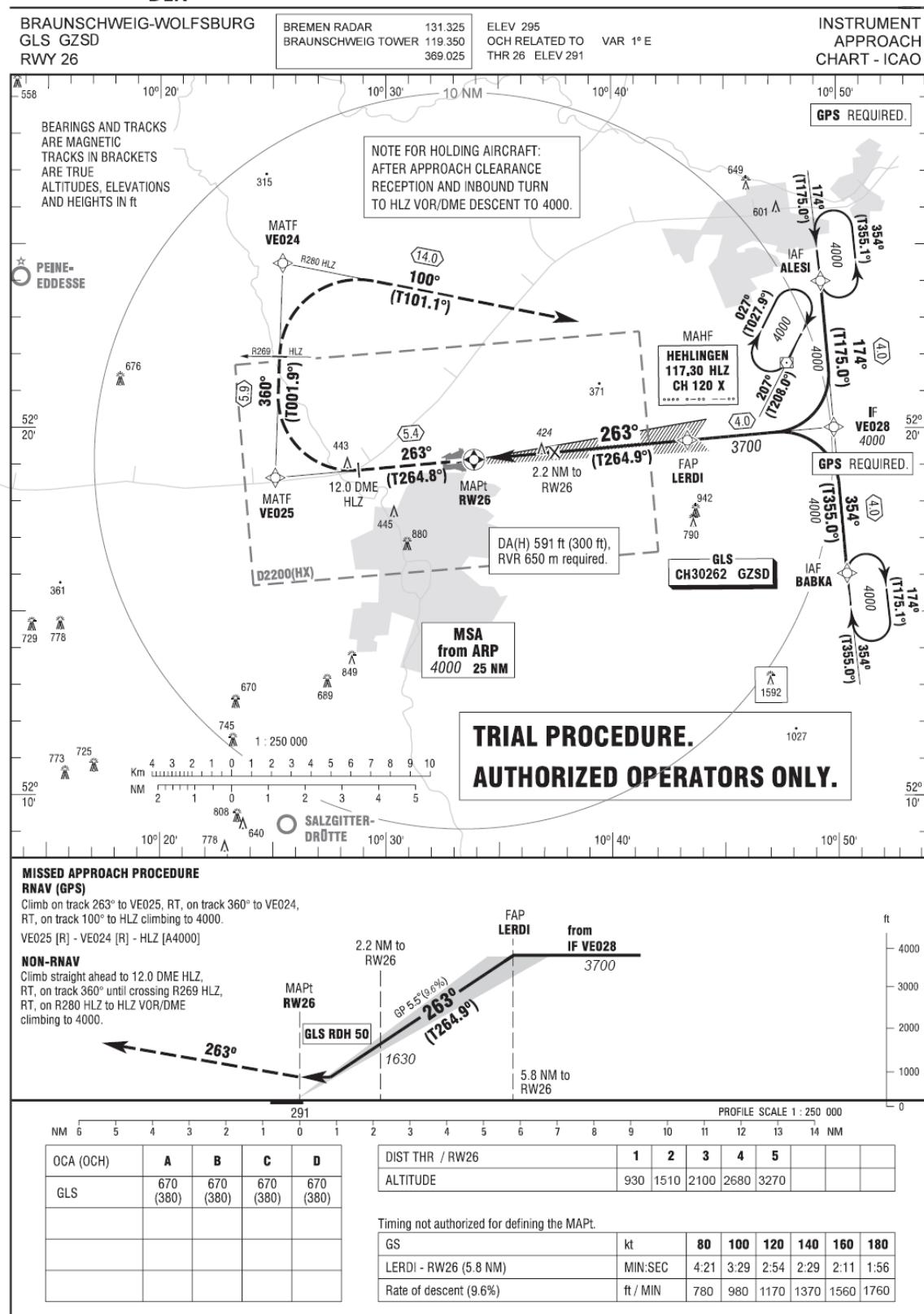


BILD 2. Anflugkarte GZSD

3.2. Ablauf der Szenarios

Während der Simulationen wurden pro Versuchstag 8 Szenarios mit einem Piloten durchgeführt. Nachdem sich der Versuchspilot kurz mit dem Simulator vertraut gemacht hatte, wurden zunächst zwei Standard-ILS Anflüge durchgeführt. Bei einem dieser Anflüge wurde eine Landung durchgeführt, bei dem Anderen erfolgte ein Durchstarten. Danach wurden GLS Anflüge durchgeführt, die entweder mit einer Landung, oder mit einem Durchstarten endeten. Dabei wusste der Pilot vorher nicht, ob es zur Landung oder zum Durchstarten kommen würde. Vor jedem Anflug fand eine kurze Einweisung über den geplanten Anflug zwischen Pilot und Copilot statt (Anflug Briefing). Dieses Verfahren ist analog zur Realität, da in der Flugvorbereitung ebenfalls der geplante Anflug abgestimmt und durchgegangen wird. Danach wurde die Landehilfe vom Piloten über das Radio Management Panel (RMP) auf den geplanten Anflug eingestellt. Dazu wurde für die GLS-Anflüge die fünfstellige Kanalnummer und für die ILS-Anflüge die Standard-ILS Frequenz verwendet. Dazu konnte auf dem RMP auf der „NAV“ Seite für die Landehilfen zwischen ILS und GLS ausgewählt werden. Der eingestellte Anflug wurde mit den RPID und der Kanalnummer im ND bzw. mit der ILS ID und der ILS-Frequenz dargestellt. Die Ablage vom Sollflugweg wurde, wie in der Realität üblich, für ILS-Anflüge sowie für GLS-Anflüge über Diamantensymbole im PFD und ND dargestellt.



BILD 3. Verwendete Displays

Die Simulation wurde jeweils auf einer Standard Arrival Route (STAR), 5NM vor dem Initial Approach Fix (IAF) aufgesetzt. Als IAF für die ILS-Anflüge wurde das VOR HLZ verwendet (siehe [5]). Für die GLS-Anflüge wurde der Wegpunkt ALESI als IAF herangezogen. Die Szenarios wurden alle im Selected Mode geflogen. Sobald auf den Endanflug eingedreht wurde und das simulierte Localizer-Signal empfangen wurde, wurde der Approach Mode des Autopiloten aktiviert, der automatisch den Gleitwinkel und den Steuerkurs mit Hilfe der berechneten Ablagen einhält. Die