



Luftfahrtforschungsprogramm VI Erster Aufruf 2020-2024 (LuFo VI-1) Programmlinie "KMU"

Verbundvorhaben GLASS – GLS Anflüge basierend auf SBAS **GLASS**

Verbundführer:	TFC Flugbetrieb und -technik Beratungsgesellschaft mbH
Ansprechpartner:	Christian Käufer, Marc Altenscheidt
Geplante Laufzeit:	01.06.2020 bis 31.12.2023
Förderkennzeichen:	20Q1933A

Einzelvorhaben

Schulungen zu innovativen Navigationsverfahren

Schlussbericht

Gefördert durch:



Bundesministerium
für Wirtschaft
und Klimaschutz

aufgrund eines Beschlusses
des Deutschen Bundestages

Mai 2024

Version: 1.0



Impressum

Autor, Organisation: Marc Altenscheidt, TFC
Verantwortlicher, Organisation: Christian Käufer, TFC
zuletzt geändert/gespeichert: 04.03.2025
Anzahl Seiten: 121

Datenschutz und Geheimhaltung

Mit Bezug und im Vorgriff auf die für dieses Luftfahrtforschungsprojekt zu schließende Geheimhaltungs- und Kooperationsvereinbarung verpflichtet sich jeder der nachfolgend genannten Partner bereits jetzt, die von den anderen Partnern erhaltenen Informationen mit der gleichen Sorgfalt zu behandeln, mit der er eigene Geschäfts- und Betriebsgeheimnisse schützt.

© Copyright 2024: nachfolgend gelistete Verbundpartner (in alphabetischer Reihenfolge):
TFC - Flugbetrieb und-technik Beratungsgesellschaft mbH
DLR - Deutsches Zentrum für Luft- und Raumfahrt e. V.
FAV - f.u.n.k.e. Avionics GmbH

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



Änderungsübersicht

Version	Datum	Änderungen	Autor, Firma
0.0	12.04.2024	Dokument angelegt	Altenscheidt Marc, TFC
0.1	18.04.2024	Revision	Altenscheidt Marc, TFC
0.2	13.05.2024	Revision	Altenscheidt, Marc TFC
0.3	10.02.2025	Revision	Altenscheidt, Marc TFC
0.4	14.02.2025	Revision	Altenscheidt, Marc TFC
1.0	04.03.2025	Revision	Altenscheidt, Marc TFC



INHALTSVERZEICHNIS

INHALTSVERZEICHNIS	4
ABKÜRZUNGSVERZEICHNIS.....	6
1. AUFGABENSTELLUNG.....	8
2. ZIELE.....	11
2.1. Förderpolitisches Ziel	11
2.2. Technologische Ziele	11
3. STAND DER WISSENSCHAFT UND TECHNIK.....	12
3.1. Vorarbeiten, Schutzrechte und Konkurrenzsituation.....	12
3.2. Bisherige Arbeiten und Einbettung in andere Vorhaben	12
3.3. Kompetenz und Innovationsbeitrag	12
3.4. Erklärung Schutzrechte und Schutzrechtsanmeldungen	13
4. VERWENDETE FACHLITERATUR	13
5. VERWENDUNG DER ZUWENDUNG UND DES ERZIELTEN ERGEBNISSES	19
5.1. Anforderung Für Schulung	19
5.2. Prozeduren & Schulung.....	20
5.3. Simulator-Validierung.....	20
5.4. Aufbau und Flugvalidierung.....	21
5.5. Wichtigsten Positionen des zahlenmäßigen Nachweises.....	24
5.6. Notwendigkeit und Angemessenheit der geleisteten Arbeit,	24
5.7. Verwertbarkeit des Ergebnisses.....	24
5.8. Während der Durchführung des Vorhabens dem ZE bekannt gewordenen Fortschritts auf dem Gebiet des Vorhabens bei anderen Stellen	24
5.9. Erfolgten und geplante Veröffentlichungen des Ergebnisses	24
6. DEVELOPMENT AND VALIDATION OF POINT-IN-SPACE APPROACH PROCEDURES FOR GENERAL AVIATION AT ESSEN-MÜHLHEIM AERODROME USING THE EUROPEAN GEOSTATIONARY NAVIGATION OVERLAY SERVICE	25
6.1. Introduction	25
6.2. Background.....	26
6.3. Procedure Design	28
6.4. Experimental Setup.....	29
6.5. Conduction of Flight Trials	34
6.6. Results.....	35
6.7. Summary and Conclusion	38
6.8. References.....	39
7. ENTWICKLUNG UND VALIDIERUNG VON PUNKT-IM-RAUM-ANFLUGVERFAHREN FÜR DIE ALLGEMEINE LUFTFAHRT AUF DEM FLUGPLATZ ESSEN-MÜHLHEIM UNTER VERWENDUNG DES EUROPEAN GEOSTATIONARY NAVIGATION OVERLAY SERVICE.....	40
7.1. Einführung	40
7.2. Hintergrund.....	42
7.3. Verfahren Design	44
7.4. Experimenteller Aufbau	46
7.5. Durchführung von Flugversuchen.....	51
7.6. Ergebnisse.....	51
7.7. Zusammenfassung und Schlussfolgerung.....	56
8. AN OPERATIONAL CONCEPT FLYING GLS APPROACHES USING SATELLITE BASED AUGMENTATION SYSTEMS	57
8.1. Abstract.....	57
8.2. Introduction	57
8.3. Charting	59
9. EIN OPERATIONELLES KONZEPT ZUM FLIEGEN VON GLS-ANSÄTZEN MIT SATELLITENGESTÜTZTEN AUGMENTIERUNGSSYSTEMEN.....	61
9.1. Abstrakt	61
9.2. Einführung	61
9.3. Charting	63
9.4. Betrieb und Aufgabenverteilung.....	68



Luftfahrtforschungsprogramm VI
(Erster Aufruf 2020-2024)
Projektbeschreibung GLASS



9.5.	<i>Ergebnisse der Leistungsdaten</i>	75
9.6.	<i>NASA-TLX Fragebogen</i>	80
9.7.	<i>Danksagung</i>	82
9.8.	<i>Performance Data Results</i>	92
9.9.	<i>Post Flight Questionnaire</i>	95
9.10.	<i>NASA-TLX Questionnaire</i>	96
9.11.	<i>Acknowledgements</i>	98
9.12.	<i>References</i>	98
9.13.	<i>Abstrakt</i>	100
9.14.	<i>Einführung</i>	101



ABKÜRZUNGSVERZEICHNIS

AAL	Augmented Approaches to Land
ANASTASIA	Airborne new and Advanced satellite techniques and technologies in a system integrated approach
ATO	Approved Training Organisation
BAF	Bundesaufsichtsamte für Flugsicherung
DFS	Deutsche Flugsicherung GmbH
DLH	Deutsche Lufthansa
DLR	Deutsches Zentrum für Luft- und Raumfahrt e.V.
EASA	European Union Aviation Safety Agency
EGNOS	European Geostationary Navigation Overlay Service
ESA	European Space Agency
FAA	Federal Aviation Administration
FAS	Final Approach Segment
FCS	Flight Calibration Services
FMS	Flight Management Systems
GBAS	Ground Based Augmentation System
GLASS	GLS Anflüge basierend auf SBAS
GLS	GBAS Landing System
GNSS	Global Navigation Satellite System
HAP	Hauptarbeitspaket
HETEREX	Heterogener komplexer Luftverkehr
ICAO	International Civil Aviation Organization
IFR	Instrument Flight Rules
ILS	Instrument Landing System
IMPROWE	IMplementing Rnp Operations With Egnos
KMU	Kleine und Mittlere Unternehmen
LiLOS	Leistungsfähige innovative lokale Satellitennavigation für die Luftfahrt
LINA	Local Integrity Navigation Augmentation
LPV	Localiser Performance with Vertical Guidance
LuFo	Luftfahrtforschungsprogramm
MS	Meilenstein
PANS OPS	Procedures for Air Navigation Services - Aircraft Operations
PBN	Performance Based Navigation
SBAS	Satellite Based Augmentation System



**Luftfahrtforschungsprogramm VI
(Erster Aufruf 2020-2024)
Projektbeschreibung GLASS**



SESAR	Single European Sky ATM Research
VDB	VHF data broadcast
VFR	Visual Flight Rules
VHF	Very High Frequency

1. Aufgabenstellung

Durch steigende Verfügbarkeit moderner Navigationssysteme in Flugzeugen wächst parallel dazu die Möglichkeiten der Nutzung satellitenbasierter Navigation auch an Flughäfen bzw. Flughafennahbereichen. Besonders im Bereich der Anflug- und Landeunterstützung ist man dabei, das herkömmliche Instrumenten-Landesystem (ILS) durch satellitengestützte Systeme zu ergänzen. Die Navigation mit Satellitensignalen basiert auf Signallaufzeitmessungen vom Satelliten zum Empfänger, Kenntnis der Satellitenposition und darauffolgender Triangulation. Diese ist jedoch aufgrund von atmosphärischen Störungen und Rauschen horizontal und vertikal nur mit einer Genauigkeit von einigen Metern möglich. Daher müssen diese Landeunterstützungssysteme mittels Ergänzungssysteme verbessert werden, da sie sonst nicht den hohen Anforderungen für Präzisionsanflüge genügen. Solche Ergänzungen können dabei durch zwei unterschiedliche Verfahren realisiert werden. Zum einen gibt es das, durch Satelliten ergänzte Satellite Based Augmentation System (SBAS) und ein durch eine lokale Bodenstation ergänztes Ground Based Augmentation System (GBAS). GBAS und SBAS unterstützen dabei die Positionsbestimmung durch die Ausstrahlung von Korrektursignalen. Dies erzeugt eine deutlich erhöhte Genauigkeit der Positionsbestimmung, die ausreichend ist, auch in der Vertikalen eine Führung von Luftfahrzeugen in 3 Dimensionen zu ermöglichen. Weiterhin überträgt die Bodenstation Integritäts-Informationen, die die Zuverlässigkeit der Korrektursignale garantieren.

Sowohl GBAS als auch SBAS ermöglichen nun dreidimensionale Präzisionsanflüge bis zu einer Entscheidungshöhe von 200 Fuß über der Landebahnschwelle. Aber, während GBAS, analog zum klassischen Instrumentenlandesystem, eine Bodenstation am Flughafen benötigt, wird das SBAS Signal vom Betreiber den Nutzern kostenlos zur Verfügung gestellt. Dieser erhebliche Kostenvorteil ist vor allem für Regionalflughäfen interessant, an denen ein niedrigeres Verkehrsaufkommen eine GBAS Bodenstation unwirtschaftlich machen würde. Weiterhin sind die Airliner für den kommerziellen Personentransport in der Regel nur mit GBAS ausgerüstet, Businessjets und die allgemeine Luftfahrt haben nur ein SBAS zur Verfügung.

Im Rahmen des geplanten Vorhabens GLASS (GLS Anflüge basierend auf SBAS) wurde der Luftfahrt ein kostengünstiges System zur Verfügung gestellt werden, welches auf einer Kombination der Vorteile beider Augmentierungssystemen beruht. Es kombiniert einen SBAS-fähigen GNSS-Empfänger mit einer Datenbank und einem GBAS-konformen Datenlink. Die vom SBAS-Satelliten empfangenen Korrektur und Integritätsdaten werden vom Gerät in GBAS-kompatible Strukturen umgewandelt und mit dem FAS-Datenblock ans Flugzeug gesandt. Dadurch können die Ablagen direkt an den Autopiloten gesendet werden und automatische Landungen ermöglichen. Das Funktionsprinzip von GLASS verwendet auf der einen Seite den existierenden SBAS-Datenlink, über den die Korrektur- und Integritätsdaten empfangen werden, und auf der anderen Seite den existierenden GBAS-VDB-Datenlink, mittels dessen diese Daten zusammen mit den Anfluginformationen an die Flugzeuge mit vorhandener GLS-Anflugfähigkeit gesendet werden. Dazwischen befindet sich das neu entwickelte GLASS-System welches die Verbindung zwischen den beiden Teilsystemen herstellt.



In den vorangegangenen LuFo Projekten LINA, HETEREX und LiLOS entwickelten die GLASS-Partner DLR und f.u.n.k.e. AVONICS (FAV) bereits einen Empfänger, der GBAS für die allgemeine Luftfahrt zur Verfügung stellt. In dem GLASS-Verbundvorhaben kann nun auf die Erfahrungen und Fähigkeiten aufgebaut werden, um den neuen SBAS- zu GBAS-Umsetzer in Verbindung mit einem entsprechenden VDB-Transmitter soweit zu entwickeln und aufzubauen, dass eine Zulassung durch die entsprechenden Behörden ermöglicht werden kann. Die neuen GLASS-Algorithmen wurden dabei vom DLR entwickelt, das auch das deutsche Patent auf dem System GLASS hält. Weitere internationale Patente sind angemeldet. Durch das breite Anwendungsspektrum von GLASS, von Einsatz als Landesystem für kleinere Flugplätze über Helikopter-Landehilfe bis hin zum mobilen Landesystem, ist gerade auch der Einsatz als kostengünstiges Trainings- und Ausbildungssystem möglich.

Die EU-Verordnung 2016/539 verlangt seit 2016 für alle Piloten mit Instrumentenflugberechtigung, die neue RNP Abflugverfahren nutzen wollen, ein Performance Based Navigation (PBN) Training. Dies sieht eine theoretische und praktische Ausbildung sowie eine anschließende praktische Prüfung vor. Das Projekt GLASS soll dabei helfen, den Ausbildungsinhalt zu PBN zu erweitern und in die Praxisausbildung zu integrieren. In Deutschland gibt es jedoch nur wenige Installationen von GNSS Landing Systemen (GLS) mit dazugehörigen Prozeduren, und diese meist nur an Verkehrsflughäfen mit sehr begrenzter Kapazität für die Ausbildung von Verkehrsflugzeugführern. Durch das breite Anwendungsspektrum von GLASS ist gerade auch der Einsatz als kostengünstiges Trainings- und Ausbildungssystem möglich. Im Rahmen des Projektes wird eine GLASS Bodenstation sowie ein GBAS Empfänger zur Ausbildung bereitgestellt.

Im Gesamtverbundprojekt arbeiten dabei aus folgende Partner zusammen:

- TFC Flugbetrieb und-technik Beratungsgesellschaft mbH
- Deutsches Zentrum für Luft- und Raumfahrt e.V., Braunschweig
- f.u.n.k.e. AVIONICS GmbH, Ulm

In diesem Vorhaben soll TFC folgende Ziele erreichen:

Es werden moderne und zukunftsorientierte Ausbildungskonzepte für Verkehrsflugzeugführer im Bereich PBN entwickelt, die bestehende Standards erweitern oder übertreffen.

Speziell für den Schulbetrieb werden optimierte An- und Abflugtrajektorien eingeführt, die sowohl die Sicherheit verbessern als auch nachhaltige Aspekte berücksichtigen. Gleichzeitig soll dies den angehenden Piloten ein hohes Maß an Vertrauen in die PBN-Technologie vermitteln.

- Die neuen Ausbildungskonzepte sollen von den zuständigen Behörden genehmigt und anschließend in den Schulbetrieb der TFC integriert werden.

Sobald die erweiterten Ausbildungskonzepte für PBN und die neuen Trajektorien ausgearbeitet sind, wird zunächst das Lehrpersonal entsprechend geschult. Anschließend sollen die neuen Inhalte schrittweise in die theoretische und praktische Ausbildung der Flugschüler aufgenommen werden. Während der Projektlaufzeit plant TFC zudem, einen Teil seiner Flotte mit den erforderlichen Bordmitteln



auszustatten, um die durch GLASS erweiterte Navigationsfähigkeit in den regulären Schulbetrieb zu integrieren.

Die neuen Ausbildungsmethoden für PBN sollen zunächst exklusiv am Ausbildungszentrum in Essen angeboten und in den laufenden Betrieb übernommen werden. Dadurch wird das bestehende Alleinstellungsmerkmal des Standorts gesichert und die dortigen Arbeitsplätze gestärkt. In einem nächsten Schritt wird angestrebt, die optimierten Ausbildungsmöglichkeiten und Technologien im Rahmen von Seminaren deutschlandweit zu präsentieren, um zusätzlich neue Arbeitsplätze zu schaffen.

Zudem soll ein geeigneter Flugplatz für die optimierte Navigationsfähigkeit ausgewählt und mit den notwendigen Bodenstationen sowie entsprechenden Prozeduren und Trajektorien ausgestattet werden. Langfristig besteht die Möglichkeit, dass alle deutschen Flugplätze diese erweiterten Möglichkeiten erhalten.

Bis zum Abschluss des Vorhabens sollen die neu entwickelten Ausbildungskonzepte und Anflugverfahren nach behördlicher Genehmigung vollständig in den regulären Lehr- und Ausbildungsbetrieb übernommen werden. Dadurch wird sichergestellt, dass künftige Piloten bereits in ihrer Ausbildung umfassende Kenntnisse im Bereich der PBN-Navigation erwerben.



2. Ziele

Die Ziele des GLASS Verbundvorhabens sind eingebettet in die generellen, förderpolitischen Ziele des Luftfahrtforschungsprogramms LUFO, das die technologische Vorreiterrolle der deutschen Luftfahrtindustrie und der deutschen Forschungseinrichtungen am Standort Deutschland durch Forschungs- und Technologieförderung verbessert sowie die Innovationsfähigkeit und Kompetenz auf nationaler Ebene stärkt. Die technische Kompetenz am Standort Deutschland soll im Bereich innovativer Flugführungssysteme bei allen Verbundpartnern erhalten und weiter ausgebaut werden, in dem ein vom DLR entworfenes System von der patentierten Idee zum industriellen Produkt gebracht werden soll.

2.1. Förderpolitisches Ziel

Im Rahmen dieses Vorhabens soll ein Betrag zur Stärkung von KMU in der Luftfahrtindustrie durch die Unterstützung von Technologie- und Produktentwicklungen geleistet werden. Die vom DLR entwickelte innovative Technologie zu satellitengestützten Anflugsystemen soll in diesem Vorhaben weiterentwickelt und transferiert werden, um eine nachhaltige Stärkung und Erweiterung der bei den beteiligten KMUs vorhandenen Kernkompetenzen zu erreichen sowie deren Wertschöpfungsanteile innerhalb der deutschen Luftfahrtindustrie zu vergrößern. Das neu entwickelte System ermöglicht eine erweiterte und engere Zusammenarbeit in Forschungs- und Technologieverbänden mit europäischen und internationalen Partnern sowie eine erweiterte Partizipation von kleineren und mittleren Unternehmen in Deutschland am weltweiten Wachstumspotenzial der Luftfahrtbranche. Neben der Unterstützung beim Technologietransfer wird sich das DLR seine Expertise bei der Softwareentwicklung der einzelnen Komponenten sowie bei der Vorbereitung der Zulassung des Gesamtsystems einbringen.

2.2. Technologische Ziele

Gegenwärtig können automatische Landungen nur mit Präzisionsführungssystemen wie ILS, MLS oder GLS durchgeführt werden. Diesen Systemen ist gemeinsam, dass die Führungssignale direkt vom Empfangsgerät in den Autopiloten geleitet werden. Dieser übernimmt die Steuerung des Flugzeugs zur Landung. Für das bodenbasierte GLS sendet eine Bodenstation Korrekturen für die Satellitensignale aus. Weiterhin überträgt die sie Anfluginformationen, wie Koordinaten der Schwelle, Richtung und Sinkwinkel. Der Empfänger errechnet aus diesen Daten dann Ablagen und überträgt diese direkt an den Autopiloten. Bei einem satellitenbasierenden System (SBAS) werden ebenfalls Korrekturen ausgesendet. Diese werden aber über einen geostationären Satelliten versandt. Die Anfluginformationen werden jedoch in der Datenbank des Flight Management Systems (FMS) gespeichert. Die Ablagen werden vom FMS berechnet und an den Autopiloten weitergeleitet. Die genannten Systeme erlauben jedoch keine automatische Landung mit Führung durchs FMS. Hierfür wäre eine kostspielige Zertifizierung des Autolandesystems erforderlich. Mit dem GLASS-System sollen die Vorteile beider Augmentationssysteme verbunden werden. Die SBAS-Daten werden in GLS-kompatible Strukturen umgewandelt und mit den Anflugdaten an den Empfänger gesendet. Dieser kann direkt Ablagen an den Autopiloten senden und automatische Landungen werden möglich.



3. Stand der Wissenschaft und Technik

3.1. Vorarbeiten, Schutzrechte und Konkurrenzsituation

Die TFC, eine der größten Verkehrsfliegerschulen in Deutschland steht nicht nur im harten Wettbewerb in der Luftfahrt mit den Pilotenausbildungszentren innerhalb Deutschlands und der europäischen Union, sondern im international globalen Vergleich. Um hier den Standortvorteil Deutschland zu stärken, sowie das Prädikat „Made in Germany“ zu festigen und sich gegenüber den zuvor erwähnten Konkurrenten behaupten zu können werden moderne Ansätze im Bereich der Ausbildung von Piloten benötigt. Speziell mit der noch jungen Navigationsmöglichkeit nach PBN ist es möglich nicht nur den Wissensvorsprung zu halten sondern auch auszubauen.

3.2. Bisherige Arbeiten und Einbettung in andere Vorhaben

TFC hat sich zum Ziel gesetzt, die Schulung von Piloten, Lotsen und technischem Bodenpersonal ständig auf den neusten Stand zu halten und dementsprechend an aktuelle Entwicklungen anzupassen. Gerade für eine adäquate und effiziente Nutzung aller vorhandenen Systeme in der Luftfahrt sowie die Umsetzung neuester EU Richtlinien ist eine ständige Erweiterung der Lehrmöglichkeiten, wie z.B. die aktuell geforderte PBN Fähigkeit, erforderlich. Nur sehr gut ausgebildetes Personal kann auch zur Sicherheit des Luftverkehrs beitragen. Somit ist das Vorhaben in die internen Projekte zur Aktualisierung des Lehrbetriebes eingebettet.

3.3. Kompetenz und Innovationsbeitrag

TFC ist eine der größten Ausbildungseinrichtungen für Luftfahrtpersonal am Standort Deutschland. Gegenwärtig besteht die Schulungsflotte aus 15 Ausbildungsflugzeugen sowie neun Flugsimulatoren. In Kooperation mit Condor und Aerologic bildet die TFC angehende Verkehrspiloten und Fluglehrer aus. Im Jahr 2018 waren dies z.B. 60 Verkehrspiloten und Fluglehrer. Für die Lufthansa Aviation Training GmbH betreibt die TFC drei Airbus A320 Flugsimulator. In der Instrumentenflug-Ausbildung wird durch die Integration von praktischer Ausbildung mit synergistischen Theorieteilern ein hohes Maß an Kompetenz, Wissen und Fertigkeit beim Auszubildenden erreicht. TFC ist eine vom Luftfahrt-Bundesamt genehmigte ATO und bietet in Zusammenarbeit mit der Hochschule FOM in Essen eine duale Ausbildung zum Verkehrsflugzeugführer und Bachelor of Business Administration an. Der für GLASS verantwortliche Projektleiter war Chefpilot der Boeing 737 Flotte von Air Berlin und weist große Sachkompetenz im Bereich PBN auf. Er berät Airbus NavBlue, die chinesischen Luftfahrtbehörden im Bereich angewandte performanzbasierter Navigationskonzepte, war maßgeblich bei der Einführung des ersten RNP AR Anfluges auf Innsbruck beteiligt. Weiterhin arbeitete er im Projekt HETEREX und validierte die GBAS Station in Braunschweig. Im EU Projekt FILGAP führte er die Umsetzung und Flugvalidation von Advanced RNP Übergängen zu SBAS LPV Endanflügen in Saarbrücken durch.