Piloten wurden vor der Durchführung angewiesen, spätestens bei der Entscheidungshöhe (DH) von 380ft GND den Autopiloten zu deaktivieren und den Anflug manuell fortzusetzen. Während der Versuche wurde der Autopilot meist bei einer Höhe zwischen 800ft und 500ft GND abgeschaltet. Während der Simulationen erfolgte eine Kommunikation per Sprechfunk mit einem Pseudo-Lotsen. Es fand eine Anmeldung und das Erbitten eines bestimmten Anfluges statt. Dabei wurden für die GLS Anflüge verschiedene Phrasen während der Kommunikation untersucht. Der Pseudo-Lotse gab daraufhin den gewünschten Anflug frei, oder gab die Freigabe für einen anderen GLS Anflug.

Pilot	Pseudo-Lotse
„D-ADAM, requesting GLS Approach A, RWY 26“	„D-ADAM, you are cleared for GLS Approach A, RWY 26“, oder „D-ADAM, negative, you are re-cleared for GLS Approach C, RWY 26 due to noise abatement procedures“
„D-ADAM, requesting GBAS Approach GZSA, RWY 26“	„D-ADAM, you are cleared for GBAS Approach GZSA, RWY 26“, oder „D-ADAM, negative, you are re-cleared for GBAS Approach GZSC, RWY 26 due to noise abatement procedures“
„D-ADAM, requesting GBAS Approach 26 4.5“	„D-ADAM, you are cleared for GBAS Approach 26 4.5“, oder „D-ADAM, negative, you are re-cleared for GBAS Approach 26 5.0 due to noise abatement procedures“

TAB 3. Beispiel der benutzen Phraseologie

TAB 3 beschreibt beispielhaft die Sprechfunk-Kommunikation und die verwendete Phraseologie während der Anflüge. Dabei wurde als Identifizierung des Anflugtyps „GBAS“ oder „GLS“ verwendet. Darüber hinaus wurde als Bezeichnung für einen speziellen Anflug der komplette RPID, der Gleitpfadwinkel und nur der letzte Buchstabe des RPID verwendet. Die formulierte Phraseologie basiert auf Vorgaben gemäß [6].

4. ERGEBNISSE

Im Zuge dieser Untersuchungen wurde das Hauptaugenmerk auf die operationellen und arbeitspsychologischen Anforderungen gesetzt, die Anflüge mit einem steileren vertikalen Profil an die Piloten stellen. Dabei wurden zum einen die Abweichungen vom Sollanflugweg, zum Anderen die subjektiven Einschätzungen von den Piloten untersucht.

4.1. Operationelle Ergebnisse

Für die Auswertung der operationellen Ergebnisse wurden während der Versuche die Ablage und die Positionsdaten des Luftfahrzeugs aufgezeichnet. Im Anschluss wurden die GLS Ablagen und die ILS Ablagen analysiert und miteinander verglichen. Dabei wurden die verschiedenen GLS-Anflüge getrennt untersucht. Es zeigte sich, dass die horizontalen Ablagen von ILS- und MMR Simulator nahezu übereinstimmen. Daher wird davon ausgegangen, dass die Berechnung der horizontalen Ablagen im MMR-Simulator gültig ist. Die Berechnung der vertikalen Ablagen konnte nicht uneingeschränkt miteinander verglichen werden, da hier jeweils von einer anderen Position des Aufsetzpunktes, bzw. der Position des

virtuellen Gleitpfadsenders ausgegangen wird.

Einer der untersuchten Faktoren in Bezug auf die operationellen Anforderungen war der Übergang von dem Anfangsanflug zu dem Endanflug. Der Standard-ILS Anflug am Flughafen Braunschweig-Wolfsburg besitzt eine Steuerkursänderung von 56° [5] für das Eindrehen in den Endanflug. Der RNAV Anflug und somit auch die erstellten GLS-Anflüge besitzen eine Steuerkursänderung von 89° für das Eindrehen in den Endanflug. Da in diesem Bereich während der Versuche im Selected Mode geflogen wurde, stellte das richtige Timing für das Eindrehen eine größere Herausforderung bei den GLS-Anflügen dar und folglich kam es zu einem größeren Überschwingen bei der Stabilisierung auf dem Endanflug (siehe BILD 4). Daher wäre bei einem Neudesign der Anflugwege darauf zu achten, dass die Steuerkursänderung zum Eindrehen in den Endanflug nicht zu groß ist, um die Semi-Manuelle Steuerung zu erleichtern. Für Luftfahrzeuge, die mit einem vollständigen FMS ausgerüstet sind, spielt dieser Faktor nur eine untergeordnete Rolle. Nichtsdestotrotz fand immer eine Stabilisierung vor dem FAP statt und der Anflug konnte fortgesetzt werden.

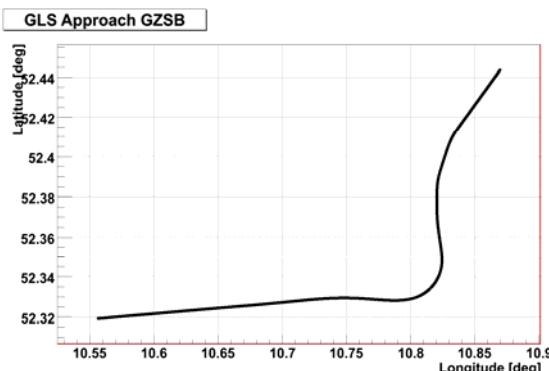


BILD 4. Positionsverlauf während eines GLS Anfluges

Ein weiterer untersuchter Faktor waren die horizontalen und vertikalen Ablagen im Endanflug mit anschließender Landung. Die vertikalen GLS Ablagen für einen 3.5° Anflug zeigen einen Mittelwert von 0.01 (rad), und eine mittlere, rechtwinklige Abweichung von $-0.8m$. Die vertikalen GLS Ablagen für einen Anflug mit einem GPA von 4.5° zeigen einen Mittelwert von -0.001 (rad) und eine mittlere Ablage von $-3.7m$. Der Mittelwert für die vertikalen Ablagen während eines GLS-Anfluges mit einem GPA von 5° lag bei 0.015 (rad) bzw. $-0.9m$. Bei einem GLS-Anflug mit einem GPA von 5.5° betrug die mittlere, vertikale Abweichung 0.026 (rad) bzw. $-0.4m$.