3.4. Erklärung Schutzrechte und Schutzrechtsanmeldungen

Es stehen keine Lizenzvereinbarungen Dritter einer späteren Vermarktung entgegen. Der Konsortial-Partner DLR hält ein Patent an dem zu implementierenden Verfahren und hat seine Bereitschaft über eine spätere Lizenzierung für eine spätere Vermarktung erklärt. Die TFC Ausbildungseinrichtungen wird unter der Nummer DE.ATO.007 beim Luftfahrtbundesamt geführt.

4. Verwendete Fachliteratur

Die verwendete Literatur umfasst die Gesetzestexte der EASA Flight Crew Licensing, relevante Merkblätter des Luftfahrt-Bundesamts (LBA) sowie Nachrichten für Luftfahrer (NfL). Dabei wurden auch die von LBA zugelassenen Ausbildungshandbücher, Betriebsanleitungen und Pilotenhandbücher für die Flugzeuge Cessna C152, Piper PA28 und Piper PA44 berücksichtigt.

Weiterhin wurde im Projekt folgende Literatur gemeinsam mit den Partnern verwendet

- [1] L. Sanders and V. Fritch, "Instrument landing systems," IEEE Transactions on Communications, vol. 21, pp. 435–454, 1973, doi: 10.1109/TCOM.1973.1091710.
- [2] T. Dautermann, M. Felux, and A. Grosch, "Approach service type D evaluation of the DLR GBAS testbed," vol. 16, pp. 375–387, 2012, doi: 10.1007/s10291-011-0239-3.
- [3] T. Dautermann, "Civil air navigation using GNSS enhanced by wide area satellite based augmentation systems," vol. 67, pp. 51–62, 2014, doi: 10.1016/j.paerosci.2014.01.003.
- [4] RTCA, Inc., "DO-278A - Software Integrity Assurance Considerations for Communication, Navigation, Surveillance and Air Traffic Management (CNS/ATM) Systems." Dec. 2011.
- [5] RTCA, Inc., "DO-278A: Software Integrity Assurance Considerations for Communication, Navigation, Surveillance and Air Traffic Management (CNS/ATM) Systems - Errata 1." Feb. 2021.
- [6] L. Rierson, Developing safety-critical software: A practical guide for aviation software and DO-178c compliance. Boca Raton: CRC Press/Taylor & Francis Group, 2013.
- [7] RTCA, Inc., "DO-178C - Software Considerations in Airborne Systems and Equipment Certification." Dec. 2011.
- [8] RTCA, Inc., "DO-178C: Software Considerations in Airborne Systems and Equipment Certification - Errata 1." Feb. 2021.
- [9] T. Dautermann, T. Ludwig, R. Geister, and L. Ehmke, "Extending access to localizer performance with vertical guidance approaches by means of an SBAS to GBAS converter," GPS Solutions, vol. 24, no. 2, p. 37, Apr. 2020, doi: 10.1007/s10291-019-0947-7.



- [10] International Civil Aviation Organization, “Annex 10 to the Convention on Civil Aviation - Aeronautical Telecommunication.” Jul. 2018.
- [11] RTCA, Inc., “DO-254 - Design Assurance Guidance For Airborne Electronic Hardware.” Apr. 2000.
- [12] RTCA, Inc., “DO-330 - Software Tool Qualification Considerations.” Dec. 2011.
- [13] SAE International, “ARP4761 - Guidelines and Methods for Conducting the Safety Assessment Process on Civil Airborne Systems and Equipment.” Dec. 1996.
- [14] V. Hilderman and T. Baghi, Avionics certification: A complete guide to DO-178 (software), DO-254 (hardware). Leesburg, VA: Avionics Communications, 2007.
- [15] “Verordnung über Art, Umfang, Beschaffenheit, Zulassung, Kennzeichnung und Betrieb von Anlagen und Geräten für die Flugsicherung (Flugsicherungs-Anlagen- und Geräte-Musterzulassungs-Verordnung - FSMusterzulV).” Dec. 2001. [Online]. Available: https://www.baf.bund.de/SharedDocs/Downloads/DE/Publikationen_BAFReferate/ST/ST_FS_MusterzulV.pdf?__blob=publicationFile&v=2
- [16] DFS Deutsche Flugsicherung GmbH, “NfL II 51 / 08 - Bekanntmachung über die Anforderungen zur Musterzulassung von GBAS-Bodenanlagen als Flugnavigationsfunkstelle.” Sep. 2008. [Online]. Available: https://www.baf.bund.de/SharedDocs/Downloads/DE/Publikationen_BAFReferate/ST/ST_MusterZ-NfL-II-51-08-GBAS.pdf?__blob=publicationFile&v=2
- [17] SAE International, “ARP4754A - Guidelines for Development of Civil Aircraft and Systems.” Dec. 2010.
- [18] RTCA, Inc., “DO-248C - Supporting Information for DO-178C and DO-278A.” Dec. 2011.
- [19] European Organization for Civil Aviation Equipment (EUROCAE), “ED-114A - Minimum Operational Performance Specification for Global Navigation Satellite Ground Based Augmentation System Ground Equipment to Support Category I Operations.” Mar. 2013.
- [20] European Union Aviation Safety Agency, “Certification Specifications and Acceptable Means of Compliance for Large Aeroplanes CS-25.” Dec. 2020. [Online]. Available: https://www.easa.europa.eu/sites/default/files/dfu/cs-25_amendment_26_0.pdf
- [21] RTCA, Inc., “DO-248C: Supporting Information for RTCA/DO-178C and RTCA/DO-278A - Errata 1.” Feb. 2021.
- [22] RTCA, Inc., “DO-330: Software Tool Qualification Considerations - Errata 1.” Feb. 2021.
- [23] RTCA, Inc., “DO-331 - Model-Based Development and Verification Supplement to DO-178C and DO-278A.” Dec. 2011.
- [24] RTCA, Inc., “DO-331: Model-Based Development & Verification Supplement to RTCA/DO-178C and RTCA/DO-278A - Errata 1.” Feb. 2021.

- [25] RTCA, Inc., “DO-332 - Object-Oriented Technology and Related Techniques Supplement to DO-178C and DO-278A.” Dec. 2011.
- [26] RTCA, Inc., “DO-333 - Formal Methods Supplement to DO-178C and DO-278A.” Dec. 2011.
- [27] PATMOS Engineering Services, Inc., “DO-178C templates for evaluation.” Accessed: Mar. 26, 2021. [Online]. Available: <https://www.avionics-certification-academy.com/courses/129421/lectures/1894924>
- [28] S. Kleuker, Grundkurs Software-Engineering mit UML: Der pragmatische Weg zu erfolgreichen Softwareprojekten. Wiesbaden: Springer Vieweg, 2018. [Online]. Available: <http://dx.doi.org/10.1007/978-3-658-19969-2>
- [29] A. Stellman and J. Greene, “Applied Software Project Management.” online, 2006
- [30] “Performance-based navigation (PBN) manual.” International Civil Aviation Organization; ICAO, Montreal, 2008.
- [31] T. Dautermann, “Civil air navigation using {gnss} enhanced by wide area satellite based augmentation systems,” Progress in Aerospace Sciences, vol. 67, no. 0, pp. 51–62, 2014, doi: 10.1016/j.paerosci.2014.01.003.
- [32] T. Dautermann, M. Felux, and A. Grosch, “Approach service type D evaluation of the DLR GBAS testbed,” GPS Solutions, vol. 16, no. 3, pp. 375–387, 2012, doi: 10.1007/s10291-011-0239-3.
- [33] T. Dautermann, “Civil air navigation using gnss enhanced by wide area satellite based augmentation systems,” Progress in Aerospace Sciences, vol. 67, pp. 51–62, 2014, doi: 10.1016/j.paerosci.2014.01.003.
- [34] M. Felux, T. Dautermann, and H. Becker, “GBAS landing system – precision approach guidance after ILS,” Aircraft Engineering and Aerospace Technology, vol. 85, no. 5, pp. 382–388, Jan. 2013, doi: 10.1108/AEAT-07-2012-0115.
- [35] T. Dautermann, T. Ludwig, R. Geister, L. Ehmke, and M. Fermor, Eds., GLS approaches using sbas: A sbas to gbas converter. 2019. Available: http://www.atmseminarus.org/seminarContent/seminar13/papers/ATM_Seminar_2019_paper_1.pdf
- [36] Radio Technical Commission for Aeronautics, “GNSS-based precision approach local area augmentation system (laas) signal-in-space interference control document (icd).”
- [37] International Civil Aviation Organization, “Annex 10, aeronautical telecommunications, volume 1 (radio navigation aids), seventh edition, published july 2018, effective 8 november 2018,” 2018.
- [38] G. K. Crosby et al., “A ground-based regional augmentation system (gras)-the australian proposal,” in Proceedings of the 13th international technical meeting of the satellite division of the institute of navigation (ion gps 2000), 2000, pp. 713–721.

- [39] T. Dautermann, T. Ludwig, R. Geister, and E. Akkogiounoglou, “Benefits for greek regional airports through innovative approach technology using an lpv to gls converter: A case study for corfu and thessaloniki,” *IEEE Aerospace and Electronic Systems Magazine*, vol. 36, no. 4, pp. 36–44, 2021, doi: 10.1109/MAES.2021.3050678.
- [40] T. Dautermann, T. Ludwig, R. Geister, and L. Ehmke, “Extending access to localizer performance with vertical guidance approaches by means of an sbas to gbas converter,” *GPS Solutions*, vol. 24, no. 2, p. 37, 2020, Available: <https://link.springer.com/article/10.1007/s10291-019-0947-7>
- [41] International Civil Aviation Organization, “Annex 15 to the convention on international civil aviation aeronautical information services,” 2013, Available: <https://www.icao.int/NACC/Documents/Meetings/2014/ECARAIM/REF05-Annex15.pdf>
- [42] J. J. Biernatzki, “Operational Concept Development and Evaluation of Pilots Acceptance of the GLASS SBAS to GLS Converter,” MS thesis, Technische Universität Braunschweig, 2021.
- [43] AIRBUS S.A.S, “DLR a318/a319/a320/a321 quick reference handbook.” 2017.
- [44] International Civil Aviation Organization, “Doc 8168 Procedures for Air Navigation Services Aircraft Operations Volume II Construction of Visual and Instrument Flight Procedures.” 2020.
- [45] D. de Waard, *The measurement of drivers’ mental workload*. Haren, the Netherlands: Groningen University, Traffic Research Center, 1996.
- [46] A. Alaimo, A. Esposito, C. Orlando, and A. Simoncini, “Aircraft pilots workload analysis: Heart rate variability objective measures and nasa-task load index subjective evaluation,” *Aerospace*, vol. 7, no. 9, p. 137, 2020.
- [47] M. G. Mykityshyn, J. K. Kuchar, and R. J. Hansman, “Experimental study of electronically based instrument approach plates,” *The International Journal of Aviation Psychology*, vol. 4, no. 2, pp. 141–166, 1994, doi: 10.1207/s15327108ijap0402_3.
- [48] M. Yeh, J. Jaworski, and S. Chase, “Pilot perceptions on the integration of electronic flight bag information in new flight deck designs,” *Proceedings of the Human Factors and Ergonomics Society Annual Meeting*, vol. 63, no. 1, pp. 91–95, 2019, doi: 10.1177/1071181319631335.
- [49] N. C. M. van Zon, C. Borst, D. M. Pool, and M. M. van Paassen, “Touchscreens for Aircraft Navigation Tasks: Comparing Accuracy and Throughput of Three Flight Deck Interfaces Using Fitts’ Law,” *Human Factors*, vol. 62, no. 6, pp. 897–908, 2020, doi: 10.1177/0018720819862146.
- [50] S. G. Hart, “NASA task load index (tlx): Paper and pencil package.” NASA, Mofett Field California, 1986.



- [52] S. G. Hart, "Nasa-task load index (nasa-tlx); 20 years later," Proceedings of the Human Factors and Ergonomics Society Annual Meeting, vol. 50, no. 9, pp. 904–908, 2006, doi: 10.1177/154193120605000909.
- [53] Abdelmoula F, Scholz M (2018) LNAS - a Pilot Assistance System for Low-Noise Approaches with Minimal Fuel Consumption. In Proceedings of the 31st Congress of the International Council of the Aeronautical Sciences, 96:1-14
- [54] AMC2027 (2009) Airworthiness Approval and Operational Criteria for RNP Approach (RNP APCH) Operations Including APV BAROVNAV Operations, European Aviation Safety Agency, Cologne, Germany
- [55] AMC2028 (2012) Airworthiness Approval and Operational Criteria related to Area Navigation for Global Navigation Satellite System approach operation to Localiser Performance with Vertical guidance minima using Satellite Based Augmentation System, European Aviation Safety Agency, Cologne.
- [56] ARINC429-20 (2001) Mark 33 Digital Information Transfer System (DITS) Part 1: Functional Description, Electrical Interface, Label Assignments and Word Formats. Aeronautical Radio, Inc, Annapolis, MD
- [51] Crosby GK, Kraus DK, Ely WS, Cashin TP, McPherson KW., Bean KW, Stewart JM, Elrod BD, (2000) A Ground-based Regional Augmentation System (GRAS) - The Australian Proposal, Proc ION GPS 2000, Salt Lake City, UT, September 2000, pp. 713-721.
- [57] Dautermann T (2014) Civil Air Navigation Using GNSS Enhanced by Wide Area Satellite Based Augmentation Systems. Progress in Aerospace Sciences 67 (0): 51–62.
- [58] Dautermann T, Felux M and Grosch A (2012) Approach Service Type D Evaluation of the DLR GBAS Testbed. GPS Solutions 16 (3): 375–387.
- [59] EASA (2018). Certification Specification 25: Large Aeroplanes, European Aviation Safety Agency , Cologne, Germany
- [60] ED75D (2000). Minimum Aviation System Performance Specification Required Navigation Performance for Area Navigation ED75D. European Organisation for Civil Aviation Equipment (EUROCAE), St. Denis, France
- [61] ESSP (2016) EGNOS Safety of Life (Sol) Service Definition Document V3.1, European Satellite Service Provider, Madrid, Spain
- [62] ED114B (2019). Minimum Operational Performance Specification for Global Navigation Satellite Ground Based Augmentation System Ground Equipment to Support Category I Operations. European Organisation for Civil Aviation Equipment , Saint Denis
- [63] Felux M, Circiu MS, Lee J, Holzapfel F (2017). Ionospheric Gradient Threat Mitigation in Future Dual Frequency GBAS. International Journal of Aerospace Engineering. <https://doi.org/10.1155/2017/4326018>



- [64] Forssell B (2008). Radionavigation Systems. GNSS Technology and Applications Series. Artech House, Norwood, VA
- [65] ICAO (2012) Performance-Based Navigation Manual, DOC9613 Fourth Edition. International Civil Aviation Organisation, Montreal, Canada
- [66] ICAO (2014) Procedures for Air Navigation Services Volume 2. DOC8168-OPS/611. Sixth Edition, International Civil Aviation Organization, Montreal
- [67] ICAO (2018) Annex 10 to the Convention on International Civil Aviation: Aeronautical Telecommunications, Volume 1: Radio Navigation Aids, Seventh Edition July 2018
- [68] Misra P, Enge P (2006). Global Positioning System: Signals, Measurements and Performance. Ganga-Jamuna Press, Lincoln MA
- [69] Pavlis NK, Holmes SA, Kenyon SC, Factor JK. (2008) An Earth Gravitational Model to Degree 2160: EGM2008." In Proceedings of the 2008 General Assembly of EGU. Vienna, Austria: European Geophysical Union, G22A-0
- [70] Rife J, Pullen S, Walter T, Phelts E, Pervan B, Enge P (2006) WAAS-Based Threat Monitoring for a Local Airport Monitor (LAM) That Supports Category I Precision Approach. Proc. IEEE/ION PLANS 2006, 468–82.
- [71] Rife J, Pullen S, Walter T, Enge P (2005) Vertical Protection Levels for a Local Airport Monitor for WAAS." In Proceedings of the 61st Annual Meeting of the Institute of Navigation 2005, 745–758.
- [72] RTCA (2004) Minimum Aviation System Performance Standards for Local Area Augmentation System (LAAS). Document 245A, Radio Technical Commission for Aeronautics, Washington DC
- [73] RTCA (2016). Minimum Operational Performance Standards for Global Positioning System / Wide Area Augmentation System Airborne Equipment. Document 229E Radio Technical Commission for Aeronautics, Washington DC.
- [74] RTCA (2017a) GNSS-Based Precision Approach Local Area Augmentation System (LAAS) Signal-in-Space Interface Control Document, Document 246E . Radio Technical Commission for Aeronautics , Washington DC
- [75] RTCA (2017b) Minimum Operational Performance Standards for GPS Local Area Augmentation System Airborne Equipment. Document 253E, Radio Technical Commission for Aeronautics , Washington DC
- [76] Shively CA (2006) Ranging Source Fault Integrity Concepts for a Local Airport Monitor for WAAS, Proc. ION NTM 2006, Institute of Navigation, Monterey, CA, January 2006, 413-431
- [77] Shively CA, Niles R, Hsiao TT (2006) Performance and Availability Analysis of a Simple Local Airport Position Domain Monitor for WAAS. Navigation 53(2): 97–108.
- [78] Sorenson HW (1980) Parameter Estimation: Principles and Problems. Marcel Dekker.



[79] van Graas, Frank, Krishnan, Vignesh, Suddapalli, Rajesh, Skidmore, Trent, "Conspiring Biases in the Local Area Augmentation System," Proceedings of the 60th Annual Meeting of The Institute of Navigation (2004), Dayton, OH, June 2004, pp. 300-307.

[80] Walter T, Hansen A, Enge P (1999) Validation of the WAAS MOPS Integrity Equation. Proceedings of the 55th Annual Meeting of the Institute of Navigation, 27-30 June 1999 Cambridge, MA, 217–26.

[81] Walter T, Blanch J, Rife J (2004) Treatment of Biased Error Distributions in SBAS, Journal of Global Positioning Systems Vol 3 (1-2), p. 265-273

5. Verwendung der Zuwendung und des erzielten Ergebnisses

Die TFC hatte im GLASS-Projekt nicht nur die Projektleitung inne, sondern fungierte auch als Konsortialführer. Ihre Aufgaben umfassten gemeinsame Validierungsaktivitäten sowohl im Simulator als auch im Flugzeug während der Feldversuche. Die gewonnenen Erkenntnisse flossen direkt in die Ausbildungsinhalte für Lehrpersonal und angehende Piloten ein, was dazu beitrug, ein Höchstmaß an technologischem Know-how im Bereich der Performance-basierten Navigation (PBN) zu erreichen und damit an die Azubildenden angehenden Verkehrsflugzeugführer weiterzugeben.

5.1. Anforderung Für Schulung

Es wurden Richtlinien für die Schulung von Piloten gemäß den aktuellen PBN-Kriterien zusammengetragen. Dabei wurden insbesondere die Vorgaben internationaler Gremien sowie nationale Umsetzungsverordnungen berücksichtigt.

5.2. Prozeduren & Schulung

Zur Unterstützung des Projektpartners TFC wurden gemeinsam mit dem Projektpartner DLR Prozedurenentwürfe gemäß ICAO DOC 8168 und ARINC424 konforme Tabellierungen für Anflüge auf den Schulungsflughafen Essen Mülheim erstellt. Diese wurden in Navigationsdatenbanken eingebunden und gemeinsam im TFC-Simulator der Klasse D für ein Part 25 Flugzeug validiert.

5.3. Simulator-Validierung

TFC führte zusammen mit dem DLR die Validierung der erstellten Prozeduren gemäß den Richtlinien von ICAO DOC 9906 Volume 5 und den ARINC424-Standards für die tabellarische Darstellung von Anflügen auf den Schulungsflughafen Essen Mülheim durch. Diese Prozeduren wurden in Navigationsdatenbanken integriert und gemeinsam im Simulator der Klasse D für ein Part 25 Flugzeug validiert.



5.4. Aufbau und Flugvalidierung

Der GLASS-Prototyp wurde sowohl an drei Flughäfen der FraPort Greece als auch in Essen Mühlheim installiert. Hierbei erfolgte die notwendige Koordination mit den jeweiligen Flughafenbetreibern sowie der Flugsicherung für die Durchführung der Flüge. Die Installationen und Validierungen wurden FraPort Greece mit dem DLR-Forschungsflugzeug und in Essen mit einem Flugzeug von TFC durchgeführt. Die erhobenen Daten für Essen Mühlheim wurden ausgewertet und werden auf dem DLRK2024 präsentiert. Der entsprechende Bericht ist als Kapitel 6 in diesen Bericht inkludiert.



Die Durchführung der Flugversuche erfolgte in mehreren Phasen, die systematisch strukturiert waren. Zunächst wurde der Standort für den Aufbau des GLASS-Senders präzise festgelegt, wobei die Auswahlkriterien eine optimale Signalübertragung und -stabilität gewährleisteten. Nach den ersten Flugversuchen wurde festgestellt, dass die Antennenabstrahlung in Richtung Norden durch den Tower abgeschirmt wurde, was zu einer Beeinträchtigung der Signalqualität führte.



Aufgrund dieser Beobachtung war es erforderlich, für den zweiten Versuch eine neue Position für den GLASS-Sender zu finden, die eine ungestörte Ausbreitung des Signals in alle Richtungen ermöglichte. Diese Anpassung des Standorts wurde sorgfältig durchgeführt, um sicherzustellen, dass die Testbedingungen für alle Durchläufe konsistent blieben und die Integrität der Versuchsergebnisse gewahrt wurde.

Im Anschluss erfolgte eine detaillierte Überprüfung der Empfangskompatibilität mittels Bodentests, bei denen verschiedene Empfangsgeräte auf ihre Effektivität getestet wurden. Diese Tests wurden durch wiederholtes Befahren der Start- und Landebahnen in unterschiedlichen Richtungen ergänzt, um eine umfassende Analyse der Signalintegrität sicherzustellen.



Die eigentlichen Flugversuche wurden in mehreren Durchläufen durchgeführt, wobei sowohl Abflug- als auch Anflugprozeduren untersucht wurden. Dabei wurden verschiedene Szenarien und Flugbedingungen berücksichtigt, um eine umfassende Bewertung der Systemleistung zu ermöglichen. Jeder Durchgang wurde sorgfältig dokumentiert und analysiert, um potenzielle Muster oder Abweichungen zu identifizieren.



Die durchgeführten Tests wurden streng nach wissenschaftlichen Methoden und Protokollen durchgeführt, wobei präzise Messungen und Datenanalyse verwendet wurden, um valide Schlussfolgerungen zu ziehen. Die Ergebnisse dieser Flugversuche bilden eine solide Grundlage für die Bewertung der Funktionalität und Effizienz des GLASS-Senders im Flugbetrieb.





5.5. Wichtigsten Positionen des zahlenmäßigen Nachweises

Im zahlenmäßigen Nachweis stehen insbesondere Personalkosten und Reisekosten im Vordergrund. Diese Ressourcen wurden eingesetzt, um die oben genannten Ziele zu erreichen. Darüber hinaus sind direkte Projekt- oder Vorhabenkosten aufgeführt. Diese direkten Kosten wurden für die Anpassung und Zulassung des Test- und Messequipments an Bord verwendet.

Zur Validierung wurden mehr als 16 Flugstunden im Airbus A320 Flugsimulator (Full-Flight, Full Motion Level D) sowie drei Flugtage mit insgesamt 12,5 Flugstunden auf der PA-44 durchgeführt.