Die Standardabweichung betrug $1.4m$ für 3.5° , $5.2m$ für 4.5° , $2.6m$ für 5° und $2.4m$ für 5.5° . Dabei wurden nur die Ablagen berücksichtigt, die unter $1000ft$ MSL aufgezeichnet wurden, da dort der Anteil größer ist, der manuell geflogen wurde. Das gleiche gilt für die mittleren horizontalen Ablagen. Diese betrugen im Mittel $-0.8m$ für 3.5° Anflüge, $0.4m$ für 4.5° Anflüge, $-1.1m$ für 5° Anflüge und $-2.4m$ für 5.5° Anflüge. Dabei betrug die Standardabweichung $0.8m$, $1.3m$, $1.2m$ und $2.8m$. Die Gegenüberstellung der Werte befindet sich in TAB 4

GPA	3.5°	4.5°	5°	5.5°
Mittlere, vertikale Abweichung [m]	-0.8	-3.7	-0.9	-0.4
Standardabweichung vertikal [m]	1.4	5.2	2.6	2.4
Mittlere, horizontale Abweichung [m]	-0.8	0.4	-1.1	-2.4
Standardabweichung horizontal [m]	0.8	1.3	1.2	2.8

TAB 4. Durchschnittliche Ablagen im Endanflug

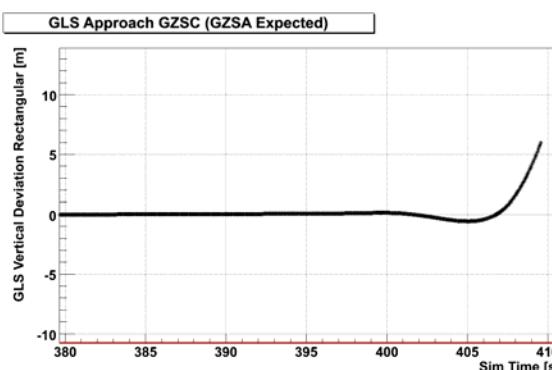


BILD 5. Vertikale, rechtwinklige Ablage

BILD 5 zeigt beispielhaft einen Verlauf der vertikalen, rechtwinkligen Ablage. Dieser Verlauf ist typisch für alle durchgeföhrten Anflüge. Die Piloten neigten dazu, bei dem Übergang zur manuellen Steuerung den Sinkflug ein wenig zu verstärken. Dieses Verhalten hat zur Folge, dass die vertikalen Ablagen im Mittel negativ sind. Danach reduzierten die Piloten fast immer den Sinkflug um das Abfangen zur Landung vorzubereiten. Das führte dazu, dass die vertikale Ablage im positiven Bereich steigt, da der Sollflugweg nicht mehr eingehalten wird. Nach überfliegen des Aufsetzpunktes werden bei einem realen MMR die vertikalen Ablagen auf den maximalen, negativen Wert gestellt und keine vertikalen Führungsinformation mehr ausgegeben. Nach Analyse der Ergebnisse, kann davon ausgegangen werden, dass die Sollanflugwege gut eingehalten werden können, obwohl die Standardabweichung vom Sollanflugweg bei Anflügen mit einem größeren GPA leicht steigt. Die Analyse der Aufsetzpunkte zeigte, dass die mittlere Entfernung vom Sollaufsetzpunkt mit zunehmendem Gleitpfadwinkel ansteigt. Bei einem GLS Anflug mit einem GPA von 3.5° lag die mittlere Entfernung bei ca. $150m$, bei einem GLS Anflug mit einem GPA von 4.5° bei ca. $170m$. Dies steigerte sich auf ca. $280m$ bzw. $290m$ bei Anflügen mit einem GPA von 5° bzw. 5.5° , wie in BILD 6 dargestellt. Dabei wurde der Aufsetzpunkt bei Anflügen mit 3.5° GPA im Schnitt in $4.9m$ überflogen und in $8.4m$ bei Anflügen mit 5.5° GPA ($6.5m$ bei 4.5° und $7.1m$ bei 5°).



BILD 6. Auszug Aufsetzpunkte (Google Earth)

Neben der Analyse der Ablagen wurde auch der Höhenverlust beim Durchstarten untersucht. Um einen mittleren Höhenverlust bestimmen zu können, wurde das Kommando zum Durchstarten vom Pseudo-Lotsen immer in einer Höhe von 591ft MSL (300ft GND) gegeben. Die Differenz, die sich zwischen dieser Höhe und der minimalen, aufgezeichneten Höhe ergab, wurde für die Untersuchungen herangezogen (siehe BILD 7). Dabei zeigte sich, dass der mittlere Höhenverlust bei einem 3.5° Anflug ca. 85ft betrug und bei einem 5.5° Anflug ca. 119ft.

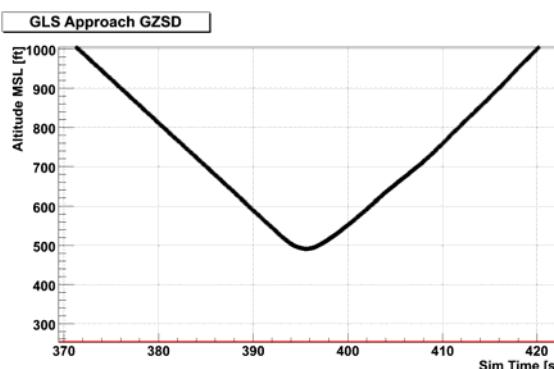


BILD 7. Höhenverlauf während eines GLS-Anfluges

4.2. Arbeitspsychologische Ergebnisse

Nach jedem Anflug wurden zwei Fragebögen von den Versuchspiloten beantwortet. Einer der Fragebögen diente zur Untersuchung der subjektiven Arbeitsbelastung, der Andere diente zur Untersuchung der Benutzbarkeit bzw. der Akzeptanz des Anflugsystems mit steilen GLS Anflügen. Der Fragebogen zur Auswertung der subjektiven Arbeitsbelastung war an den NASA-TLX Fragebogen angelehnt (siehe [9]). Er bestand aus sechs Fragen zu den geistigen, körperlichen und zeitlichen Anforderungen, der Leistungseinschätzung, der Anstrengung und der Frustration.

4.2.1. Arbeitsbelastung

In der Auswertung zeigte sich, dass die geistigen Anforderungen bei einem ILS Anflug mit Landung und bei einem GLS Anflug mit Landung unabhängig vom GPA nahezu identisch eingeschätzt wurden. In beiden Fällen lag die angegebene geistige Anstrengung im mittleren Bereich. Die Auswertung ergab weiterhin, dass die geistigen Anforderungen bei einem Durchstarten nach einem GLS Anflug mit einem größeren GPA nach Pilotenangaben steigt. Die Bewertungen der Anforderungen erhöhten sich mit steigendem GPA vom unteren, mittleren Bereich (vergleichbar mit ILS Anflügen) bis zum mittleren Bereich.

Im Bereich der körperlichen Anstrengung zeigte sich ein ähnliches Verhalten, hier jedoch unabhängig davon, ob eine Landung oder ein Durchstarten durchgeführt wurde. Hier gaben die Piloten an, die körperliche Anforderung steige mit steigendem GPA. Sie verlagerte sich vom sehr niedrigen Bereich in den unteren, mittleren Bereich.

Die, von den Piloten empfundene Geschwindigkeit der zeitlichen Abfolge der Arbeitsschritte blieb in allen Fällen annährend gleich.

Die Bewertungen liegen dabei alle im unteren, mittleren Bereich.

Bei der Bewertung der eigenen Leistung gaben die Piloten Werte im mittleren bis mittelguten Bereich an. Der GPA hatte hierbei keine tragende Bedeutung, während die Anstrengung, die nötig war, um das jeweilige Ergebnis zu erreichen, bei den GLS-Anflügen höher bewertet wurde. Jedoch ist auch hier kein lineares ansteigen mit einem größeren GPA erkennbar. Dabei ist zu bemerken, dass die Anstrengung für eine Landung durchgehend höher bewertet wurde, als die für ein Durchstarten. Sie sank von einem mittleren Bereich (Landung) in einen niedrigen, mittleren Bereich (Durchstarten). Die Frustration bzw. die Verunsicherung wurde von den Piloten als sehr niedrig bewertet. Sie war bei den GLS-Anflügen leicht höher, als bei den ILS-Anflügen, jedoch auch hier unabhängig von dem GPA.

Bei den Bewertungen spielt auch der Übergang von dem Anfangsanflug auf den Endanflug eine Rolle. Da die GLS-Anflüge auf einem RNAV Approach beruhen, ist der Übergang auf den Endteil durch einen Winkel von 89° definiert. Ein Überschießen und das anschließende Einfangen des Localizer-Signals wirkten sich negativ auf die Gesamtbewertung aus.

4.2.2. Systemnutzbarkeit

Durch die Beantwortung des zweiten Fragebogens sollte die Nutzbarkeit des Systems und die Akzeptanz durch die Piloten bewertet werden. Dabei wurden neben Fragen zur Akzeptanz auch Fragen zu der Kartendarstellung, zu der Anzeige der ausgewählten Anflugwege, der benutzen Phraseologie und den operationellen Anforderungen gestellt.