5.6. Notwendigkeit und Angemessenheit der geleisteten Arbeit,

5.7. Verwertbarkeit des Ergebnisses

Der TFC stehen nun bewährte und sichere Anflugprozeduren im Bereich PBN zur Verfügung. Die validierte An- und Abflugprozeduren sind bereit nach VFR-Regeln in den operationellen Schulungsbetrieb überzugehen. Es konnte nicht nur die Schulungspläne, sondern auch eigene Ab- und Anflugverfahren, die im Rahmen der Ausbildung durch TFC unter Verwendung des neuen GLASS-Systems angewendet werden als abgeschlossener Meilenstein der "Wissensvorsprung" sowie "Erstellung von Ab- und Anflugverfahren" zugeordnet werden. Durch die neuen Verfahren ist es nun möglich, vermehrt Ausbildung nach Instrumentenflugregeln auch im Anflug auf den Flugplatz Essen-Mühlheim durchzuführen. Das bislang gültige Verfahren, morgens mit der deutschen Flugsicherung Anflugslots auf Düsseldorf oder Dortmund zu verhandeln kann nun reduziert werden. Dadurch wird die Effizienz der Ausbildung enorm gesteigert.

5.8. Während der Durchführung des Vorhabens dem ZE bekannt gewordenen Fortschritts auf dem Gebiet des Vorhabens bei anderen Stellen

Nicht bekannt.

5.9. Erfolgten und geplante Veröffentlichungen des Ergebnisses

Innerhalb der Organisation gemäß den genehmigten Ausbildungshandbüchern des Luftfahrt-Bundesamts als auch während des laufenden Schulflugbetriebs in wiederkehrenden Schulungen des Lehrkörpers. Gemeinsam mit den Projektpartnern ist ein Manuskript für den deutschen Luft und Raumfahrtkongress 2024 in Arbeit. Dieses soll dann auch im CEAS Aeronautical Journal publiziert werden.

6. *Development and Validation of Point-in-Space Approach Procedures for General Aviation at Essen-Mühlheim Aerodrome Using the European Geostationary Navigation Overlay Service*

6.1. Introduction

Within pilot training for flying in instrument meteorological conditions (IMC) precision approaches play an important role. To practise the proper usage of lateral and vertical guidance information to conduct a stable and safe approach an instrument landing system is required at the particular airport. Flight schools often use general aviation aircraft as those types fit best for the needs of education. In order to keep operating costs low as well as being more flexible in flight operations flight schools are usually based at smaller airports which, however are often not equipped with instrument approach capabilities. Hence, the practising of precision approaches has to take place on bigger airports with higher traffic flow which then gets disturbed and can decrease the overall efficiency. Furthermore, such training sessions require prior notification of air traffic control. In Germany, beside many flight schools being based at smaller airports, these airports are located in vicinity of high traffic airports leading to an overall high density of airports and an overall more complex airspace structure. This can elicit a higher risk of airspace infringement events affecting not only training flights but all general aviation flights under visual flight rules (VFR) as they are conducted in uncontrolled airspace. Airspace infringements can lead to an compromised safety and efficiency of air traffic in the affected area as countering the increased risk of a mid-air collision due to the intruder aircraft requires reorganization of air traffic flow which in turn can cause delays. Within the scope of the European Action Plan for Airspace Infringement Risk Reduction (EAPAIRR) published by Eurocontrol data on airspace infringements was collected and analyzed showing that a majority of infringement events involve GA flights under VFR and happen in Terminal Control Areas (TMA) and Control Zones (CTR). Main reasons identified for an airspace infringement include improper navigation and flight planning as well as unexpected meteorological situations and distraction in the cockpit [1]. Focusing on the navigation aspect the usage of space-based navigation in GA is today state-of-art with the global positioning system (GPS) currently most widely used in aviation though being still an assisting technology when flying under VFR and not mandatory. For an effective use of GPS and hence as a tool to prevent from airspace infringements, regular updates of the navigation database are required. This paper proposes the usage of a cost-effective ground based augmentation system (GBAS) converter to provide navigation database independent RNP approach procedures. By this, flight schools can practise precision approaches at their base airport in

uncontrolled airspace rectifying the air traffic flow on high traffic airports as well as the defined procedures could be used by general purpose to obtain guidance information reducing the risk of airspace infringements when flying in the vicinity of complex air spaces. Within this work three approaches on Essen/Mühlheim regional airport were developed for this purpose and subsequently validated through flight testing. The following chapters firstly give a short system overview over the mentioned cost-effective GBAS converter as well as the characteristics of a GBAS approach and the later used methodology for validation of those. Subsequently, the eligibility of Essen/Mühlheim regional airport for this work and the development of the approaches will be outlined. The experimental equipment and setup used for the flight tests is described in Chapter 4. Chapter 5 focuses on the flight test conduction where results are presented and analyzed in Chapter 6. Finally, the work will be summarized and discussed with reference for further research.

6.2. Background

Ground based augmentation systems (GBAS) provide precision approach guidance and is a possible successor of the instrument landing system (ILS). A GBAS is based on the differential GNSS principle and augments a GNSS for monitoring as well as improving accuracy, integrity, continuity and availability. By this the required performance for precision approach operations can be ensured. Consisting of a space, ground and user segment the space segments covers the navigation signals of the GNSS to

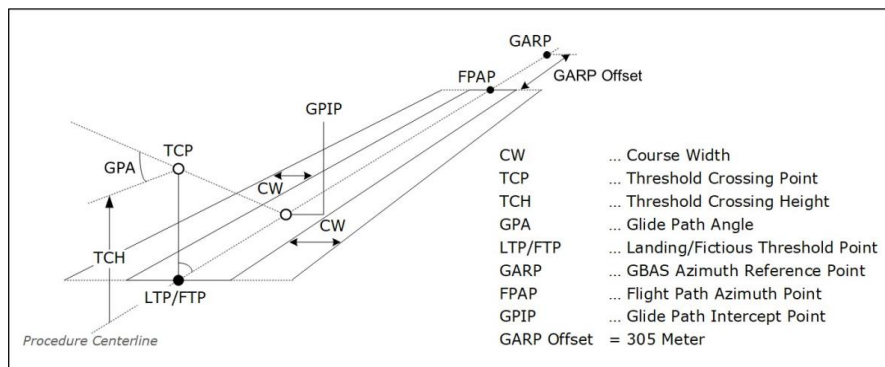


Fig. 1 Geometry of the GBAS Final Approach Segment

be augmented. As already stated the GPS is widely used in aviation and accordingly further explanations will reference to this GNSS. The GBAS ground segment consists of two up to four GPS reference receivers as well as a ground processing station and a VHF transmitter. The GPS reference receivers are placed in vicinity of each other on the airport area at surveyed positions. All calculated position solutions are then processed and compared against each other and with the surveyed position. By this, differential corrections for each GPS satellite in view can be calculated. Furthermore also the overall GPS health and system status is monitored and several integrity parameters are calculated. Finally, the ground processing



station provides an approach database required as reference path for later guidance information calculation by the user segment. One GBAS can provide up to 49 individual approaches whereas each approach is designed as shown in Figure 1. To provide the all necessary information including differential corrections, integrity parameters, additional GBAS station characteristics and the approach database to the user segment a very high frequency (VHF) data broadcast (VDB) is used. The VDB is transmitted on a frequency in the range between 108,00MHz and 117,950MHz and its coverage is limited to an approximately 23 nautical miles radius from the transmitter. This limitation persists because the accuracy of differential corrections decreases with greater distance from the user user to the ground segment. The GBAS user segment comprises all required on-board equipment to determine a position solution using GPS, to process the received VDB and to calculate guidance information which are fed to the display and flight control system. In commercial aviation the Multi-Mode-Receiver (MMR) thereby combines GNSS, GBAS and ILS functionality amongst others. In order to calculate guidance information firstly the GBAS correction parameters are applied to internally determined GPS position solution. The integrity parameters are then used to calculate lateral and vertical error bounds on the enhanced position solution also referred to as protection levels. With the provided approach parameters a reference path can be obtained against which the enhanced position solution is compared resulting in lateral and vertical guidance information. To ensure their validity the protection levels are continuously compared to the maximum allowed position uncertainty also transmitted with the approach data. With the same way of representing guidance information to the pilot as for an ILS makes GBAS highly compatible with existing instruments and cockpit operating procedures making it also suitable for precision approach training purpose. A major difference is the selection of an approach as for an GBAS a five digit channel number encoding the frequency to receive the VDB and a numeric identifier (reference path data selector, RPDS) for the desired approach to use from the database needs to be tuned. As for different precision approach categories different levels of accuracy, integrity, continuity and availability need to be achieved, several performance levels, called GBAS approach service type (GAST), are defined for a GBAS. The requirements to meet a specific GAST are also set forth in [2]. As within this work a guidance for practising purpose and support of pilots is aimed being used under VFR the lowest performance level GAST-A is evaluated to be sufficient. Those requirements can thereby already be met using the satellite based augmentation system (SBAS). SBAS is a commonly available service to enhance a GNSS position solution based on the same core principle as a GBAS and certified for approach operation with decision heights of 200ft. SBAS uses geostationary satellites to distribute necessary information to the user segment and in contrast to GBAS the required approach data needs to be stored locally in the receiver which in turn would require regular database updates. With GLS approaches



using SBAS (GLASS) [3] a SBAS to GBAS converter uses SBAS to collect required position correction and integrity parameters in combination with a locally stored approach database. A GBAS signal is then generated to broadcast the data enabling GBAS equipped aircraft to use LPV final approach segments. As SBAS is a commonly available service, the required correction and integrity parameters can be obtained from one commercial off the shelf (COTS) GNSS receiver which lowers the costs of GLASS in and makes it more flexible for use because no surveyed position is required in contrast to GBAS [4].

6.3. Procedure Design

Essen/Mühlheim (ICAO airport code EDLE) is located just outside the control zone (CTR) of Düsseldorf international airport and below its the terminal maneuvering area (TMA) as depicted in Figure 2. The TMA is categorized as class C airspace and is used to protect the approaching commercial air traffic. The CTR is class D airspace for the same reason. In order to avoid interference between the general aviation and commercial air traffic, all aircraft approaching EDLE have to remain clear of this airspace. The traffic pattern for VFR arrivals is located to the north of the air strip, resulting in a right hand pattern for runway 24 and a standard pattern for runway 06. Class C airspace overhead begins in 1500ft above mean sea level (MSL) and the airport elevation is 423 ft MSL. For the purpose of this experiment, we must design approach procedures, that remain free of all class C airspace of the TMA and class D airspace of the CTR. A straight-in approach to runway 06 is not possible due to the close proximity of the CTR. A straight in approach to runway 24 could be constructed, but is undesirable to a densely populated area just west of the aerodrome. We therefore chose the

approach design to be of the cloud breaking circling type inbound from the north too join the traffic pattern for the respective runway in use. The standard procedure for joining a traffic pattern is with a 45° track offset at pattern height at least 2 nautical miles (NM) before joining the traffic pattern mid point. This is shown in Figure 3 as point TFC00. The remaining corner points of the traffic pattern are coded as TFCxx. For runway 06 in use the corresponding procedure is referenced to as GLS-W and for runway 24 in use GLS-E. One additional procedure for runway 24 referenced to as GLS- C was designed joining the traffic pattern at the beginning of the final approach leg. This procedure finishing at TFC04 hence allows a more direct and shortened approach for runway 24. For all procedures the sections starting from the final approach point (FAP) and finishing with 2nm point out of the traffic pattern were encoded as a FAS datablock. The vertical descent profile is governed by the airspace C step structure (Figure 4). The critical points are the locations, at which the airspace is lowered to the next layer. As aircraft are navigating vertically in reference to barometric pressure above mean sea level (AMSL) and the GLS signal is referenced to the ground (to the WGS84 reference ellipsoid [5]), air density variations will influence the distance of the TMA airspace boundary from the

aircraft descent path. As shown in Figure 4, the step down distances of the airspace are not constant but of varying length. This leads to a maximum allowable descent angle for each segment as indicated in the Figure. Additionally, the approach path can also be shifted laterally to gain more vertical distance between approach path and TMA airspace. Of course, this would also shift the point at which a decision to land must be made away from the airport. Aircraft altimeters are calibrated to the international standard atmosphere (ISA) [6] and as such are sensitive to any temperature and density deviations of the air mass from standard. Since guidance provided by a FAS data block using SBAS is in reference to the earth's geoid ([7], [8], [9]), the vertical distance of the class C airspace border from

the vertical path computed using the FAS DB changes with temperature deviations of the air mass from the international standard atmosphere. This is known by instrument flight procedure designers and the deviation can be calculated using Equation 1 from

[10] Appendix A to Chapter 4.

$$\Delta h_{correction} = \frac{-\Delta T}{L_0} \ln\left(1 + \frac{L_0 \Delta h_{FAP}}{T_0 + L_0 h_{threshold}}\right)$$

where $L_0 = -0.0065$ K is the standard lapse rate, $T_0 = 15^\circ\text{C}$ standard temperature at sea level and ΔT is the temperature deviation from standard. Inserting a low winter temperature of -15°C yields a $h_{correction} = 105.3$ m rounded up and converted to 350 ft. We took this as the minimum vertical distance that the approach path must have at the most critical point at the step down from 3500ft to 2500ft AMSL. At the same time, we want the maximum possible descent angle and minimum distance of the decision point from the runway. This leads to a glide path angle of 2.7° and the decision point at a decision altitude of 1400ft AMSL at 3.06NM before the 1500ft boundary of the TMA. The approaches commence at 4000ft, which is the minimum radar vectoring altitude in the area. To each approach, we added a standard T shape alignment procedure with distinct initial approach fix names as shown in Figure 3.

6.4. Experimental Setup

For verification and validation of the developed approach procedures flight tests are required. As the procedures are aimed to provide an alternative for precision approach practising the flight trials were conducted with TFC K"aufer flight school based at Essen-Mühlheim regional airport. For the flight trials a Piper PA-44-180 Seminole equipped with dual Garmin GNS 430W and Avidyne EXP5000 as PFD and NAV display was used. To receive the GBAS signals and process guidance information, a GPU4000 manufactured by f.u.n.k.e. AVIONICS GmbH was used. This device is a



**Luftfahrtforschungsprogramm VI
(Erster Aufruf 2020-2024)
Projektbeschreibung GLASS**



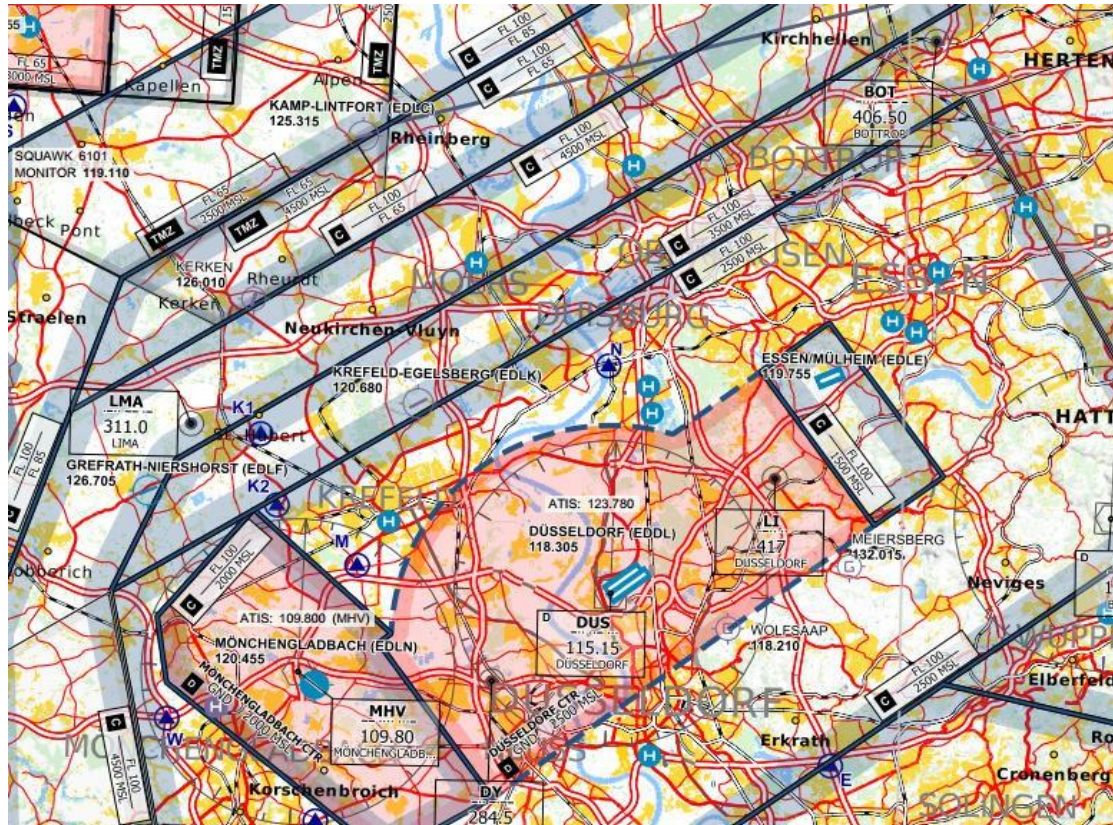


Fig. 2 The airspace structure around Essen Mülheim.(<https://www.openflightmaps.org/>)

prototypic GBAS-Receiver for GA purpose which is currently under development and therefore experimental only. The GPU4000 consists of a GPS, VHF and a data processing module to perform guidance information calculation. To output these information to the pilot the GPU4000 has an interface for an analogue course deviation indicator (CDI) and additionally raw data from the GBAS processing can be received via ethernet for research and debug purposes. Important information for approach selection verification, i.e. GBAS, airport and approach ID, is displayed to the pilot and with its small form factor the GPU4000 is well suited for use in GA aircraft. Because a complete integration of a GPU4000 in the aircraft would require higher modification efforts, a mobile GLS Instrumentation (moGLI) developed DLR in-house was sought to be used for the flight tests. The system architecture of moGLI can be divided into three subsystems as shown in 5. The GBAS subsystem as core of moGLI consists of a GPU4000 with the required RF inputs for GPS and VDB signal as well as a Mid Continent MD200series analogue CDI to output calculated deviations directly to the user. In parallel, the outputted raw data is received from the flight data computation

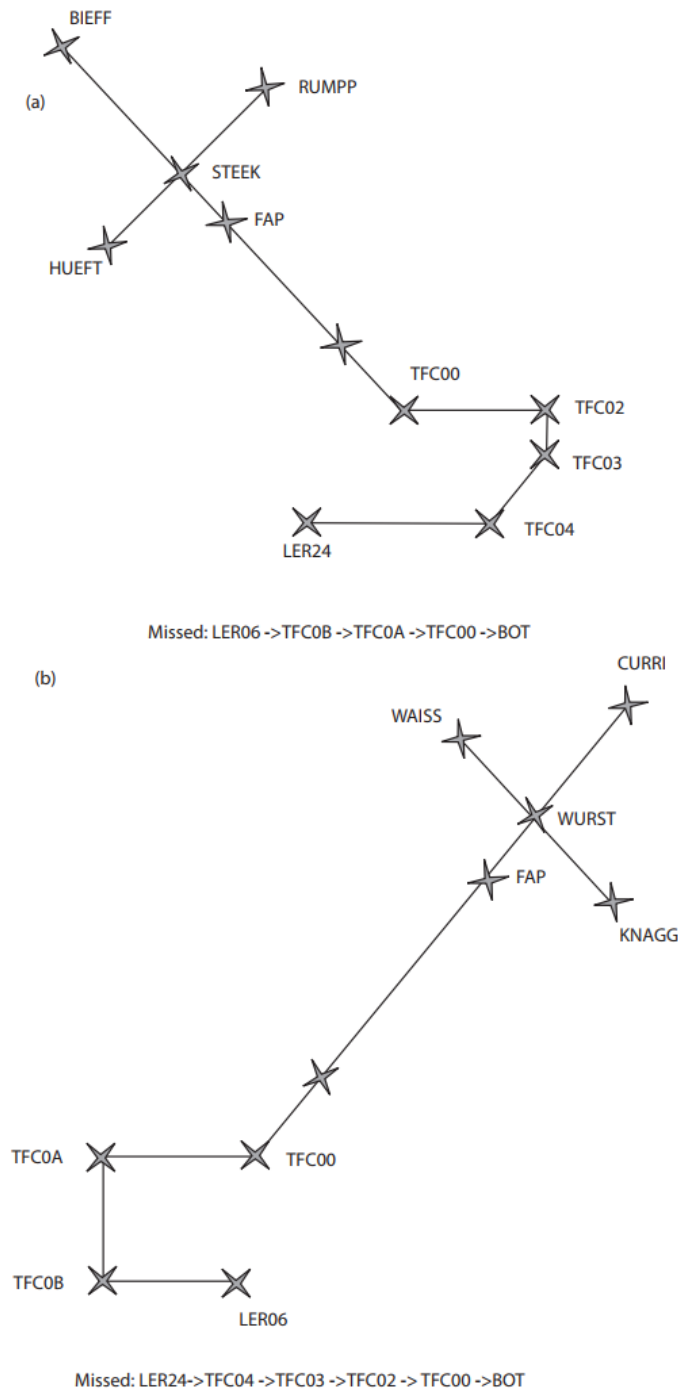


Fig. 3 Lateral profile of the designed approach. (a) runway 24 in use (b) runway 06 in use.

(FDC) subsystem via ethernet and processed along further data from an additional GPS module as well as an inertial, environmental and a heading sensor. The main computer of the FDC subsystem consists of a RaspberryPi 4 that runs the data acquisition and processing software also offering a graphical user interface. For control moGLI is equipped with 7-inch touchscreen display and furthermore, it can be interfaced with external devices via USB and ethernet for maintenance reasons as well as data saving and also real-time monitoring. The power distribution and communication (PDC) subsystem holds a lithium polymer battery

enabling moGLI to be driven without external power supply for about two hours. The usage of moGLI for the aimed flight test provides therefore a method which requires less modification effort as well as it includes already the necessary data recording functions. Still, minor adjustments had to be made on aircraft focusing on the required RF inputs and a guidance display by means of an external CDI for the pilot. To reproduce the input GPS and VHF signal on moGLI side as realistic as with a complete integration of the GPU4000 the aircraft GPS and VHF antennas needed to be interfaced. For this purpose one Garmin G430W also requiring VHF and GPS RF inputs was replaced by an adapter plate passing through both plugs from the back side interface panel which were then extend by an appropriate 50 Ohm RF cable. Hence, the resulting signal loss is supposed to be neglectable. As moGLI is only equipped with an internal CDI and cannot be placed during the flight tests in the pilots field of view an external CDI is required. In order to guarantee compatibility the same type of CDI as integrated in moGLI was used and placed on top of the glare shield abreast the PFD. To interface the CDI the analogue output from the moGLI internal GPU4000 was directly passed through again by using a proper extension cable. On the ground side a GLASS-Station with VHF and GPS antennas are required to perform all necessary calculations and provide the VDB broadcast for the user segment. The main tower building of the airport was used for this purpose. The GLASS-Station was placed in the building with the GPS antenna of the rooftop and the VDB antenna sited on a balcony of the building in the direction to the apron. All antenna siting considerations were made primarily with respect to organizational suitability and not strictly according to requirements set forth in [2].