Bei der Bewertung bezüglich der Systemakzeptanz ist ein deutlicher Trend feststellbar. Mit steigendem GPA sank

auch die Bereitschaft, das System öfter zu nutzen. In gleichem Maße sank die Bewertung bezüglich der Einfachheit des Systems. Dabei ist festzuhalten, dass sich diese Aussagen nur auf die operationellen Anforderungen beziehen, da die Fragen nach dem Erlernen der Bedienung, der Komplexität und der Konsistenz des Systems alle auf einem gleichen Niveau beantwortet wurden, wie bei einem ILS-Anflug. So gaben die Piloten z.B. an, dass die Bedienung des Systems leicht zu erlernen sei und die verschiedenen Funktionen des Systems gut integriert seien.

Die Bewertung der Kartendarstellung sank leicht bei einem größeren GPA. Dies wurde damit begründet, dass der GPA eine immer wichtigere Rolle spielt und daher auch deutlicher in den Anflugkarten hervorgehoben werden müsse. Die Differenzierbarkeit der Anflüge auf der Anflugkarte wurde etwas schlechter bewertet, sobald mehrere Anflüge auswählbar waren. Dies war insbesondere der Fall, wenn von dem Pseudo-Lotsen ein anderer Anflug freigegeben wurde, als erwartet und die passende Karte zu dem freigegebenen Anflug gesucht werden musste.

Die Auswahl der Anflüge über die fünfstellige Kanalnummer im RMP wurde als einfach und auf dem gleichen Niveau wie das Einstellen eines ILS-Anflugs bewertet. Die Identifizierung eines ausgewählten GLS-Anflugs wurde als etwas schwieriger bewertet, als die eines ILS-Anflugs. Dabei wurde ausdrücklich darauf hingewiesen, dass die Landebahnnummer in den RPID aufgenommen werden sollte.

Die Untersuchungen bezüglich der Phraseologie haben gezeigt, dass die Freigabe mit dem Textblock „Cleared GLS Approach A, RWY 26“ am besten akzeptiert wurde und mit Hilfe dieser Phrase der freigegebene Anflug am besten identifiziert werden konnte. Das gilt insbesondere für den Fall, dass ein anderer Anflug von dem Pseudo-Lotsen freigegeben wurde, als ursprünglich vom Piloten erbeten wurde. Dabei spielte es nach Angabe der Piloten keine Rolle, ob „GLS“ oder „GBAS“ verwendet würde. Die Identifikation mit dem letzten Buchstaben und der Landebahnnummer wurde als ausreichend bewertet. Die Verwendung des GPA in der Freigabe, wie z.B. in „Cleared GBAS Approach 4.5°, RWY 26“ wurde als schwerer identifizierbar bewertet. Dies gilt auch für die Verwendung des kompletten RPID in der Freigabe, wie z.B. in „Cleared GLS Approach GZSD, RWY 26“.

Der Übergang von der Standard Arrival Route (STAR) zum Endanflug wurde bei allen GLS-Anflügen als einfacher bewertet als bei ILS-Anflügen. Das liegt zum größten Teil daran, dass bei der STAR für einen ILS-Anflug ein Entry Pattern über dem Initial Approach Fix HLZ geflogen werden muss. Der Anflugkurs führt dabei zunächst von der Landebahn weg und es muss ein Standard-Holding geflogen werden, um den Anflug fortzusetzen. Bei der STAR für die GLS-Anflüge, die, wie oben beschrieben auf dem RNAV Anflug beruht, wird das Luftfahrzeug direkt von der STAR auf den Anflugsanflug geführt.

Bezüglich der Anzeige der Ablagesignale zeigte sich in der Auswertung der Fragebögen, dass die Standard-ILS-Anzeige bei einem GLS-Anflug mit einem größeren GPA

weniger ausreichend bewertet wurde, als bei einem Standard ILS-Anflug bzw. bei einem GLS-Anflug mit einem kleineren GPA. Die Bewertung liegt dabei immer noch im oberen Mittelfeld. Die Freigabe eines anderen GLS-Anfluges, als beantragt spielte dabei keine tragende Rolle.

Die Bewertung der benötigten Aufmerksamkeit für einen Anflug stieg bei einem größer werdenden GPA von mittel auf hoch. Auf der anderen Seite bewerteten die Piloten die operationellen Anforderungen, die nötig waren, um die Anflüge durchzuführen (wie z.B. das Timing des Ausfahrens der Landeklappen oder das Fahrwerks) in etwa gleich für alle Anflüge. Dabei gaben die Piloten an, dass die Sinkgeschwindigkeit bei steigenden GPAs herausfordernder wird. Die Bewertung stieg dabei von niedrig auf hoch. Daraus resultiert mit großer Wahrscheinlichkeit auch die Bewertung der Anforderungen, die ein Durchstarten an den Piloten stellt. Auch hier stieg die bewertete Herausforderung von niedrig auf mittelhoch.

5. WEITERFÜHRENDE FORSCHUNGEN

In aktuellen Projekten des DLR sollen die erarbeiteten Daten dieser Simulationsversuche mit verschiedenen Piloten aufgebaut werden. Darüber hinaus sollen die ermittelten Daten im realen Flugversuch bestätigt werden. Dazu sollen Flugversuchsträger mit realen Multi Mode Receivern ausgerüstet werden und es sollen Möglichkeiten geschaffen werden, die Ablagesignale im Cockpit darzustellen. Mit dieser Ausrüstung sollen die verschiedenen Sollanflugwege, ähnlich wie in der Simulation auf ihre operationellen Anforderungen und auf ihre Durchführbarkeit untersucht werden. Dabei werden die Anflüge teilweise manuell, teilweise automatisiert durchgeführt werden. Der Übergang von dem Anflugsanflug zu dem Endsegment soll ebenfalls weiter untersucht werden. Dabei werden insbesondere die Änderungen untersucht, die entstehen, wenn einem GLS-Anflug mit größerem GPA ein Steep Continuous Descent Approach (SCDA) mit dem gleichen Flugpfad vorausgeht.

Das DLR plant außerdem komplexere Anflugwege (Curved Approaches) sowie GBAS-basierende Führung im Bereich der Abflüge und während des Rollens zu untersuchen. Darüber hinaus wird Forschung im Bereich der GBAS Bodenstation zur Erweiterung auf CAT II/III Funktionalität durchgeführt werden.

6. ZUSAMMENFASSUNG

Die durchgeföhrten Versuche haben gezeigt, dass Anflüge mit einem größeren Gleitpfadwinkel als üblich mit dem verwendeten Luftfahrzeug durch die relativ hohe Sinkgeschwindigkeit höhere Anforderung an einen Piloten stellen und daher nicht auf uneingeschränkte Akzeptanz stoßen. Dabei spielt die ungewohnte Aussicht und Geometrie beim Anflug eine wichtige Rolle. Es wird vermutet, dass sich das durch Training kompensieren ließe. Um die volle Effektivität von GLS-Anflügen mit einem größeren Gleitpfadwinkel ausschöpfen zu können, ist es notwendig, über Luftfahrzeuge zu verfügen, die eine sehr geringe Anfluggeschwindigkeit haben. Dadurch wird die vertikale Geschwindigkeit ebenfalls geringer und leichter zu kontrollieren. Eine wichtige Rahmenbedingung dabei ist, dass die Triebwerke in dieser Konfiguration in

einem Zustand sind, in dem sie schnell wieder den vollen Schub für ein Durchstarten liefern um einen großen Höhenverlust zu vermeiden. Die Untersuchungen haben gezeigt, dass bei einer Erhöhung des Gleitpfadwinkels um 2° der mittlere Höhenverlust beim Durchstarten um ca. 65% steigt. Dies muss durch das Luftfahrzeug kompensiert werden.

Unabhängig von dem verwendeten Luftfahrzeug haben diese Versuche gezeigt, dass bei mehreren Sollanflugwegen für eine Landerichtung die Unterscheidung der Anflugkarten erleichtert werden sollte. Dazu sollte der RPID und vor allem das Unterscheidungskriterium (im vorliegenden Fall der Gleitpfadwinkel) deutlicher auf der Karte herausgehoben werden. Außerdem sollte der RPID immer die Landerichtung als Zahl erhalten. Die Bezeichnung sollte ähnlich zu [4] erfolgen. Der führende Buchstabe sollte ein „G“ sein, die nächsten beiden Ziffern sollte die Landerichtung repräsentieren und der letzte Buchstabe sollte für eine Landerichtung hoch gezählt werden. Dabei sollten die Buchstaben „C“, „L“ und „R“ ausgelassen werden, um nicht mit der Landebahnbezeichnung zu interferieren. Demnach wurden die vorliegenden RPID in „G26A“, „G26B“, „G26D“ und „G26E“ umbenannt. Dieses erleichtert auch die Identifizierung der eingestellten Sollanflugwegs in den Displays. Für die Anzeige sollte darüber hinaus in Betracht gezogen werden, ebenfalls den Gleitpfadwinkel und die benötigte Sinkgeschwindigkeit darzustellen, um das Situationsbewusstsein zu steigern. Darüber hinaus haben die Versuche gezeigt, dass es aus Sicht der Piloten keine Rolle spielt, ob im Sprechfunk als Bezeichnung des Anflugtyps „GLS“ oder „GBAS“ verwendet wird. Die Phraseologie sollte jedoch die Landebahn und nur einen Buchstaben als Identifizierung des ausgewählten Anflugs enthalten z.B. „GLS Approach A, RWY 26“.