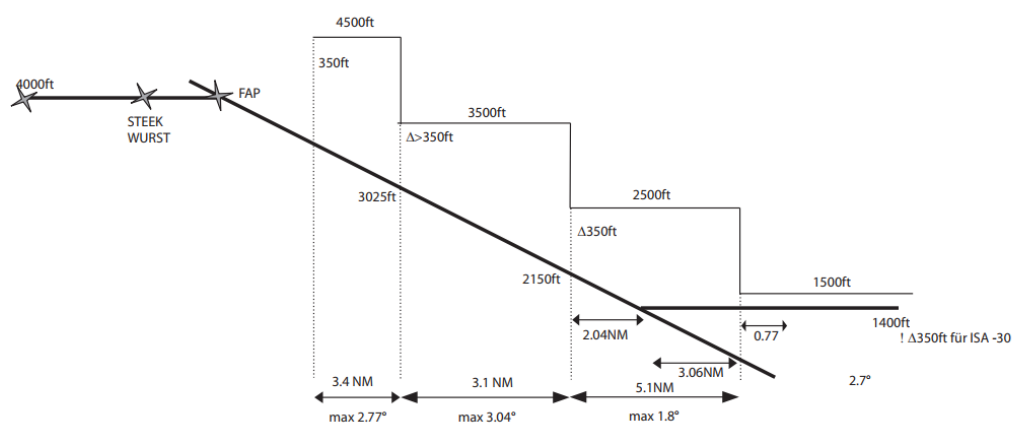


Fig. 4 Vertical profile of the designed approach

GLS-W and -C procedures were flown three times each. Both procedures showed a correct guidance information at first glance. As VDB signal reception at defined FAP was not adequate for continuous guidance information calculation the approaches were shortened stepwise in order to be able to perform all approaches facing worsened weather conditions.

6.6. Results

Post-processing of all collected data aimed to verify and validate the design of the approach procedures regarding the suitability for precision approach training and as appliance to ensure clearance to controlled airspace as well as proper function of the ground sided GLASS-Station and the prototype GPU4000 as potential GBAS-Receiver for GA. First, the proper function and performance of the GLASS-Station was verified being prerequisite for a proper function of the GPU4000 integrated in the aircraft experimental setup. For this purpose the recorded GLASS internally calculated protection levels were used and compared to APV-I (equals GAST-A [11]) requirements set forth in [2] for the periods during which flight trials took place. Figure 6 shows that the protection levels of the GLASS processing were always below the corresponding alert limits ensuring proper performance. Though GLASS processing computes protection levels these are independent from the calculations of the GBAS-Receiver later and have therefore no direct validity for the user segment. All data outputted from the GPU4000 was recorded directly consisting of pseudo-NMEA formatted parameters on GPS, GBAS and guidance processing as well as raw serialized data from the GPS- and VHF-Receiver. Firstly all performed approaches with inconsistent data sets were removed, i.e. where no GPS position could be obtained or which have discontinuities raised from necessary reboots of the GPU4000 in-flight due to the VDB reception outages and to restore a clean configuration. Out of nine approaches performed in total seven have complete data sets and can be used for further processing including two GLS-C and -W and three GLS-E approaches. Further, each approach to be evaluated

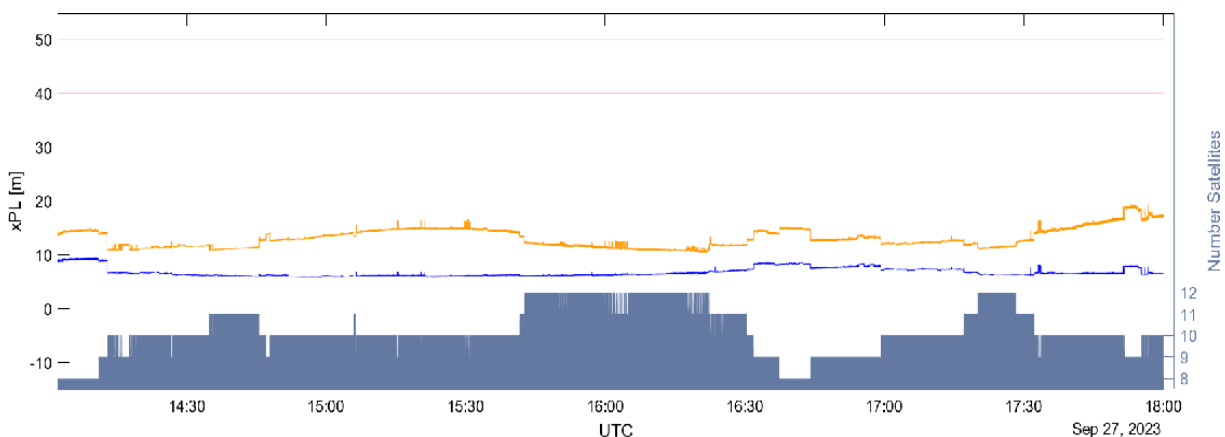


Fig. 6 GLASS Station Performance during flight trials on day one

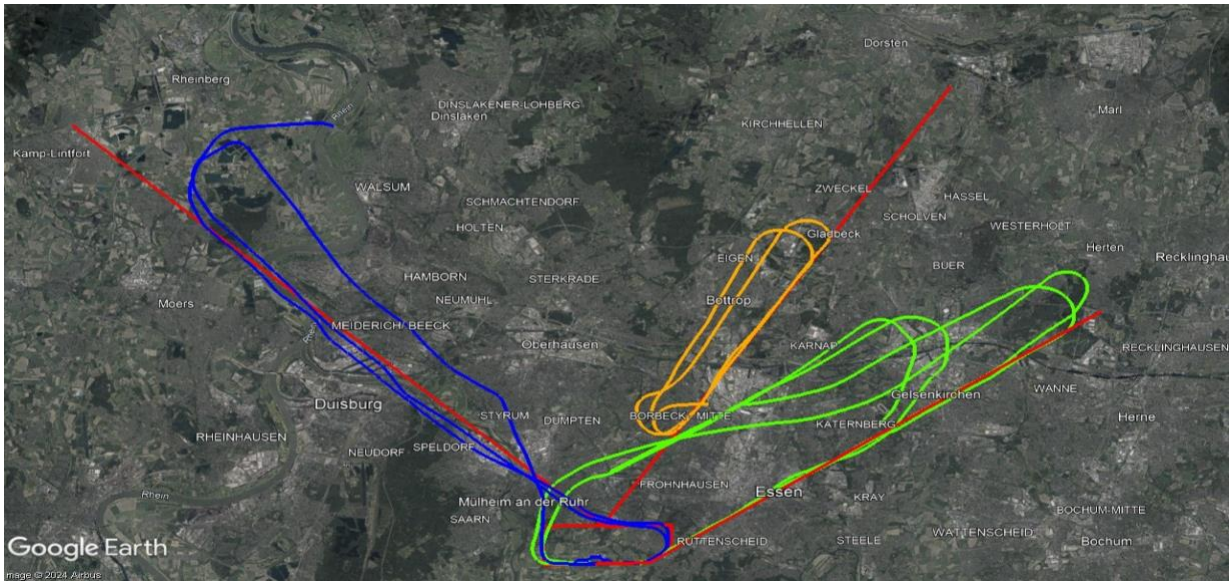


Fig. 7 Conducted Approaches GLS-E (blue), -W (orange) and -C (green) with corresponding reference paths (red)

is cropped starting with the alignment on the inbound course and ending with passing the Approach Reference Point marking the final point of the reference path and hence the merging into the traffic pattern. Figure 7 shows the seven evaluated approaches with the corresponding reference paths as designed in section 3. To evaluate correct encoded FAS datablocks of the designed procedures both, lateral and vertical domain were considered. In lateral domain the calculated GLASS enhanced position solution and the resulting rectilinear guidance information are compared to the approach procedures reference path. A correct encoding of the procedures corresponding FAS datablock can then be assured by guidance information pointing in the proper direction at a plausible scale. In vertical domain the altitude component of the position solution with the corresponding vertical guidance information are compared to the reference altitude. Figure 8 depicts the lateral and figure 9 the vertical evaluation of one GLS-C approach with an observably correct encoded corresponding FAS datablock. Similar results were obtained for GLS-W approaches. With GLS-E showing during the flight trials always full-scale deflection right the lateral domain was further investigated. Figure 10 depicts the lateral evaluation of one flown GLS-E procedure showing a much higher scale of rectilinear deviation which decreases linear when approaching the traffic pattern in contrast to the corrected encoded approaches. With reference to the typical architecture of an approach as outlined in 2 this behaviour results from a wrong flight path alignment point (FPAP) value encoded as the coordinate offset of the FPAP from the LTP. Next to the correct encoding of the FAS datablocks being prerequisite for proper guidance information calculation also the aroused VDB reception difficulties needed to be assessed. Evaluations of all conducted approaches showed continuous guidance information being available starting from approximately 8 to 10nm out of the traffic pattern. With a required service volume of 20nm from

the LTP in the approach direction as set forth in [11] the VHF antenna siting needs to be reassessed with subsequent verification as defined in [12]. In addition to the post-processing of recorded data also the pilot conducting the approach was questioned on the usability of the guidance information obtained from the experimental CDI whereas two main issues turned out. The first considers the positioning of the experimental CDI on top of the glare shield requiring the pilot to change the usual gaze guidance. Second, the experimental CDI suffered from a slightly offset of the displayed guidance information. It was not possible to evaluate whether these were triggered by the CDI itself or the GPU4000 as driver.

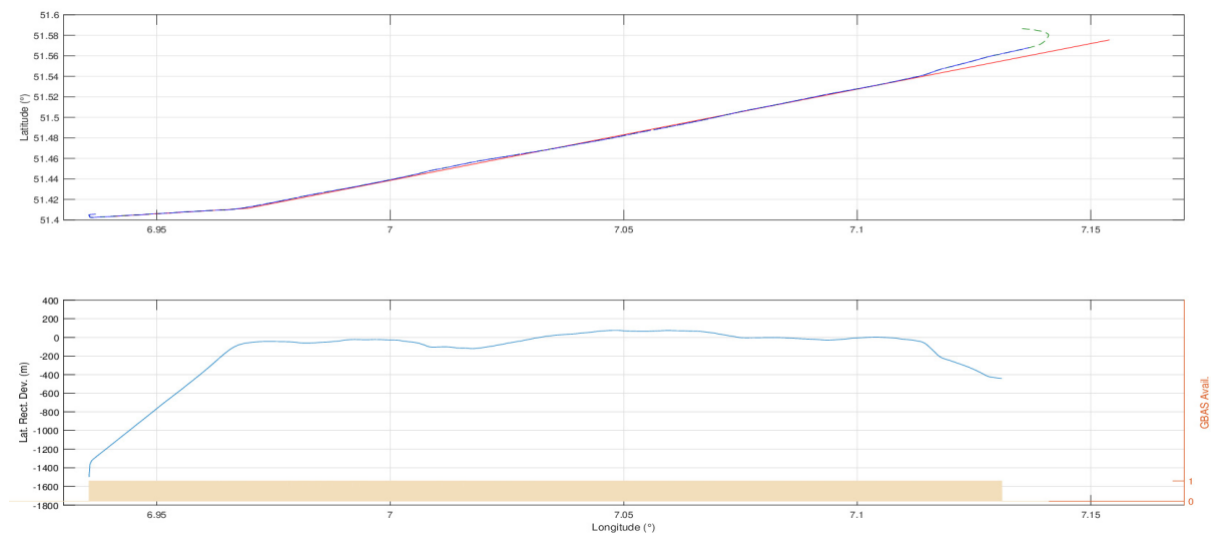


Fig. 8 Evaluation of lateral domain for one GLS-C approach

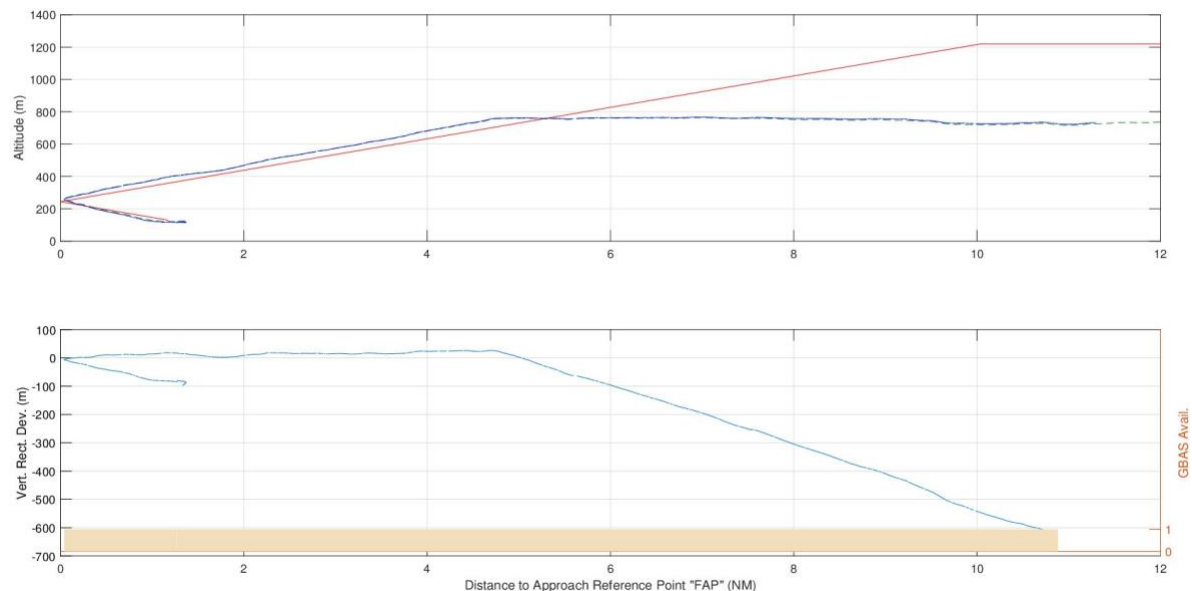


Fig. 9 Evaluation of vertical domain for one GLS-C approach

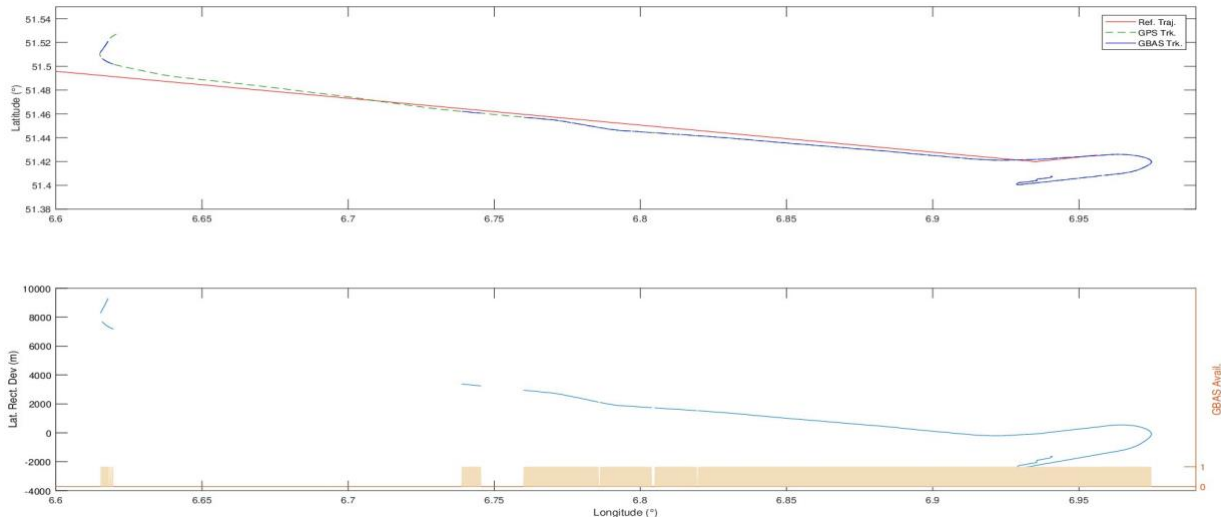


Fig. 10 Evaluation of lateral domain for one wrong encoded GLS-E approach

6.7. Summary and Conclusion

The work within this paper aimed to provide GBAS based approach procedures for general aviation to be used by flight schools for practising precision approach operations at their base airports reducing air traffic flow disturbances on high traffic airports as well as other pilots using it as navigation aid during VFR flight to avoid airspace infringements. For this purpose GLASS, i.e. a cost-effective SBAS to GBAS converter, was used and three approach procedures were designed in-space leading into the traffic pattern of Essen/Mühlheim regional airport. To verify and validate these procedures flight trials were conducted together with the locally based flight school TFC K“aufer using a prototypic GBAS-Receiver manufactured by f.u.n.k.e. Avionics. Evaluation of the trials showed a correct encoding of the procedures as well as the ability of the GBAS-Receiver to handle FAS-in-space-segments calculating proper guidance information. During the flight trials VDB reception outages were encountered and verified in post-processing requiring the VHF antenna siting and transmitter configuration to be reassessed in order to obtain a better availability of guidance information. Furthermore the displaying of guidance information to pilot can be optimized by using digital instruments and a standard avionics bus, e.g. ARINC-429, for communication leading to a overall more integrated solution.

This paper was written within the GLASS project. We would like to thank George Michahelles and Marc Altenscheidt from TFC K“aufer for conducting the flight tests as pilots as well as f.u.n.k.e. AVIONICS GmbH for their support on the GPU4000.

6.8. References

- [1] EUROCONTROL: European Action Plan for Airspace Infringement Risk Reduction (2022)
- [2] ICAO Annex 10 to the Convention on International Civil Aviation - Aeronautical Telecommunication Volume 1 Radio Navigation Aids (2023)
- [3] Dautermann, T., Ludwig, T., Geister, R., Ehmke, L.: Extending access to localizer performance with vertical guidance approaches by means of an sbas to gbas converter. GPS Solutions 24 (2020) <https://doi.org/10.1007/s10291-019-0947-7>
- [4] Dautermann, T., Ludwig, T., Akkogiounoglou, E., Astheimer, T.: Benefits for greek regional airports through innovative approach technology using an lpv to gls converter. IEEE Aerospace and Electronic Systems Magazine (2020)
- [5] Malys, S., Slater, J.: "maintenance and enhancement of the world geodetic system 1984". In: Proceedings of the 7th International Technical Meeting of the Satellite Division of The Institute of Navigation (ION GPS 1994), pp. 17–24 (1994)
- Aeronautics, U.S.N.A.C.: Manual of the ICAO Standard Atmosphere vol. 7488. ICAO, (1954)
- [6] Lemoine, F.G., Kenyon, S.C., Factor, J.K., Trimmer, R.G., Pavlis, N.K., Chinn, D.S., Cox, C.M., Klosko, S.M., Luthcke, S.B., Torrence, M.H., Wang, Y.M., Williamson, R.G., Pavlis, E.C., Rapp, R.H., Olson, T.R.: The Development of the Joint NASA GSFC and NIMA Geopotential Model EGM96. Technical Report NASA/TP-1998-206861, NASA Goddard Space Flight Center, Greenbelt, Maryland, 20771 USA (July 1998)
- [7] Dautermann, T., Ludwig, T., Geister, R., Ehmke, L.: Extending access to localizer performance with vertical guidance approaches by means of an SBAS to GBAS converter. GPS Solutions 37 (2020) <https://doi.org/10.1007/s10291-019-0947-7>
- [8] Dautermann, T.: Civil air navigation using {GNSS} enhanced by wide area satellite based augmentation systems. Progress in Aerospace Sciences 67(0), 51–62 (2014) <https://doi.org/10.1016/j.paerosci.2014.01.003>
- [9] ICAO: Procedures for Air Navigation Services Volume 2, Doc 8168-ops/611 edn. International Civil Aviation Organization, (2014). International Civil Aviation Organization
- [10] RTCA: MINIMUM AVIATION SYSTEM PERFORMANCE STANDARDS FOR THE LOCAL AREA AUGMENTATION SYSTEM (LAAS), Do-245a edn. Radio Technical Commission for Aeronautics, (2004). Radio Technical Commission for Aeronautics
- ICAO: Manual on Testing of Radio Navigation Aids Volume 2, Doc 8071-v edn. International Civil Aviation Organization, (2007). International Civil Aviation Organization

7. Entwicklung und Validierung von Punkt-im-Raum-Anflugverfahren für die allgemeine Luftfahrt auf dem Flugplatz Essen-Mühlheim unter Verwendung des European Geostationary Navigation Overlay Service

Deutsche Übersetzung von Kapitel 6 mit DeepL

7.1. Einführung

Im Rahmen der Pilotenausbildung für das Fliegen unter meteorologischen Instrumentenbedingungen (IMC) spielen Anflugvorbereitungen eine wichtige Rolle. Um die korrekte Nutzung der seitlichen und vertikalen Leitinformationen für einen stabilen und sicheren Anflug zu üben, ist ein Instrumentenlandesystem auf dem jeweiligen Flughafen erforderlich. Flugschulen verwenden häufig Flugzeuge der allgemeinen Luftfahrt, da diese Typen am besten für die Bedürfnisse der Ausbildung geeignet sind. Um die Betriebskosten niedrig zu halten und flexibler im Flugbetrieb zu sein, sind Flugschulen in der Regel auf kleineren Flughäfen angesiedelt, die jedoch oft nicht mit Instrumentenanflugmöglichkeiten ausgestattet sind. Daher muss das Üben von Präzisionsanflügen auf größeren Flughäfen mit höherem Verkehrsaufkommen stattfinden, was zu Störungen führt und die Gesamteffizienz beeinträchtigen kann. Außerdem müssen solche Trainingseinheiten vorher bei der Flugsicherung angemeldet werden. In Deutschland sind nicht nur viele Flugschulen auf kleineren Flughäfen angesiedelt, sondern diese befinden sich auch in der Nähe von Flughäfen mit hohem Verkehrsaufkommen, was zu einer hohen Flughafendichte und einer insgesamt komplexeren Luftraumstruktur führt. Dies kann zu einem höheren Risiko von Luftraumverletzungen führen, von denen nicht nur Schulungsflüge, sondern alle Flüge der allgemeinen Luftfahrt nach Sichtflugregeln (VFR) betroffen sind, da sie im unkontrollierten Luftraum durchgeführt werden. Luftraumverletzungen können zu einer Beeinträchtigung der Sicherheit und der Effizienz des Flugverkehrs in dem betroffenen Gebiet führen, da das erhöhte Risiko eines Zusammenstoßes in der Luft durch das eingedrungene Flugzeug eine Neuorganisation des Flugverkehrsflusses erfordert, was wiederum zu Verspätungen führen kann. Im Rahmen des von Eurocontrol veröffentlichten Europäischen Aktionsplans zur Verringerung des Risikos von Luftraumverletzungen (EPAIRR) wurden Daten über Luftraumverletzungen gesammelt und analysiert, die zeigen, dass die Mehrzahl der Verletzungen Flüge der allgemeinen Luftfahrt nach Sichtflugregeln (VFR) betrifft und sich in Terminal Control Areas (TMA) und Control Zones (CTR) ereignet. Zu den Hauptgründen für Luftraumverletzungen gehören unsachgemäße Navigation und Flugplanung sowie unerwartete meteorologische Situationen und Ablenkung im Cockpit [1]. Was den Aspekt der Navigation betrifft, so ist die Nutzung weltraumgestützter Navigation in der allgemeinen



Luftfahrt heute Stand der Technik, wobei das Global Positioning System (GPS), das derzeit in der Luftfahrt am häufigsten verwendet wird, bei VFR-Flügen immer noch eine unterstützende Technologie darstellt und nicht zwingend erforderlich ist. Für einen effizienten Einsatz von GPS und damit als Instrument zur Vermeidung von Luftraumverletzungen ist eine regelmäßige Aktualisierung der Navigationsdatenbank erforderlich. In diesem Beitrag wird die Verwendung eines kostengünstigen bodengestützten Erweiterungssystems (GBAS) vorgeschlagen, um von der Navigationsdatenbank unabhängige RNP-Anflugverfahren bereitzustellen. Auf diese Weise können Flugschulen Präzisionsanflüge auf ihrem Basisflughafen im unkontrollierten Luftraum üben und so den Luftverkehrsfluss auf stark frequentierten Flughäfen entzerren. Außerdem können die definierten Verfahren für allgemeine Zwecke genutzt werden, um Orientierungsinformationen zu erhalten, die das Risiko von Luftraumverletzungen beim Fliegen in der Nähe komplexer Lufträume verringern. Im Rahmen dieser Arbeit wurden zu diesem Zweck drei Ansätze auf dem Regionalflughafen Essen/Mühlheim entwickelt und anschließend durch Flugversuche validiert. Die folgenden Kapitel geben zunächst einen kurzen Systemüberblick über den erwähnten kostengünstigen GBAS-Konverter sowie die Merkmale eines GBAS-Anflugs und die später verwendete Methodik zur Validierung dieser. Anschließend werden die Eignung des Regionalflughafens Essen/Mühlheim für diese Arbeit und die Entwicklung der Ansätze dargelegt. Die für die Flugversuche verwendete Versuchsausrüstung und der Versuchsaufbau werden in Kapitel 4 beschrieben. Kapitel 5 konzentriert sich auf die Durchführung der Flugversuche, deren Ergebnisse in Kapitel 6 vorgestellt und analysiert werden. Abschließend wird die Arbeit zusammengefasst und mit Hinweisen für die weitere Forschung diskutiert.

7.2. Hintergrund

Bodengestützte Ergänzungssysteme (GBAS) bieten eine präzise Anflugführung und sind ein möglicher Nachfolger des Instrumentenlandesystems (ILS). Ein GBAS basiert auf dem Prinzip des differentiellen GNSS und ergänzt ein GNSS zur Überwachung sowie zur Verbesserung der Genauigkeit, Integrität, Kontinuität und Verfügbarkeit. Auf diese Weise kann die erforderliche Leistung für Präzisionsanflüge sichergestellt werden. Es besteht aus einem Weltraum-, einem Boden- und einem Nutzersegment. Das Weltraumsegment deckt die Navigationssignale des GNSS ab, um

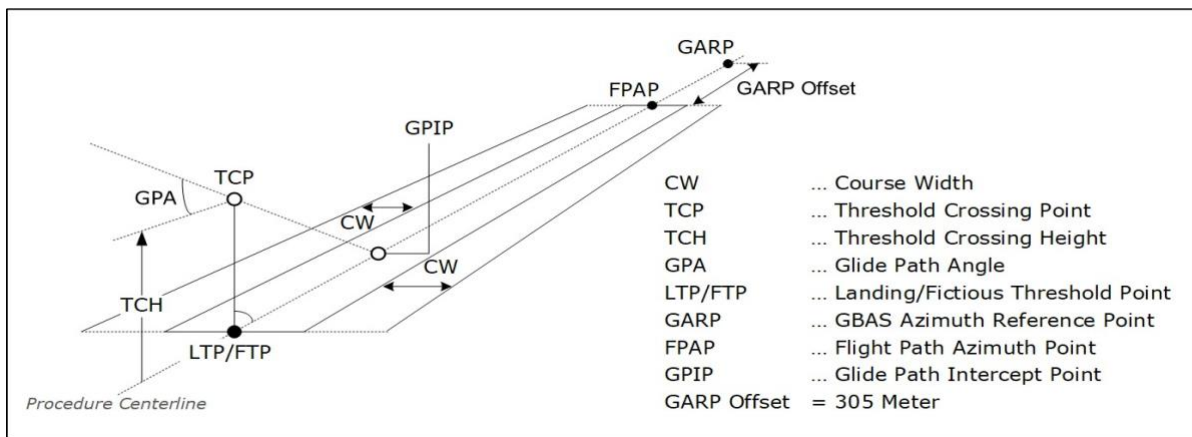


Abb. 1 Geometrie des GBAS-Endanflugsegments

erweitert werden. Wie bereits erwähnt, ist das GPS in der Luftfahrt weit verbreitet und dementsprechend werden sich weitere Erläuterungen auf dieses GNSS beziehen. Das GBAS-Bodensegment besteht aus zwei bis vier GPS-Referenzempfängern sowie einer Bodenverarbeitungsstation und einem VHF-Sender. Die GPS-Referenzempfänger werden in unmittelbarer Nähe zueinander auf dem Flughafengelände an vermessenen Positionen aufgestellt. Alle berechneten Positionslösungen werden dann verarbeitet und miteinander und mit der vermessenen Position verglichen. Auf diese Weise können differentielle Korrekturen für jeden GPS-Satelliten in Sichtweite berechnet werden. Darüber hinaus wird auch der allgemeine GPS-Zustand und Systemstatus überwacht und verschiedene Integritätsparameter berechnet. Schließlich liefert die Bodenverarbeitungsstation eine Anflugdatenbank, die als Referenzpfad für die spätere Berechnung von Führungsinformationen durch das Nutzersegment benötigt wird. Ein GBAS kann bis zu 49 individuelle Anflüge liefern, wobei jeder Anflug wie in Abbildung 1 dargestellt aufgebaut ist. Um dem Nutzersegment alle notwendigen Informationen, einschließlich differentieller Korrekturen, Integritätsparameter, zusätzlicher GBAS-Stationseigenschaften und der Anflugdatenbank zur Verfügung zu stellen, wird ein VHF-Datenrundfunk (VDB) verwendet. Die VDB wird auf einer Frequenz im Bereich zwischen 108,00 MHz und 117,950 MHz ausgestrahlt und ihre Reichweite ist auf einen Radius von etwa 23 Seemeilen vom Sender begrenzt. Diese Begrenzung besteht, weil die Genauigkeit der differentiellen Korrekturen mit zunehmender Entfernung des Nutzers zum Bodensegment



abnimmt. Das GBAS-Benutzersegment umfasst alle erforderlichen Bordgeräte, um eine Positionslösung mit Hilfe von GPS zu bestimmen, die empfangenen VDB zu verarbeiten und Führungsinformationen zu berechnen, die an das Anzeige- und Flugsteuerungssystem weitergeleitet werden. In der kommerziellen Luftfahrt kombiniert der Multi-Mode-Receiver (MMR) dabei unter anderem GNSS-, GBAS- und ILS-Funktionen. Zur Berechnung der Führungsinformationen werden zunächst die GBAS-Korrekturparameter auf die intern ermittelte GPS-Positionslösung angewendet. Die Integritätsparameter werden dann verwendet, um laterale und vertikale Fehlergrenzen für die erweiterte Positionslösung zu berechnen, die auch als Schutzstufen bezeichnet werden. Mit den bereitgestellten Annäherungsparametern kann ein Referenzpfad ermittelt werden, mit dem die verbesserte Positionslösung verglichen wird, was zu lateralen und vertikalen Führungsinformationen führt. Um ihre Gültigkeit zu gewährleisten, werden die Schutzniveaus kontinuierlich mit der maximal zulässigen Positionsunsicherheit verglichen, die ebenfalls mit den Anflugdaten übertragen wird. Durch die gleiche Art der Darstellung der Führungsinformationen für den Piloten wie bei einem ILS ist GBAS in hohem Maße kompatibel mit den vorhandenen Instrumenten und den Betriebsverfahren im Cockpit, so dass es sich auch für das Training von Präzisionsanflügen eignet. Ein wesentlicher Unterschied besteht in der Auswahl eines Anfluges, da für GBAS eine fünfstellige Kanalnummer, die die Frequenz für den Empfang der VDB kodiert, und eine numerische Kennung (Reference Path Data Selector, RPDS) für den gewünschten Anflug aus der Datenbank eingestellt werden müssen. Da für verschiedene Kategorien von Präzisionsanflügen unterschiedliche Genauigkeits-, Integritäts-, Kontinuitäts- und Verfügbarkeitsniveaus erreicht werden müssen, sind für ein GBAS mehrere Leistungsniveaus definiert, die als GBAS Approach Service Type (GAST) bezeichnet werden. Die Anforderungen zur Erfüllung eines bestimmten GAST werden auch in [2] dargelegt. Da im Rahmen dieser Arbeit ein Leitfaden für Übungszwecke und zur Unterstützung von Piloten unter VFR verwendet werden soll, wird die niedrigste Leistungsstufe GAST-A als ausreichend bewertet. Diese Anforderungen können also bereits mit dem satellitengestützten Augmentierungssystem (SBAS) erfüllt werden. SBAS ist ein allgemein verfügbarer Dienst zur Verbesserung einer GNSS-Positionslösung, der auf demselben Grundprinzip wie GBAS basiert und für den Anflugbetrieb mit Entscheidungshöhen von 200 Fuß zertifiziert ist. SBAS nutzt geostationäre Satelliten, um die erforderlichen Informationen an das Nutzersegment zu verteilen. Im Gegensatz zu GBAS müssen die erforderlichen Anflugdaten lokal im Empfänger gespeichert werden, was wiederum regelmäßige Datenbank-Updates erfordern würde. Bei GLS-Ansätzen mit SBAS (GLASS) [3] verwendet ein SBAS-GBAS-Konverter SBAS, um die erforderlichen Positionskorrektur- und Integritätsparameter in Kombination mit einer lokal gespeicherten Anflugdatenbank zu sammeln. Anschließend wird ein GBAS-Signal erzeugt, um die Daten zu übertragen, so dass mit GBAS ausgestattete Flugzeuge LPV-

Endanflugsegmente verwenden können. Da SBAS ein allgemein verfügbarer Dienst ist, können die erforderlichen Korrektur- und Integritätsparameter von einem handelsüblichen GNSS-Empfänger (COTS) bezogen werden, was die Kosten von GLASS senkt und es flexibler einsetzbar macht, da im Gegensatz zu GBAS keine vermessene Position erforderlich ist [4].

7.3. Verfahren Design

Essen/Mühlheim (ICAO-Flughafencode EDLE) befindet sich direkt außerhalb der Kontrollzone (CTR) des internationalen Flughafens Düsseldorf und unterhalb der Terminal Maneuvering Area (TMA), wie in Abbildung 2 dargestellt. Der TMA ist als Luftraum der Klasse C eingestuft und dient dem Schutz des anfliegenden kommerziellen Flugverkehrs. Die CTR ist aus dem gleichen Grund ein Luftraum der Klasse D. Um Interferenzen zwischen der allgemeinen Luftfahrt und dem kommerziellen Flugverkehr zu vermeiden, müssen alle Flugzeuge, die sich der EDLE nähern, diesen Luftraum meiden. Das Verkehrsmuster für VFR-Anflüge befindet sich nördlich der Landebahn, so dass sich eine Rechtskurve für die Piste 24 und eine Standardkurve für die Piste 06 ergibt. Der Luftraum der Klasse C beginnt in einer Höhe von 1500 Fuß über dem mittleren Meeresspiegel (MSL) und der Flughafen liegt auf einer Höhe von 423 Fuß MSL. Für dieses Experiment müssen wir Anflugverfahren entwerfen, die den gesamten Luftraum der Klasse C der TMA und den Luftraum der Klasse D der CTR aussparen. Ein gerader Anflug auf die Piste 06 ist aufgrund der Nähe der CTR nicht möglich. Ein gerader Anflug auf die Landebahn 24 wäre möglich, ist aber wegen des dicht besiedelten Gebiets westlich des Flugplatzes unerwünscht. Wir haben uns daher für die

Anflugdesign mit wolkenfreiem Kreisen von Norden kommend, um sich dem Verkehrsmuster für die jeweilige Landebahn anzuschließen. Die Standardprozedur für den Anschluss an ein Verkehrsmuster ist ein 450-Spurversatz auf Musterhöhe mindestens 2 nautische Meilen (NM) vor dem Anschluss an den Mittelpunkt des Verkehrsmusters. Dies ist in Abbildung 3 als Punkt TFC00 dargestellt. Die übrigen Eckpunkte des Verkehrsmusters sind als TFCxx codiert. Für die in Betrieb befindliche Landebahn 06 wird das entsprechende Verfahren als GLS-W bezeichnet und für die in Betrieb befindliche Landebahn 24 als GLS-E. Für die Landebahn 24 wurde ein zusätzliches Verfahren mit der Bezeichnung GLS-C entwickelt, das zu Beginn des Endanfluges in das Verkehrsmuster einfließt. Dieses Verfahren endet bei TFC04 und ermöglicht somit einen direkteren und kürzeren Anflug auf die Piste 24. Für alle Verfahren wurden die Abschnitte, die mit dem Endanflugpunkt (FAP) beginnen und mit einem 2nm-Punkt außerhalb des Verkehrsmusters enden, als FAS-Datenblock codiert. Das vertikale Sinkflugprofil wird durch die C-Stufenstruktur des Luftraums bestimmt (Abbildung 4). Die kritischen Punkte sind die Stellen, an denen der Luftraum auf die nächste Ebene abgesenkt wird. Da die Flugzeuge vertikal in Bezug auf den Luftdruck über dem mittleren Meeresspiegel (AMSL) navigieren und das GLS-Signal auf den Boden bezogen ist (auf das WGS84-

Referenzellipsoid [5]), beeinflussen Schwankungen der Luftdichte den Abstand der TMA-Luftraumgrenze vom Sinkflugpfad des Flugzeugs. Wie in Abbildung 4 gezeigt, sind die Abstiegsabstände des Luftraums nicht konstant, sondern von unterschiedlicher Länge. Dies führt zu einem maximal zulässigen Sinkflugwinkel für jedes Segment, wie in der Abbildung dargestellt. Zusätzlich kann der Anflugpfad auch seitlich verschoben werden, um mehr vertikalen Abstand zwischen Anflugpfad und TMA-Luftraum zu gewinnen. Dadurch würde sich natürlich auch der Punkt, an dem die Entscheidung zur Landung getroffen werden muss, vom Flughafen weg verschieben. Flugzeughöhenmesser sind auf die internationale Standardatmosphäre (ISA) [6] kalibriert und reagieren daher empfindlich auf Temperatur- und Dichteabweichungen der Luftmasse vom Standard. Da sich die von einem FAS-Datenblock unter Verwendung von SBAS gelieferte Orientierung auf das Geoid der Erde bezieht ([7], [8], [9]), ist der vertikale Abstand der Luftraumgrenze der Klasse C von

der mit dem FAS DB berechnete vertikale Pfad ändert sich mit den Temperaturabweichungen der Luftmasse von der internationalen Standardatmosphäre. Dies ist den Konstrukteuren von Instrumentenflugverfahren bekannt, und die Abweichung kann mit Gleichung 1 berechnet werden aus

[10] Anhang A zu Kapitel 4.

$$\Delta h_{correction} = \frac{-\Delta T}{L_0} \ln\left(1 + \frac{L_0 \Delta h_{FAP}}{T_0 + L_0 h_{threshold}}\right)$$

wobei $L_0 = -0,0065$ K die Standard-Lapse-Rate ist, $T_0 = 15$ °C Standardtemperatur auf Meereshöhe und ΔT die Temperaturabweichung vom Standard ist. Wenn Sie eine niedrige Wintertemperatur von -15 °C einsetzen, ergibt sich eine $h_{correction} = 105,3$ m, aufgerundet und umgerechnet auf 350 ft. Wir haben dies als den minimalen vertikalen Abstand genommen, den der Anflugpfad am kritischsten Punkt beim Abstieg von 3500ft auf 2500ft AMSL haben muss. Gleichzeitig wollen wir den maximal möglichen Sinkflugwinkel und den minimalen Abstand des Entscheidungspunktes von der Landebahn. Dies führt zu einem Gleitpfadwinkel von $2,7^\circ$ und dem Entscheidungspunkt auf einer Entscheidungshöhe von 1400ft AMSL bei 3,06NM vor der 1500ft-Grenze der TMA. Die Anflüge beginnen in 4000ft, der minimalen Radar-Vectoring-Höhe in diesem Gebiet. Zu jedem Anflug haben wir ein standardmäßiges T-förmiges Ausrichtungsverfahren mit eindeutigen anfänglichen Anflugfixnamen hinzugefügt, wie in Abbildung 3 dargestellt.



7.4. Experimenteller Aufbau

Zur Verifizierung und Validierung der entwickelten Anflugverfahren sind Flugversuche erforderlich. Da die Verfahren darauf abzielen, eine Alternative zum Üben von Präzisionsanflügen zu bieten, wurden die Flugversuche mit der Flugschule TFC Käufer mit Sitz am Regionalflughafen Essen-Mühlheim durchgeführt. Für die Flugversuche wurde eine Piper PA-44-180 Seminole verwendet, die mit zwei Garmin GNS 430W und Avidyne EXP5000 als PFD und NAV-Display ausgestattet war. Für den Empfang der GBAS-Signale und die Verarbeitung der Führungsinformationen wurde ein GPU4000 der Firma f.u.n.k.e. AVIONICS GmbH verwendet. Dieses Gerät ist ein

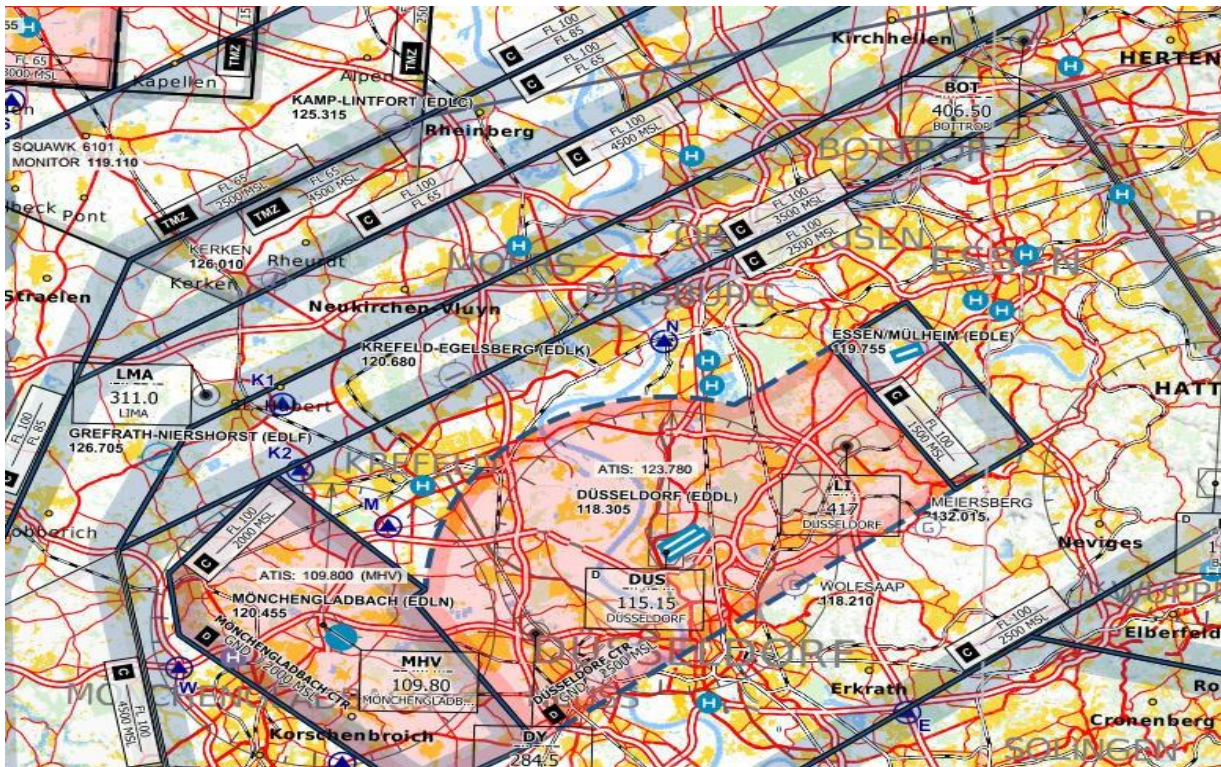


Abb. 2 Die Luftraumstruktur um Essen Mühlheim. (<https://www.openfligh-tmaps.org/>)

Prototyp eines GBAS-Empfängers für GA-Zwecke, der sich derzeit in der Entwicklung befindet und daher nur experimentell ist. Das GPU4000 besteht aus einem GPS, VHF und einem Datenverarbeitungsmodul zur Berechnung von Führungsinformationen. Um diese Informationen an den Piloten auszugeben, verfügt der GPU4000 über eine Schnittstelle für eine analoge Kursabweichungsanzeige (CDI). Zusätzlich können Rohdaten aus der GBAS-Verarbeitung zu Forschungs- und Debug-Zwecken über das Internet empfangen werden. Wichtige Informationen für die Überprüfung der Anflugwahl, d.h. GBAS, Flughafen und Anflug-ID, werden dem Piloten angezeigt und mit seinem kleinen Formfaktor ist die GPU4000 gut für den Einsatz in GA-Flugzeugen geeignet. Da eine vollständige Integration eines GPU4000 in das Flugzeug einen höheren Modifikationsaufwand erfordern würde, wurde für die Flugtests ein vom DLR selbst entwickeltes mobiles GLS-Instrument (moGLI) eingesetzt. Die Systemarchitektur von moGLI kann in drei Subsysteme unterteilt werden, wie in 5 dargestellt. Das GBAS-Subsystem als Kernstück von moGLI besteht aus einer GPU4000 mit den erforderlichen HF-Eingängen für GPS- und VDB-Signal sowie einem analogen CDI der Mid Continent MD200-Serie zur Ausgabe der berechneten Abweichungen direkt an den Benutzer. Parallel dazu werden die ausgegebenen Rohdaten von der Flugdatenberechnung empfangen.