Abschließend kann festgehalten werden, dass die untersuchten Anflüge mit dem verwendeten Fluggerät (und dadurch mit einer repräsentativen Anfluggeschwindigkeit für Commuter Luftfahrzeuge) zwar höhere Anforderungen an die Piloten stellen, jedoch bereits mit den aktuellen Voraussetzungen durchaus durchführbar sind. Im Falle eines manuellen Anflugs wird dabei jedoch eventuell die Landestrecke durch ein längeres Abfangen erhöht. Angepasste Luftfahrzeuge würden die Reduzierung der Lärmbelastung durch steilere und durch GBAS geführte Anflugwege ermöglichen. Dabei wäre weniger Schub notwendig, was den Treibstoffverbrauch für jeden Anflug senken würde. Da ein Luftfahrzeug bei steileren Anflügen eine größere Flughöhe als bei üblichen Anflügen einnimmt, kann so die Lärmbelastung am Boden gesenkt werden. Diese Anflugwege sind durch die Verwendung eines GBAS leicht zu erstellen und adaptierbar.

7. ABKÜRZUNGSVERZEICHNIS

ATC	Air Traffic Control
ATM	Air Traffic Management
ATTAS	Advanced Technologies Testing Aircraft System
DH	Decision Height
DLR	Deutsches Zentrum für Luft- und Raumfahrt
FAP	Final Approach Point
FAS	Final Approach Segment

FCU	Flight Control Unit
FMS	Flight Management System
FPAP	Flight Path Alignment Point
GBAS	Ground Based Augmentation System
GECO	Generisches Experimentalcockpit
GLS	GBAS Landing System
GND	Ground (Höhe über Grund)
GPA	Glide Path Angle
GPIP	Glide Path Intersection Point
GS	Glideslope
HAL	Horizontal Alert Limit
ILS	Instrument Landing System
KCCU	Keyboard and Cursor Control Unit
LOC	Localizer
MMR	Multi Mode Receiver
MSL	Mean Sea Level
ND	Navigation Display
OCH	Obstacle Clearance Height
PFD	Primary Flight Display
RDH	Reference Datum Height
RMP	Radio Management Panel
RNAV	Area Navigation
RPDS	Reference Path Data Selector
RPID	Reference Path Identifier
RWY	Runway
STAR	Standard Arrival Route
SUS	System Usability Scale
TD	Touch Down
TLX	Task Load Index
VAL	Vertical Alert Limit
WGS	World Geodetic System

8. REFERENZEN

- [1] RTCA, DO-246D, GNSS-Based Precision Approach Local Area Augmentation System (LAAS) Signal-in-Space Interface Control Document (ICD), 2008
- [2] ICAO, Doc 8168, Vol I, Procedures for Air Navigation Services, Aircraft Operations, Flight Procedures, International Civil Aviation Organisation (ICAO), 2006
- [3] ICAO, ANNEX 10, VOL I, to the Convention on International Civil Aviation: Aerodrome Design and Standard Operations, International Standards and recommended Practicies, International Civil Aviation Organisation (ICAO), 2004
- [4] FAA Order 8260.19D, Flight Procedures and Airspace, 27.8.2007
- [5] DFS, Deutsche Flugsicherung, DFS Luftfahrthandbuch Deutschland (Aeronautical Information Publication, 2010
- [6] ICAO, Doc 4444, Procedures for Air Navigation Services, Air Traffic Management (ICAO), 2001
- [7] Deutsches Zentrum für Luft- und Raumfahrt, Luftverkehrsbericht 2008
- [8] R. Geister, T. Ludwig, I. Jessen, Installation and validation of a GBAS ground station at the research airport Braunschweig-Wolfsburg, CEAS 2009
- [9] NASA Task Load Index, Internet <http://humansystems.arc.nasa.gov/groups/TLX/>