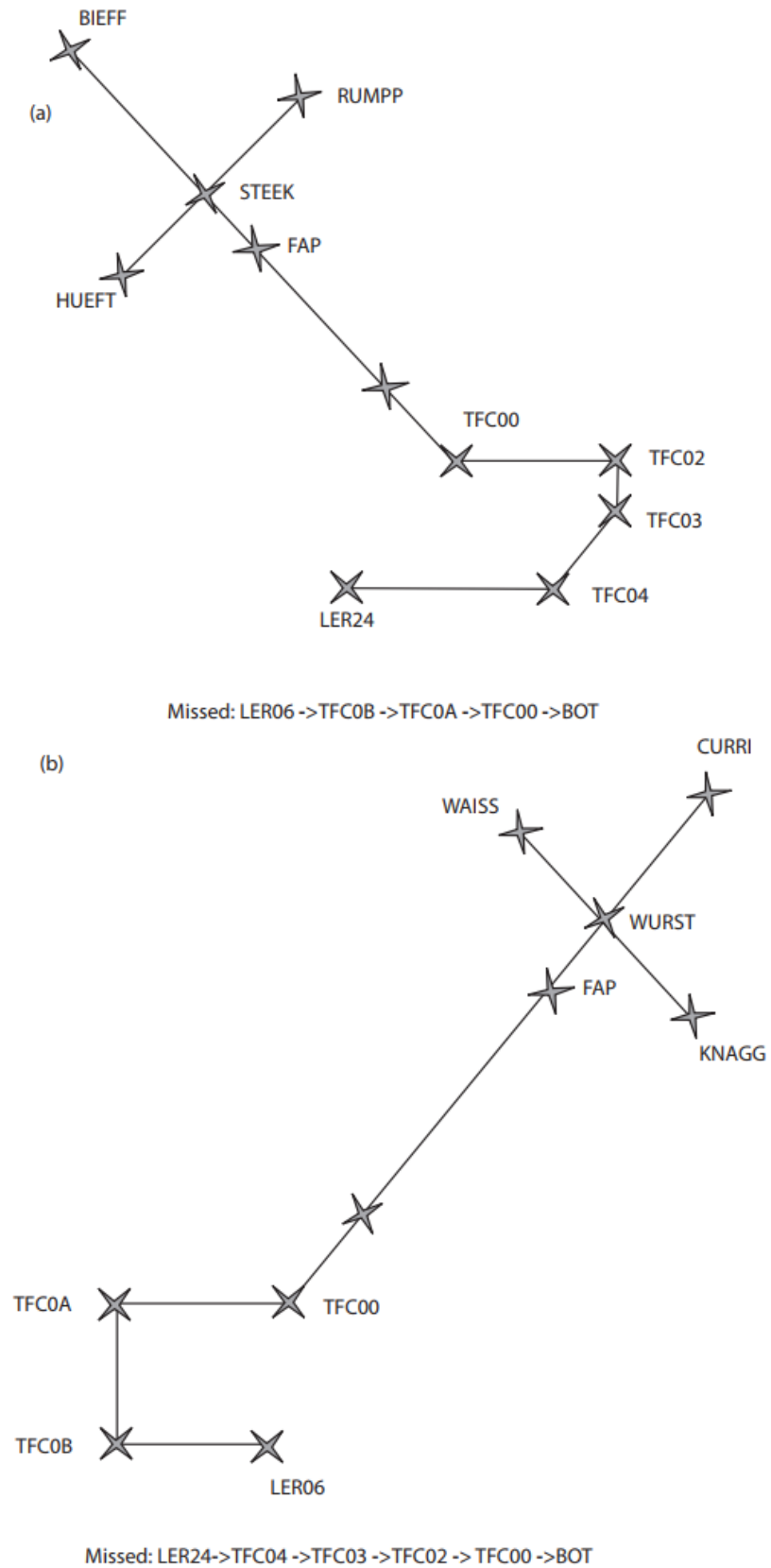


Abb. 3 Seitliches Profil des geplanten Anflugs. (a) Landebahn 24 im Einsatz (b) Landebahn 06 im Einsatz.



(FDC) über Ethernet und verarbeitete weitere Daten von einem zusätzlichen GPS-Modul sowie einem Trägheits-, Umwelt- und einem Kurs-Sensor. Der Hauptcomputer des FDC-Subsystems besteht aus einem RaspberryPi 4, auf dem die Datenerfassungs- und Verarbeitungssoftware läuft, die auch eine grafische Benutzeroberfläche bietet. Für die Steuerung ist moGLI mit einem 7-Zoll-Touchscreen-Display ausgestattet und kann darüber hinaus zu Wartungszwecken sowie zur Datenspeicherung und Echtzeitüberwachung mit externen Geräten über USB und Ethernet verbunden werden. Das Subsystem für Stromverteilung und Kommunikation (PDC) enthält einen Lithium-Polymer-Akku, mit dem moGLI etwa zwei Stunden lang ohne externe Stromversorgung betrieben werden kann. Die Verwendung von moGLI für den angestrebten Flugtest bietet daher eine Methode, die weniger Modifikationsaufwand erfordert und bereits die notwendigen Datenaufzeichnungsfunktionen enthält. Dennoch mussten kleinere Anpassungen am Flugzeug vorgenommen werden, die sich auf die erforderlichen HF-Eingänge und eine Führungsanzeige mittels eines externen CDI für den Piloten konzentrierten. Um das GPS- und VHF-Signal auf der moGLI-Seite so realistisch wie bei einer vollständigen Integration des GPU4000 wiederzugeben, mussten die GPS- und VHF-Antennen des Flugzeugs miteinander verbunden werden. Zu diesem Zweck wurde ein Garmin G430W, das ebenfalls UKW- und GPS-HF-Eingänge benötigt, durch eine Adapterplatte ersetzt, die durch die beiden Stecker der rückseitigen Schnittstellenplatte geführt wurde, die dann durch ein geeignetes 50-Ohm-HF-Kabel verlängert wurden. Der daraus resultierende Signalverlust sollte daher vernachlässigbar sein. Da moGLI nur mit einem internen CDI ausgestattet ist und während der Flugtests nicht im Sichtfeld des Piloten platziert werden kann, ist ein externes CDI erforderlich. Um die Kompatibilität zu gewährleisten, wurde der gleiche CDI-Typ wie im moGLI verwendet und oben auf dem Blendschutz neben dem PFD angebracht. Um die CDI anzuschließen, wurde der Analogieausgang der moGLI-internen GPU4000 mit einem entsprechenden Verlängerungskabel direkt wieder durchgeschleust. Auf der Bodenseite wird eine GLASS-Station mit VHF- und GPS-Antennen benötigt, um alle notwendigen Berechnungen durchzuführen und die VDB-Übertragung für das Nutzersegment bereitzustellen. Das Hauptturmgebäude des Flughafens wurde für diesen Zweck genutzt. Die GLASS-Station wurde in dem Gebäude platziert, wobei die GPS-Antenne auf dem Dach und die VDB-Antenne auf einem Balkon des Gebäudes in Richtung Vorfeld angebracht wurde. Alle Überlegungen zur Platzierung der Antennen wurden in erster Linie unter dem Gesichtspunkt der organisatorischen Eignung angestellt und nicht streng nach den in [2] festgelegten Anforderungen.

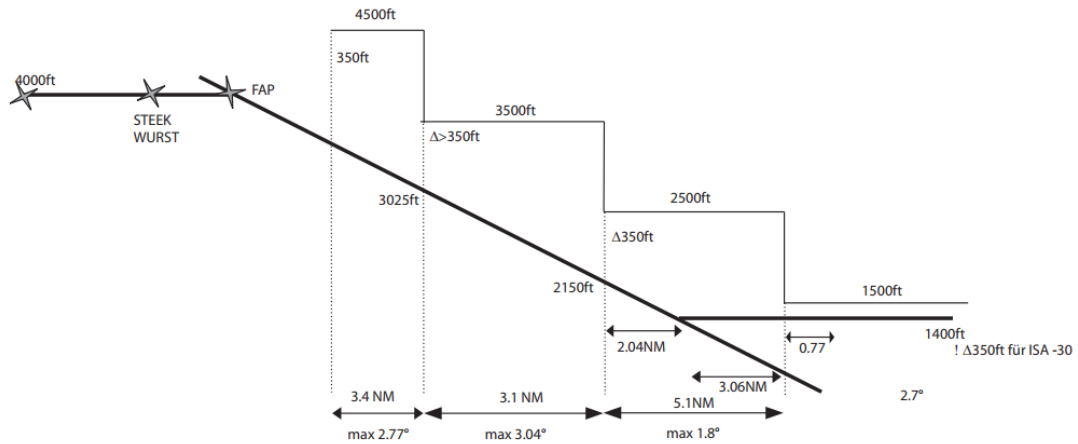


Abb. 4 Vertikales Profil des entworfenen Ansatzes

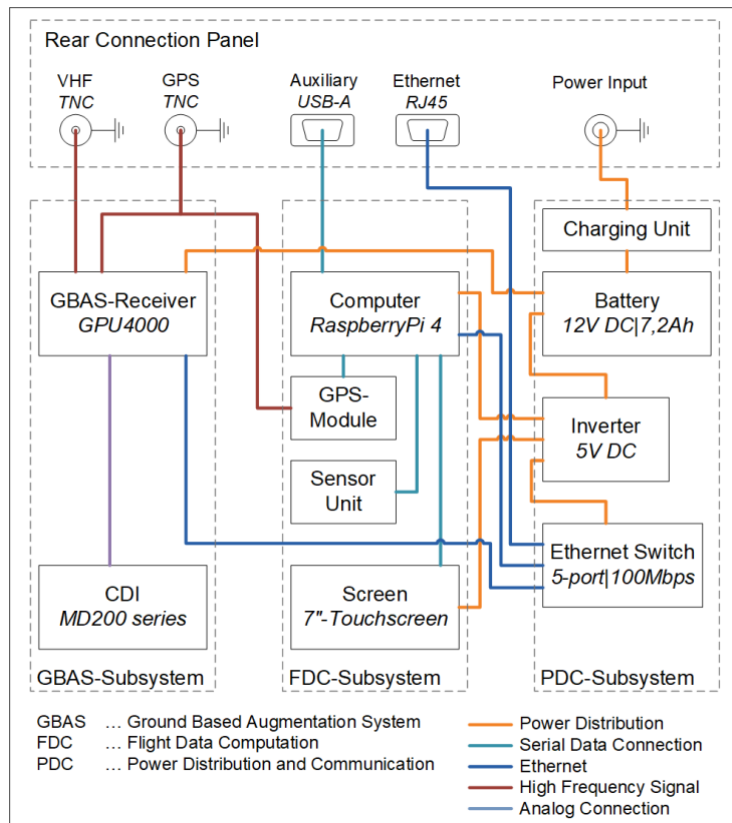


Abb. 5 moGLI-Systemarchitektur



7.5. Durchführung von Flugversuchen

Die Flugerprobung fand vom 27. bis 28. September 2023 statt. Ziel war es, jede Prozedur mindestens dreimal durchzuführen, damit sich der Pilot an den Flug gewöhnen kann.

zur Einrichtung im Flugzeug und zur Sammlung von genügend Daten für eine ausreichende Nachbearbeitung. Als Backup wurden alle drei Verfahren lokal im GPS-Empfänger des Flugzeugs gespeichert und als Unterlage für die experimentelle Steuerung verwendet, um dem Piloten die Möglichkeit zu geben, mögliche Ausfälle der experimentellen Steuerung zu umgehen. Alle Flüge wurden in VMC unter VFR durchgeführt. Die Prozedur GLS-E wurde zuerst geflogen, wobei bereits auf dem Weg zum FAP eine schlechte UKW-Signalqualität festgestellt wurde. Aufgrund einer falschen Konfiguration des GPU4000 musste der erste Anflug abgebrochen werden, während der zweite Anflug unzuverlässige Führungsinformationen mit großen Unterbrechungen lieferte. Darüber hinaus waren nur die vertikalen Führungsinformationen plausibel, während die seitliche Komponente in vollem Umfang nach rechts ausschlug. Für den zweiten Flug wurde eine Ersatz-VHF-Antenne auf dem Blendschutz angebracht, um die Probleme mit dem VDB-Empfang zu kompensieren, und das GLS-C-Verfahren wurde geflogen. Nach der Ausrichtung auf den Anflugkurs wurde der Gleitpfad von unten abgefangen und während des weiteren Anflugverfahrens kontinuierlich und korrekt gesteuert. Um den VDB-Empfangsstörungen entgegenzuwirken, wurde die Bodenantenne am zweiten Tag auf einem Dach hinter dem Turmgebäude neu positioniert, was jedoch bei den weiteren Flügen nur geringe Verbesserungen zeigte. Die GLS-E Prozedur wurde jedoch erneut geflogen, um die falschen seitlichen Führungsinformationen zu überprüfen und die nachfolgenden GLS-W und

C-Prozeduren wurden jeweils dreimal geflogen. Beide Verfahren zeigten auf den ersten Blick eine korrekte Leitinformation an. Da der VDB-Signalempfang an der definierten FAP nicht für eine kontinuierliche Leitinformationsberechnung ausreichte, wurden die Anflüge schrittweise verkürzt, um alle Anflüge bei verschlechterten Wetterbedingungen durchführen zu können.

7.6. Ergebnisse

Die Nachbearbeitung aller gesammelten Daten zielte darauf ab, die Gestaltung der Anflugverfahren im Hinblick auf ihre Eignung für das Präzisionsanflugtraining und als Gerät zur Sicherstellung der Freigabe des kontrollierten Luftraums sowie die ordnungsgemäße Funktion der bodenseitigen GLASS-Station und des Prototyps GPU4000 als potenzieller GBAS-Empfänger für die Luftfahrt zu verifizieren und zu validieren. Zunächst wurde die ordnungsgemäße Funktion und Leistung der GLASS-Station überprüft, die Voraussetzung für die ordnungsgemäße Funktion der in den Versuchsaufbau des Flugzeugs integrierten

GPU4000 ist. Zu diesem Zweck wurden die aufgezeichneten, von GLASS intern berechneten Schutzniveaus verwendet und mit den in [2] festgelegten Anforderungen der APV-I (entspricht GAST-A [11]) für die Zeiträume verglichen, in denen die Flugversuche stattfanden. Abbildung 6 zeigt, dass die Schutzniveaus der GLASS-Verarbeitung immer unter den entsprechenden Alarmgrenzen lagen, was eine ordnungsgemäße Leistung gewährleistet. Obwohl die GLASS-Verarbeitung Schutzstufen berechnet, sind diese unabhängig von den späteren Berechnungen des GBAS-Empfängers und haben daher keine direkte Gültigkeit für das Nutzersegment. Alle von der GPU4000 ausgegebenen Daten wurden direkt aufgezeichnet, bestehend aus pseudo-NMEA-formatierten Parametern zu GPS, GBAS und Guidance Processing sowie aus seriellen Rohdaten vom GPS- und VHF-Empfänger. Zunächst wurden alle durchgeführten Anflüge mit inkonsistenten Datensätzen entfernt, d.h. solche, bei denen keine GPS-Position ermittelt werden konnte oder die Unstetigkeiten aufweisen, die durch notwendige Neustarts der GPU4000 während des Fluges aufgrund von VDB-Empfangsausfällen entstanden sind, um eine saubere Konfiguration wiederherzustellen. Von den insgesamt neun durchgeführten Ansätzen haben sieben vollständige Datensätze und können für die weitere Verarbeitung verwendet werden, darunter zwei GLS-C und -W und drei GLS-E Ansätze. Außerdem ist jeder zu bewertende Ansatz

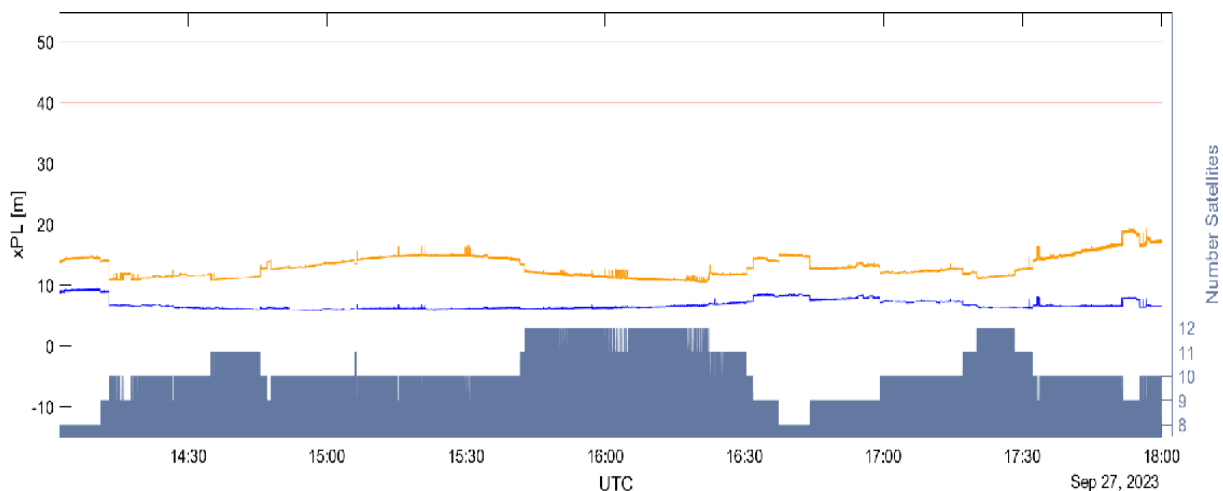


Abb. 6 GLASS Station Leistung während der Flugversuche t am ersten Tag

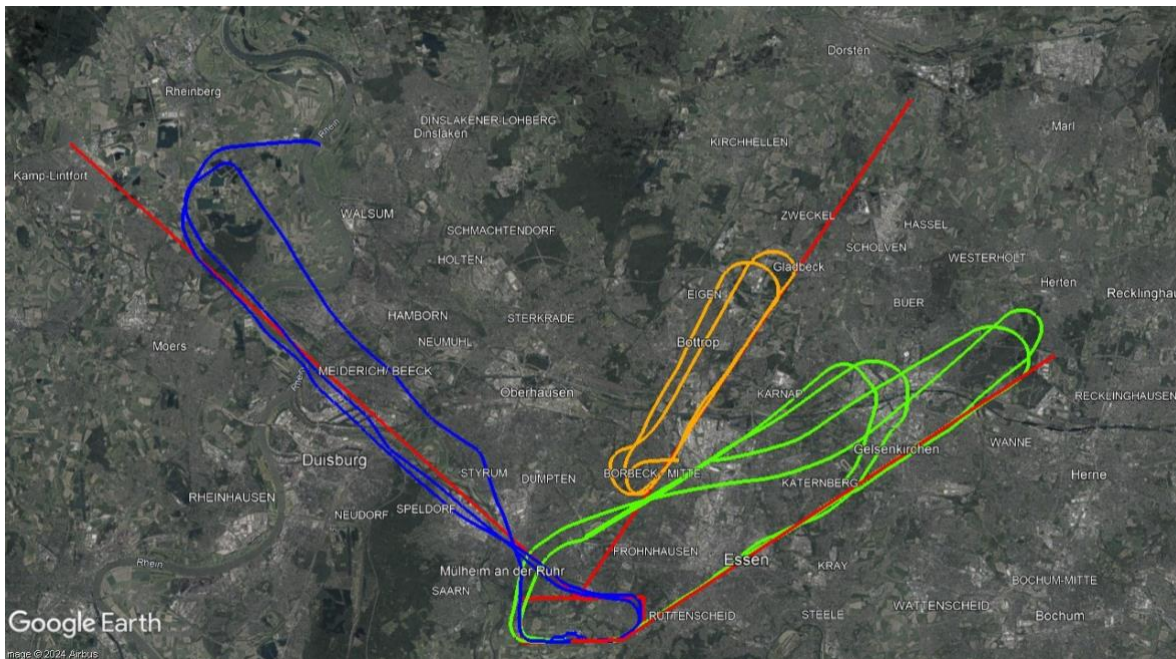


Abb. 7 Geleitete Ansätze GLS-E (blau), -W (orange) und -C (grün) mit entsprechenden Referenzpfaden (rot)

wird abgeschnitten, beginnend mit der Ausrichtung auf dem ankommenden Kurs und endend mit dem Passieren des Anflug-Referenzpunkts, der den Endpunkt des Referenzpfads und damit die Einmündung in das Verkehrsmuster markiert. Abbildung 7 zeigt die sieben bewerteten Anflüge mit den entsprechenden Referenzpfaden, wie sie in Abschnitt 3 entworfen wurden. Um die korrekt kodierten FAS-Datenblöcke der entworfenen Verfahren zu bewerten, wurden sowohl der laterale als auch der vertikale Bereich berücksichtigt. Im lateralen Bereich werden die berechnete GLASS Enhanced Position Solution und die daraus resultierenden geradlinigen Führungsinformationen mit dem Referenzpfad der Anflugverfahren verglichen. Eine korrekte Kodierung des dem Verfahren entsprechenden FAS-Datenblocks kann dann durch eine in die richtige Richtung weisende Leitinformation in einem plausiblen Maßstab sichergestellt werden. Im vertikalen Bereich wird die Höhenkomponente der Positionslösung mit den entsprechenden vertikalen Führungsinformationen mit der Referenzhöhe verglichen. Abbildung 8 zeigt die laterale und Abbildung 9 die vertikale Auswertung eines GLS-C-Ansatzes mit einem erkennbar korrekt kodierten entsprechenden FAS-Datenblock. Ähnliche Ergebnisse wurden für GLS-W Anflüge erzielt. Da GLS-E während der Flugversuche immer die volle Auslenkung nach rechts zeigte, wurde der seitliche Bereich weiter untersucht. Abbildung 10 zeigt die seitliche Auswertung eines geflogenen GLS-E Verfahrens, das im Gegensatz zu den korrigierten kodierten Anflügen eine viel größere geradlinige Abweichung zeigt, die bei der Annäherung an das Verkehrsmuster linear abnimmt. In Bezug auf die typische Architektur eines Anflugs, wie in 2 beschrieben, resultiert dieses Verhalten aus einem falschen Wert des Flugwegausrichtungspunkts (FPAP), der als Koordinaten-Offset des FPAP aus dem LTP

kodiert wurde. Neben der korrekten Kodierung der FAS-Datenblöcke, die Voraussetzung für eine korrekte Berechnung der Führungsinformationen ist, mussten auch die aufgetretenen Schwierigkeiten beim VDB-Empfang bewertet werden. Die Auswertung aller durchgeführten Anflüge ergab, dass ab ca. 8 bis 10nm außerhalb des Verkehrsmusters kontinuierliche Führungsinformationen verfügbar waren. Bei einem geforderten Dienstumfang von 20 nm vom LTP in Anflugrichtung gemäß [11] muss die Positionierung der UKW-Antenne neu bewertet und anschließend gemäß [12] überprüft werden. Neben der Nachbearbeitung der aufgezeichneten Daten wurde auch der Pilot, der den Anflug durchführte, zur Brauchbarkeit der von der experimentellen CDI erhaltenen Führungsinformationen befragt, wobei sich zwei Hauptprobleme herausstellten. Der erste betrifft die Positionierung der experimentellen CDI über dem Blendschutz, die den Piloten dazu zwang, die übliche Blickführung zu ändern. Zweitens litt die experimentelle CDI unter einem leichten Versatz der angezeigten Führungsinformationen. Es war nicht möglich zu beurteilen, ob dies durch die CDI selbst oder durch die GPU4000 als Treiber ausgelöst wurde.

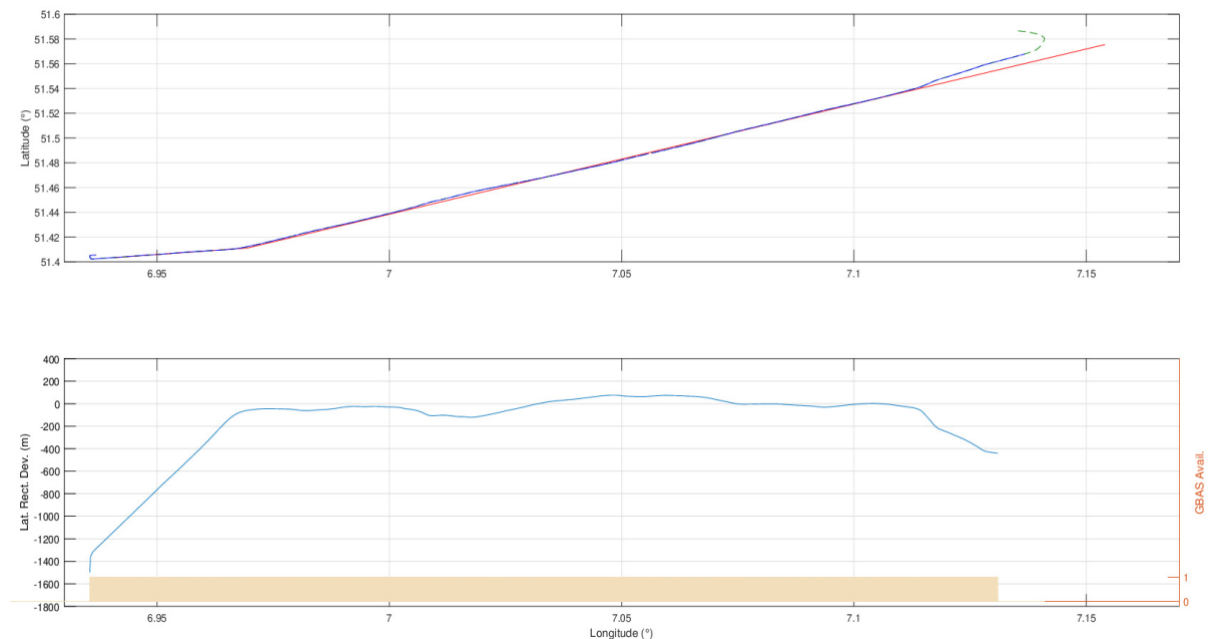


Abb. 8 Auswertung des seitlichen Bereichs für einen GLS-C Ansatz

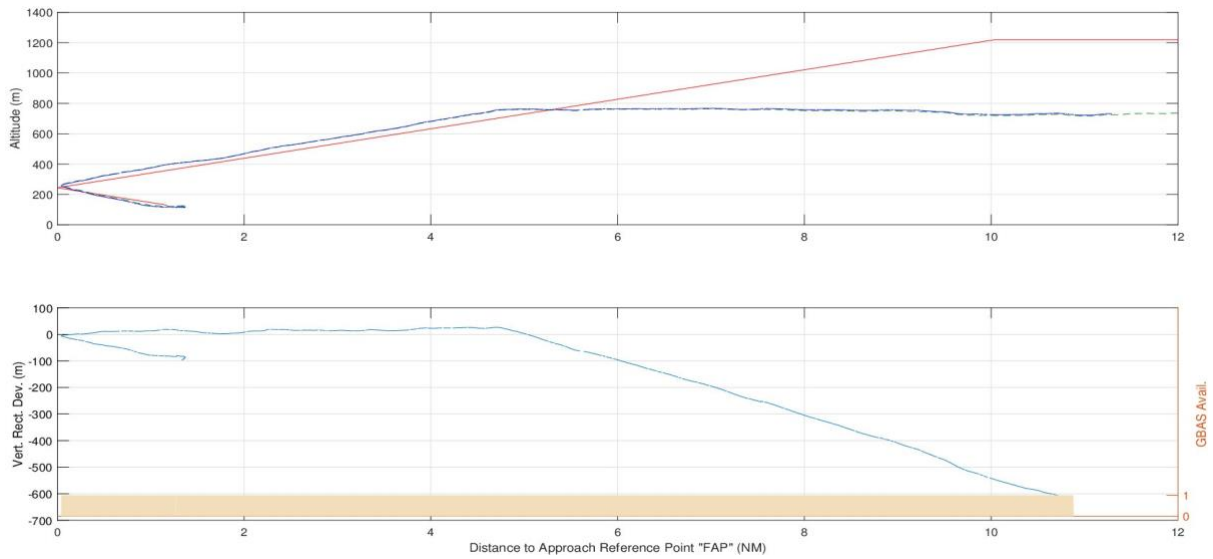


Abb. 9 Auswertung des vertikalen Bereichs für einen GLS-C Ansatz

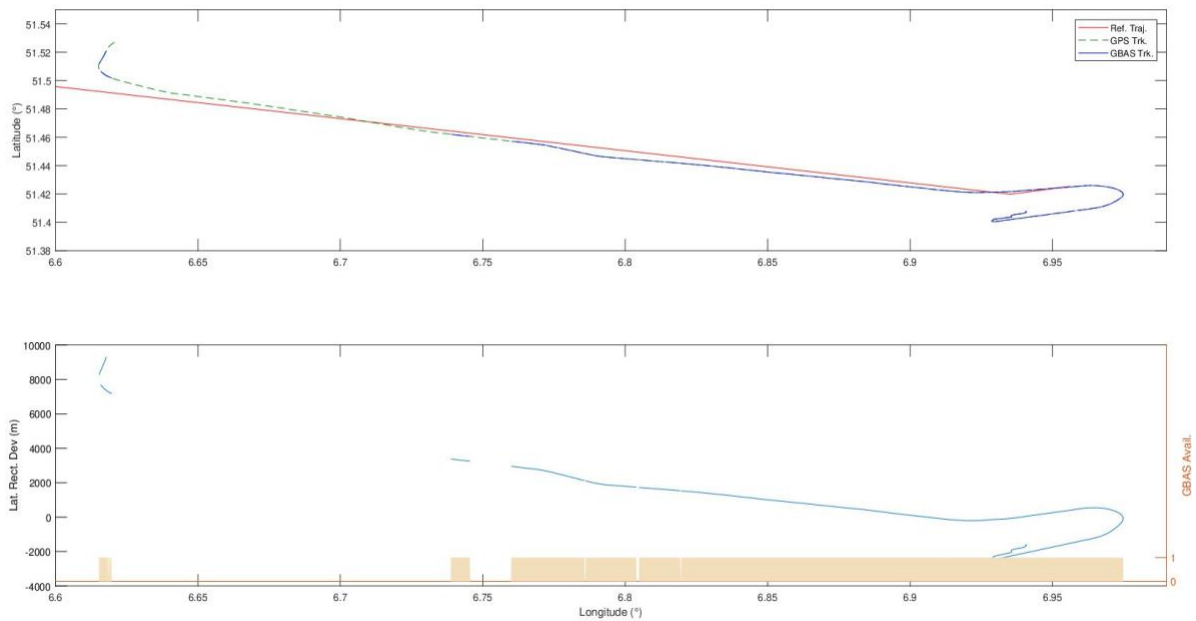


Abb. 10 Auswertung des lateralen Bereichs für einen falsch kodierten GLS-E Ansatz



7.7. Zusammenfassung und Schlussfolgerung

Die Arbeit in diesem Papier zielte darauf ab, GBAS-basierte Anflugverfahren für die allgemeine Luftfahrt bereitzustellen, die von Flugschulen zum Üben von Präzisionsanflügen auf ihren Basisflughäfen genutzt werden können, um Störungen des Luftverkehrsflusses auf Flughäfen mit hohem Verkehrsaufkommen zu reduzieren, und die von anderen Piloten als Navigationshilfe während des VFR-Flugs zur Umgehung des Luftraums genutzt werden.

Verstöße. Zu diesem Zweck wurde GLASS, d.h. ein kostengünstiger SBAS-zu-GBAS-Konverter, eingesetzt und drei Anflugverfahren im Weltraum entworfen, die in das Verkehrsmuster des Regionalflughafens Essen/Mühlheim führen. Um diese Verfahren zu verifizieren und zu validieren, wurden gemeinsam mit der lokalen Flugschule TFC Käufer Flugversuche mit einem prototypischen GBAS-Empfänger der Firma f.u.n.k.e. Avionics durchgeführt. Die Auswertung der Versuche zeigte eine korrekte Kodierung der Prozeduren sowie die Fähigkeit des GBAS-Empfängers, FAS-in-Space-Segmente zu handhaben und korrekte Führungsinformationen zu berechnen. Während der Flugversuche kam es zu Ausfällen des VDB-Empfangs, die im Post-Processing verifiziert wurden und eine Überprüfung der UKW-Antennenposition und der Senderkonfiguration erforderlich machten, um eine bessere Verfügbarkeit von Führungsinformationen zu erreichen. Darüber hinaus kann die Anzeige der Führungsinformationen für den Piloten durch die Verwendung digitaler Instrumente und eines Standard-Avionik-Busses, z.B. ARINC-429, für die Kommunikation optimiert werden, was zu einer insgesamt besser integrierten Lösung führt.

Dieses Papier wurde im Rahmen des GLASS-Projekts geschrieben. Wir danken George Michahelles und Marc Altenscheidt von TFC Käufer für die Durchführung der Flugtests als Piloten sowie der f.u.n.k.e. AVIONICS GmbH für ihre Unterstützung auf der GPU4000.



8. An Operational Concept Flying GLS Approaches Using Satellite Based Augmentation Systems

8.1. Abstract

A new converter technology allows suitably equipped aircraft to use data provided by the satellite-based augmentation system in receivers originally designed for the ground-based augmentation landing system. For these aircraft, that system enables a lower decision altitude and hence improved access to airports. To make this technology usable, air crews require an operational concept and the flight crew has to be presented with the appropriate information in the form of approach charts. Two different possibilities for an operational concept were developed and the corresponding approach charts created. One option is a modified area navigation approach chart, to which the specific information is added. The other chart is an entirely separate procedure for the approach. These two options were tested with airline pilots in an Airbus A320 full flight training simulator. During the simulator flights, aircraft performance data was recorded and the participants filled in questionnaires regarding workload and quality of the operational concept. The results show different behavior during the intercept of the final course, but all approaches remained within the required limits. The questionnaires revealed that the workload is higher during the area navigation variant and that all participants prefer the separate ground-based augmentation landing system variant.

8.2. Introduction

Nowadays, most instrument approach procedures to land at airports flown in commercial aviation are based on the Instrument Landing System (ILS). At aerodromes where ILS approaches are not available, Global Navigation Satellite Systems (GNSS) derived position data are used to fly Required Navigation Performance (RNP) approaches based on area navigation. To improve accuracy and integrity, GNSS such as the Global Positioning System (GPS) can be augmented by a Satellite Based Augmentation System (SBAS) or a Ground Based Augmentation System (GBAS)[1]. These systems provide added integrity plus enhanced accuracy and continuity compared to a stand-alone GPS system (see, for example [2], [3] and the references therein).

An SBAS consists of multiple ground stations spread over a whole continent, one or more master control stations that calculate the correction and integrity information plus at least one satellite in a geostationary orbit. The information is transmitted to the user on the civilian GPS frequency via a transponder on the geostationary satellite. In aircraft the reception of the signal enables Localizer Performance with Vertical guidance (LPV) final approach segments and their corresponding decision heights. At these heights the pilot must have visual cues with the runway established or otherwise initiate the missed approach procedure [4]. For this type of



approach guidance, final approach segment (FAS) data is stored in the aircraft's navigation database. If LPV is available, its corresponding decision altitude is usually the lowest among all minima available for these approaches. Unfortunately, the LPV final approach segment can only be flown by very few commercial transportation aircraft (only the A350 and A220 at the time of writing), because the required equipment is not commonly certified for any other medium or heavy commercial transport aircraft.

A GBAS consists of three to four GPS receivers, a master station, and an VHF transmitter located at the aerodrome. As with SBAS, the master station computes correction and integrity information and provides it to a user, this time with a VHF data broadcast from the ground. This data broadcast contains up to 49 FAS data blocks. When an aircraft uses this technology for landing, it must fly GBAS Landing System (GLS) approaches. Even though many commercial transportation aircraft are equipped with GLS receivers to fly these approaches, they are not widely available due to the extensive costs of a GBAS installation at aerodromes. [5].

Dautermann et al. [6] developed a system to combine the benefits of the two different augmentation systems, while eliminating most of the drawbacks. The GLS Approach using SBAS (GLASS) system consists of a ground station, a receiver for the SBAS signal, and a VDB transmitter for the GLS signal (see also Figure 1) The received SBAS information is combined with the locally stored FAS data to generate a GBAS Approach Service Type A (GAST-A) signal [7]. Therefore, GLS equipped aircraft can fly the LPV final approach segment of RNP approaches. This system could be implemented at aerodromes having limited installation surface area or investment constraints that prevent the installation of a standard GLS providing the GAST-C service comparable to an ILS.

The service provided by GLASS conforms to the GBAS Approach Service Type A (GAST-A), an approach service originally envisioned by the Australian Ground based Regional Augmentation System GRAS [8], [9].

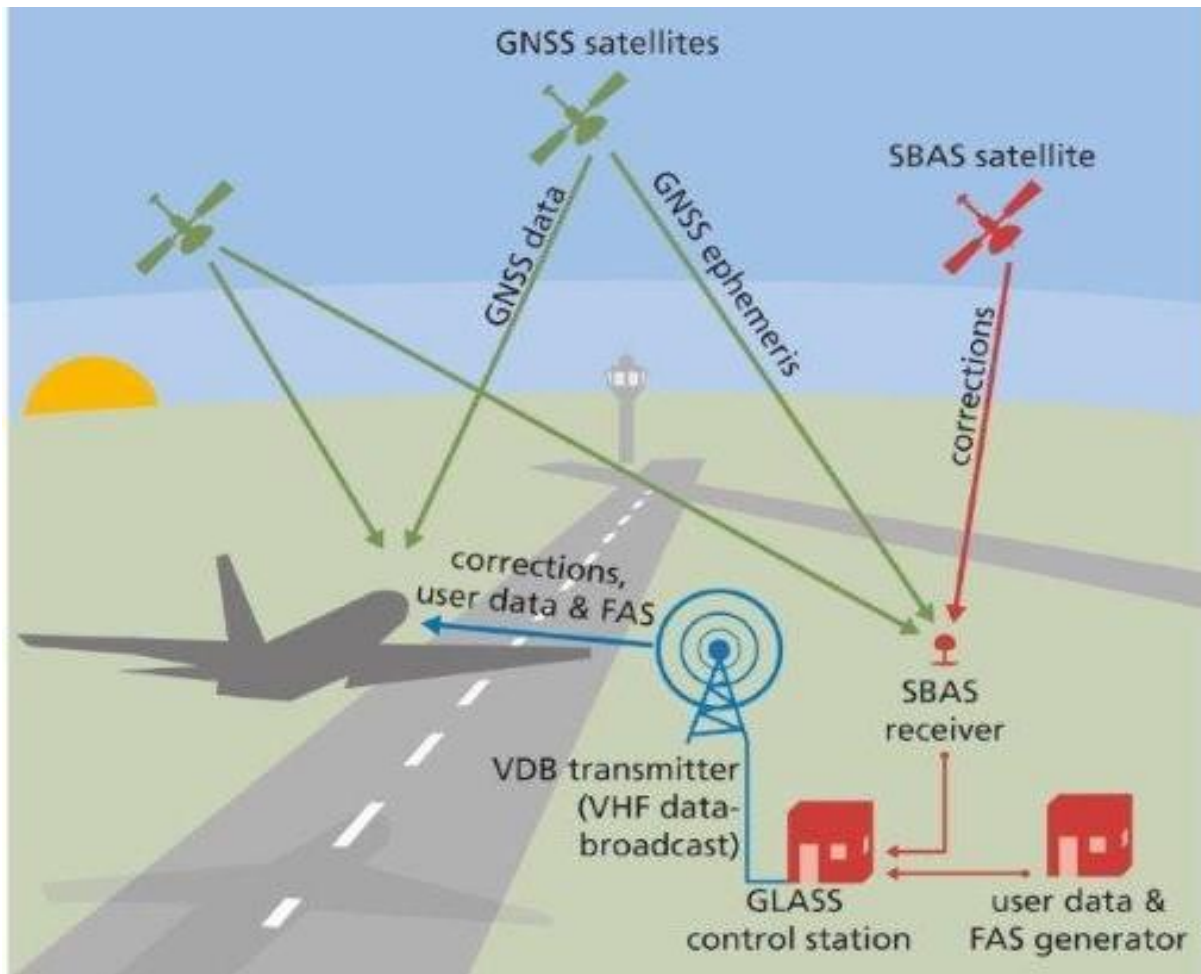


Figure 1: GLASS architecture enabling GLS equipped aircraft flights to LPV minimum.

The technology was tested in flight trials and performed well to GAST-A standards [10] [11]. The next step to the deployment of the GLASS technology is the development of an operational concept (CON OPS) for the usage of this technology during airline operations. For this, we present different approach charts and cockpit procedures to airline crews, have each crew fly the different procedures and evaluate their performance and responses.

8.3. Charting

Every published Instrument Approach Procedure (IAP) to an airport has an associated chart. These charts differ between the approach types and are used by flight crews to obtain the required information about the approach and to set up the avionics in the plane accordingly [12].

Here, we were looking for the best chart to present the required information about GLASS to the crew. The charts we developed are based on the RNP E approach to runway 15 in Salzburg (LOWS). That chart is published in the Austrian Aeronautical Information Publication (AIP) and can be found at <https://eaip.austrocontrol.at/>. The approach displayed on this chart is an “LPV

only” approach, therefore only aircraft able to use SBAS for IAPs can fly it. The most common commercial air transport aircraft, the Boeing 737 and the Airbus A320 do not have this required equipment. We developed two charts that allow GLS equipped aircraft the usage of that approach.

GLS-Variant

The first option is a GLS chart (Figure 2) with additional information added to inform the pilots it is based on SBAS. The approach needs to be coded as a GLS type and stored the aircraft database in order to enable it to be flown.. We applied several changes to the chart compared to the baseline RNP-E chart from the AIP [13]. The chart was renamed to show GLS-E in the upper right-hand corner instead of RNP-E. Another box further to the left in the top row shows the information required to fly the GLS. This includes the 5-digit channel number (22265) which is required to enable the reception of the GLS signal via the avionics and 4-digit identifier S15A. If the correct channel number is tuned and the avionics receive the signal, this identifier is displayed on the Primary Flight Display (PFD) on the flight deck. This allows the flight crew to verify the correct setting of the GLS receiver. In addition to the information at the top of the chart, a box in the center of the chart shows a remark. This remark contains the same channel number and identifier as shown at the top of the chart. Furthermore, it informs the pilots about the fact, that LPV service is provided via this GLS signal.



9. **Ein operationelles Konzept zum Fliegen von GLS-Ansätzen mit satellitengestützten Augmentierungssystemen**

Deutsche Übersetzung von Kapitel 8 mit DeepL

9.1. **Abstrakt**

Eine neue Konvertertechnologie ermöglicht es entsprechend ausgerüsteten Flugzeugen, die Daten des satellitengestützten Augmentierungssystems in Empfängern zu nutzen, die ursprünglich für das bodengestützte Augmentierungssystem entwickelt wurden. Für diese Flugzeuge ermöglicht dieses System eine niedrigere Entscheidungshöhe und damit einen besseren Zugang zu Flughäfen. Um diese Technologie nutzbar zu machen, benötigen die Flugzeugbesatzungen ein Betriebskonzept und die Flugbesatzung muss mit den entsprechenden Informationen in Form von Anflugkarten versorgt werden. Es wurden zwei verschiedene Möglichkeiten für ein Betriebskonzept entwickelt und die entsprechenden Anflugkarten erstellt. Eine Möglichkeit ist eine modifizierte Anflugkarte für die Flächennavigation, der die spezifischen Informationen hinzugefügt werden. Die andere Karte ist ein völlig separates Verfahren für den Anflug. Diese beiden Optionen wurden mit Airline-Piloten in einem Airbus A320 Full Flight Training-Simulator getestet. Während der Simulatorflüge wurden die Leistungsdaten des Flugzeugs aufgezeichnet und die Teilnehmer füllten Fragebögen zur Arbeitsbelastung und Qualität des Betriebskonzepts aus. Die Ergebnisse zeigen ein unterschiedliches Verhalten während des Abfangens des Endkurses, aber alle Anflüge blieben innerhalb der geforderten Grenzen. Die Fragebögen ergaben, dass die Arbeitsbelastung bei der Variante der Flächennavigation höher ist und dass alle Teilnehmer die Variante des separaten bodengestützten Erweiterungssystems bevorzugen.

9.2. **Einführung**

Heutzutage basieren die meisten Instrumentenanflugverfahren zur Landung auf Flughäfen, die in der kommerziellen Luftfahrt geflogen werden, auf dem Instrumentenlandesystem (ILS). Auf Flugplätzen, für die keine ILS-Anflüge verfügbar sind, werden von globalen Navigationssatellitensystemen (GNSS) abgeleitete Positionsdaten verwendet, um RNP-Anflüge (Required Navigation Performance) zu fliegen, die auf Flächennavigation basieren. Um die Genauigkeit und Integrität zu verbessern, können GNSS wie das Global Positioning System (GPS) durch ein satellitengestütztes Erweiterungssystem (SBAS) oder ein bodengestütztes Erweiterungssystem (GBAS)[1] ergänzt werden. Diese Systeme bieten zusätzliche Integrität sowie eine höhere Genauigkeit und Kontinuität im Vergleich zu einem eigenständigen GPS-System (siehe z.B. [2], [3] und die darin enthaltenen Referenzen).



Ein SBAS besteht aus mehreren Bodenstationen, die über einen ganzen Kontinent verteilt sind, einer oder mehreren Hauptkontrollstationen, die die Korrektur- und Integritätsinformationen berechnen, sowie mindestens einem Satelliten in einer geostationären Umlaufbahn. Die Informationen werden auf der zivilen GPS-Frequenz über einen Transponder auf dem geostationären Satelliten an den Nutzer übertragen. In Flugzeugen ermöglicht der Empfang des Signals Localizer Performance with Vertical guidance (LPV) Endanflugsegmente und ihre entsprechenden Entscheidungshöhen. Bei diesen Höhen muss der Pilot die Landebahn visuell erkennen oder andernfalls das Fehlanflugverfahren einleiten [4]. Für diese Art der Anflugführung werden die Daten des Endanflugsegments (FAS) in der Navigationsdatenbank des Flugzeugs gespeichert. Wenn LPV verfügbar ist, ist die entsprechende Entscheidungshöhe in der Regel die niedrigste unter allen für diese Anflüge verfügbaren Minima. Leider kann das LPV-Endanflugsegment nur von sehr wenigen Verkehrsflugzeugen geflogen werden (zum Zeitpunkt des Verfassens dieses Artikels nur von der A350 und der A220), da die erforderliche Ausrüstung in der Regel nicht für andere mittlere oder schwere Verkehrsflugzeuge zugelassen ist.

Ein GBAS besteht aus drei bis vier GPS-Empfängern, einer Hauptstation und einem UKW-Sender, der sich auf dem Flugplatz befindet. Wie bei SBAS berechnet die Hauptstation die Korrektur- und Integritätsinformationen und stellt sie dem Nutzer zur Verfügung, diesmal mit einer UKW-Datenübertragung vom Boden aus. Diese Datenübertragung enthält bis zu 49 FAS-Datenblöcke. Wenn ein Flugzeug diese Technologie zur Landung nutzt, muss es GBAS-Landesysteme (GLS) anfliegen. Obwohl viele Verkehrsflugzeuge mit GLS-Empfängern ausgestattet sind, um diese Anflüge zu fliegen, sind sie aufgrund der hohen Kosten für eine GBAS-Installation auf Flugplätzen nicht weit verbreitet. [5].

Dautermann et al. [6] haben ein System entwickelt, das die Vorteile der beiden verschiedenen Augmentierungssysteme kombiniert und gleichzeitig die meisten Nachteile eliminiert. Das GLS Approach using SBAS (GLASS) System besteht aus einer Bodenstation, einem Empfänger für das SBAS-Signal und einem VDB-Sender für das GLS-Signal (siehe auch Abbildung 1). Die empfangenen SBAS-Informationen werden mit den lokal gespeicherten FAS-Daten kombiniert, um ein GBAS Approach Service Type A (GAST-A) Signal zu erzeugen [7]. Daher können mit GLS ausgestattete Flugzeuge das LPV-Endanflugsegment von RNP-Anflügen fliegen. Dieses System könnte auf Flugplätzen mit begrenzter Installationsfläche oder Investitionsbeschränkungen eingesetzt werden, die die Installation eines Standard-GLS verhindern, das den mit einem ILS vergleichbaren GAST-C-Dienst bietet.

Der von GLASS angebotene Dienst entspricht dem GBAS Approach Service Type A (GAST-A), einem Anflugdienst, der ursprünglich von dem australischen Ground based Regional Augmentation System GRAS [8], [9] entwickelt wurde.

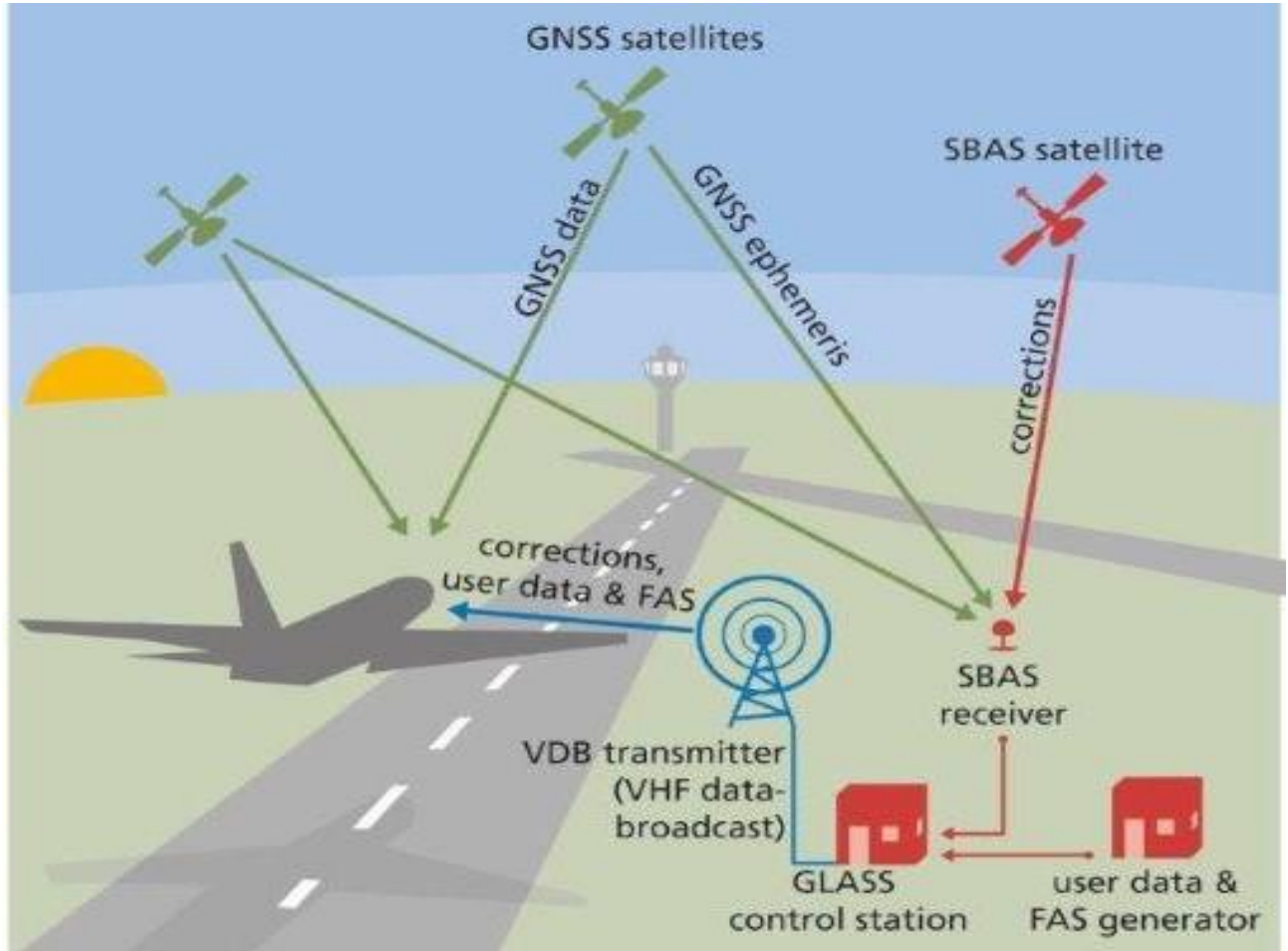


Abbildung 1: Die GLASS-Architektur ermöglicht mit GLS ausgestatteten Flugzeugen Flüge zum LPV-Minimum.

Die Technologie wurde in Flugversuchen getestet und hat die GAST-A Standards [10] [11] gut erfüllt. Der nächste Schritt zum Einsatz der GLASS-Technologie ist die Entwicklung eines Betriebskonzepts (CON OPS) für die Nutzung dieser Technologie im Flugbetrieb. Dazu präsentieren wir den Flugzeugbesatzungen verschiedene Anflugkarten und Cockpit-Prozeduren, lassen jede Besatzung die verschiedenen Prozeduren fliegen und bewerten ihre Leistung und Reaktionen.

9.3. Charting

Jedes veröffentlichte Instrumentenanflugverfahren (IAP) auf einen Flughafen hat eine zugehörige Karte. Diese Karten unterscheiden sich je nach Anflugart und werden von den



Flugbesatzungen verwendet, um die erforderlichen Informationen über den Anflug zu erhalten und die Avionik im Flugzeug entsprechend einzustellen [12].

Hier haben wir nach der besten Karte gesucht, um der Besatzung die erforderlichen Informationen über GLASS zu präsentieren. Die Karten, die wir entwickelt haben, basieren auf dem RNP E-Anflug auf die Piste 15 in Salzburg (LOWS). Diese Karte ist im österreichischen Luftfahrthandbuch (AIP) veröffentlicht und kann unter <https://eaip.austrocontrol.at/> abgerufen werden. Der auf dieser Karte dargestellte Anflug ist ein "LPV only"-Anflug, d.h. nur Flugzeuge, die SBAS für IAPs verwenden können, können ihn fliegen. Die gängigsten kommerziellen Verkehrsflugzeuge, die Boeing 737 und der Airbus A320, verfügen nicht über diese erforderliche Ausrüstung. Wir haben zwei Karten entwickelt, die es mit GLS ausgestatteten Flugzeugen ermöglichen, diesen Anflug zu nutzen.

GLS-Variante

Die erste Option ist eine GLS-Karte (Abbildung 2) mit zusätzlichen Informationen, die den Piloten darüber informieren, dass sie auf SBAS basiert. Der Anflug muss als GLS-Typ kodiert und in der Flugzeugdatenbank gespeichert werden, damit er geflogen werden kann. Wir haben mehrere Änderungen an der Karte im Vergleich zur RNP-E-Basiskarte aus dem AIP [13] vorgenommen. Die Karte wurde umbenannt und zeigt nun in der oberen rechten Ecke GLS-E anstelle von RNP-E. Ein weiteres Kästchen weiter links in der oberen Reihe zeigt die Informationen an, die zum Fliegen des GLS erforderlich sind. Dazu gehören die 5-stellige Kanalnummer (22265), die für den Empfang des GLS-Signals über die Avionik erforderlich ist, und die 4-stellige Kennung S15A. Wenn die richtige Kanalnummer eingestellt ist und die Avionik das Signal empfängt, wird diese Kennung auf dem Primary Flight Display (PFD) auf dem Flugdeck angezeigt. So kann die Flugbesatzung die korrekte Einstellung des GLS-Empfängers überprüfen. Zusätzlich zu den Informationen am oberen Rand der Karte wird in einem Feld in der Mitte der Karte eine Bemerkung angezeigt. Diese Bemerkung enthält dieselbe Kanalnummer und Kennung wie die oben auf der Karte angezeigte. Außerdem informiert er die Piloten darüber, dass der LPV-Dienst über dieses GLS-Signal bereitgestellt wird.



Luffahrtforschungsprogramm VI
(Erster Aufruf 2020-2024)
Projektbeschreibung GLASS

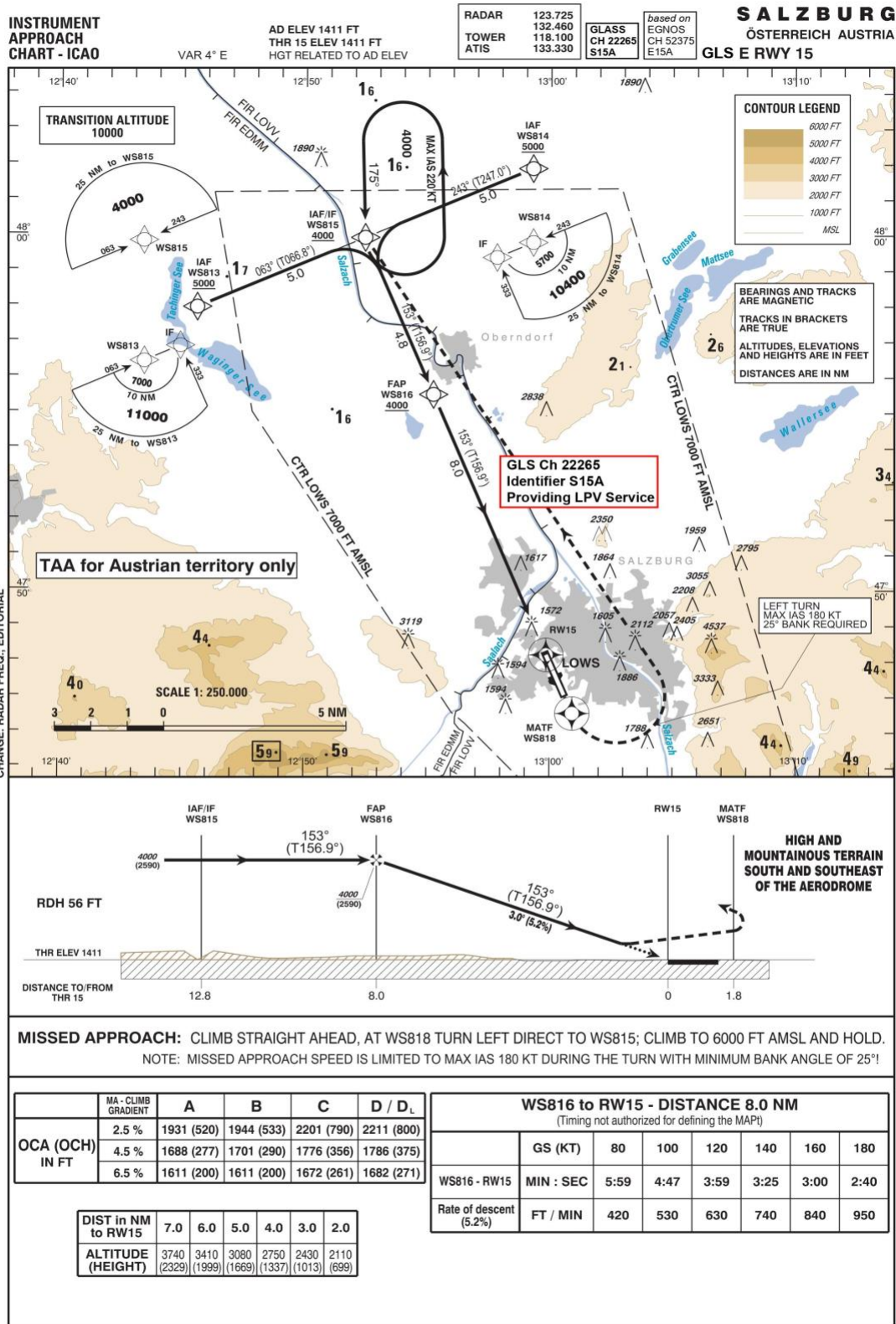


Abbildung 2: Neue GLS-Karte für den GLASS-Betrieb nach Salzburg nach der AIP LOWS RNP E 15-Karte



RNP-Variante

Die zweite Option ist eine RNP-Anflugkarte für den GLASS-Betrieb. Der Unterschied zwischen der veröffentlichten RNP E-Karte und der unseren ist das Bemerkungsfeld neben dem Final auf der Zeichnung. Dort steht, dass das LPV-Finale auch über einen GLS-Kanal bereitgestellt wird. Die entsprechende Kanalnummer und die Kennung sind im Bemerkungsfeld angegeben.(Abbildung 3)



Luffahrtforschungsprogramm VI
(Erster Aufruf 2020-2024)
Projektbeschreibung GLASS

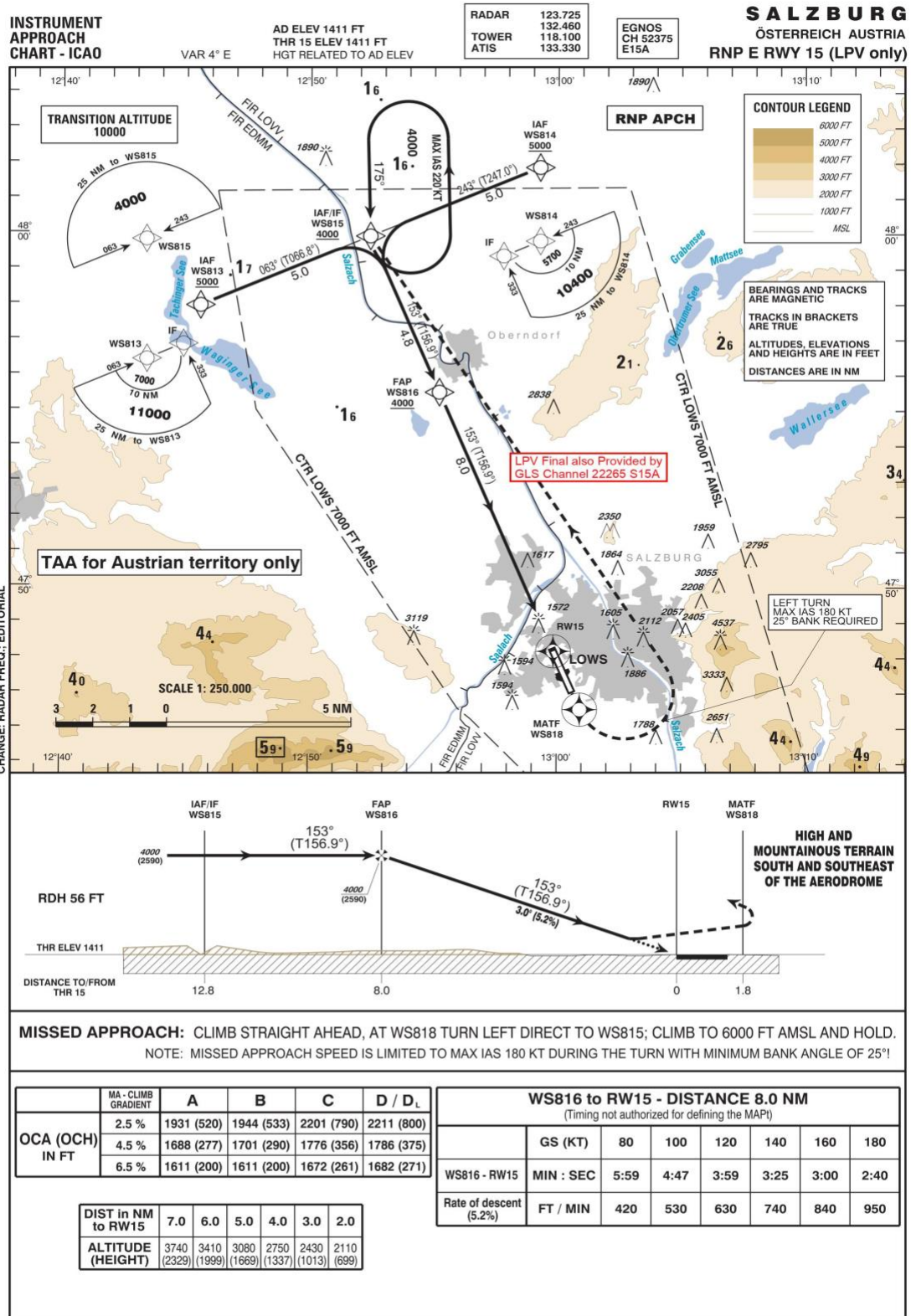


Abbildung 3: Angepasstes RNP-Diagramm für LOWS RNP E 15 mit Informationen zur GLASS-Technologie.



9.4. Betrieb und Aufgabenverteilung

Um das GLASS-Konzept berücksichtigen zu können, haben wir die Standardbetriebsverfahren für ein Airbus A320-Flugzeug angepasst, um die für die GLASS-Technologie einzigartigen Aktionen einzubeziehen. Wir haben uns für den A320 entschieden, weil es sich um eines der gängigsten Verkehrsflugzeuge handelt und bei Lufthansa Aviation Training ein A320 Full-Flight-Simulator mit GLS-Funktionen zur Datenextraktion zur Verfügung stand.

Hier stellen wir die Aufgabenverteilung der Crew für die beiden Varianten der GLASS-Nutzung vor. Die Tabellen in diesem Kapitel zeigen die Aufgaben, die die Flugbesatzung bei der Verwendung von GLASS in einer A320 durchführen muss. Die Tabellen beginnen mit der Vorbereitung des Anflugs und enden bei der Mindestsinkflughöhe, bei der die Piloten entscheiden müssen, ob sie die Landung fortsetzen oder das Fehlanflugverfahren einleiten wollen.

Kommerzielle Transportflugzeuge wie der A320 werden routinemäßig von zwei Piloten geflogen. Beide können das Flugzeug fliegen und haben die gleichen Steuerungsmöglichkeiten auf ihrer jeweiligen Seite. Die Aufgaben während des Fluges werden in der Regel auf den fliegenden Piloten (PF) und den überwachenden Piloten (PM) aufgeteilt. Der PF steuert die Flugbahn des Flugzeugs direkt, entweder manuell, über die Steuerungsschnittstelle oder mit Hilfe des Autopiloten. Der PM hingegen führt die Aufgaben aus, die den Flugweg nicht direkt beeinflussen, wie die Kommunikation mit der Flugsicherung und das Lesen der Checklisten. Da beide Piloten für beide Aufgaben ausgebildet sind, wechseln sie in der Regel nach jedem Flug die Rollen.

GLS

Bei einem Anflug mit einer GLS-Anflugkarte kann die Besatzung die Standard-GLS-Verfahren verwenden, die sie während ihrer Ausbildung gelernt hat, bei der das GLS wie ein ILS geflogen wird. Der Unterschied für die Flugbesatzungen ist im Vergleich zu ILS sehr gering, da die Avionik des Flugzeugs GLS-Abweichungen auf die gleiche Weise anzeigt wie ILS-Abweichungen und das System die richtigen Einstellungen auswählt, wenn der Anflug in das Flight Management System (FMS) geladen wird.

Die Aufgaben, die die Besatzung für den Anflug erfüllen muss, sind in chronologischer Reihenfolge in Tabelle 1 aufgeführt. Die Aufgaben, die speziell für den GLS-Anflug gelten, sind fett und kursiv dargestellt. Tabelle 1 ist in drei Teile unterteilt, um die drei verschiedenen Situationen während des Anflugs hervorzuheben, in denen die aufgeführten Aufgaben ausgeführt werden.

Besonders wichtig ist die Überprüfung der richtigen Kanalnummer und Kennung. Die Kanalnummer wird vom Flugzeug automatisch eingestellt, um den Empfang des GLS-Signals



zu ermöglichen. Die Kennung ist Teil dieses Signals und wird bei Empfang auf den primären Fluganzeigen angezeigt. Durch den Vergleich der empfangenen Kennung mit der auf der Karte angezeigten Kennung prüft die Besatzung, ob das gewünschte Signal empfangen wird.

Tabelle 1: Aufgabenliste für den Pilotenflug und die Pilotenüberwachung während eines Anflugs mit GLASS-Technologie und GLS-Betrieb. ([13] abgeleitet vom A320 Quick Reference Handbook [14])

Aufgaben für Pilot Flying	Aufgaben für die Pilotüberwachung
VORBEREITUNG AUF DEN ABSTIEG	
Bereiten Sie Navigationskarten vor. Bestätigen Sie die Landeleistung GLS-Ansatz in FMS einfügen GLS Minimum einstellen Landeerhöhung prüfen Stellen Sie Autobrake als erforderlich ein Anflugbesprechung durchführen Terrain auf dem Navigationsdisplay nach Bedarf einstellen Weterradar nach Bedarf einstellen	Wetter- und Landeinformationen einholen Nav-Karten vorbereiten Landeleistung prüfen Überprüfen Sie den korrekten Anflugsatz GLS Minimum einstellen
Freigegebene Höhe im Flugsteuerungsgerät einstellen	Terrain auf dem Navigationsdisplay nach Bedarf einstellen Anti-Eis-System nach Bedarf einstellen Abstiegsgenehmigung einholen
DESCENT	
Bildschirmabstieg Barometrische Referenz bei Freigabe für eine Höhe einstellen und gegenprüfen	Barometrische Referenz bei Freigabe für eine Höhe einstellen und gegenprüfen ECAM-Status prüfen Landescheinwerfer und Anschnallzeichen beim Überflug von 10.000 ft einschalten
Drücken Sie die Taste Landing System auf dem EFIS-Bedienfeld	Drücken Sie die Taste Landing System auf dem EFIS-Bedienfeld Überprüfen Sie die korrekte Kanalnummer und Kennung
Vollständige Anflug-Checkliste	Vollständige Anflug-Checkliste
FLUGZEUGKONFIGURATION FÜR DEN ANFLUG	
Bei Erstanflug Flugplansequenzierung anpassen Ca. 15 NM vor dem Touchdown Aktivieren Sie die Anflugphase Managed Speed prüfen Flugbahn überwachen und bei Bedarf anpassen Weterradar nach Bedarf einstellen	Navigationsgenauigkeit überwachen Anflugfreigabe bei Empfang zurücklesen



Drücken Sie die Annäherungstaste auf der FCU

Prüfen Sie LOC und GS Bewaffnet

Aufruf von LOC beim Abfangen von GLS

LOC*

Prüfen Sie den korrekten seitlichen Abschnitt des Anfluges

Abruf GS beim Abfangen von GLS GS*

Prüfen Sie den korrekten vertikalen Schnittpunkt des Anfluges

Go Around Höhe einstellen

Bei Grüner-Punkt-Geschwindigkeit Klappen 1 anordnen

S Geschwindigkeit prüfen

Klappen 2 bestellen Minimum 2000ft AGL

F Geschwindigkeit prüfen

Fahrwerk ausfahren, wenn Klappen 2 sind

Bestellen Sie Landeklappen 3, wenn das Fahrwerk ausgefahren ist.

Bestellen Sie Klappen VOLL, wenn Klappen 3 sind
Geschwindigkeitsziel prüfen

Stow Schiebetisch

Empfang des Kabinenberichts

Vollständige Checkliste für die Landung
Rufen Sie jede Flugmodus-Anzeigeänderung auf

Fortfahren oder Umkehren bei GLS Minimum

Prüfen Sie den korrekten seitlichen Abschnitt des Anfluges

Prüfen Sie den korrekten vertikalen Schnittpunkt des Anfluges

Wählen Sie Klappen 1 bei Bestellung

Wählen Sie Klappen 2 bei der Bestellung

Wählen Sie bei der Bestellung

Fahrwerkshebel unten

Bestätigen Sie Auto-Bremse

Arm Boden Spoiler

Außenlichter einstellen

Wählen Sie bei der Bestellung Klappen 3

ECAM Rad Seite prüfen

Wählen Sie bei der Bestellung Klappen

FULL

Prüfen Sie Auto Thrust auf Speed Mode oder Off

Schalten Sie das Wing Anti Ice System aus, wenn es nicht benötigt wird.

Stow Schiebetisch

Check Landing Memo kein Blau im ECAM-Display

Empfang des Kabinenberichts

Kabinenpersonal beraten

Vollständige Checkliste für die Landung

Flugparameter überwachen

Überwachen Sie Einhundert oben und Mindestanforderung

RNP-Variante

Wenn Sie die RNP-Variante des Anflugs fliegen, laden die Piloten den RNP-Anflug aus dem FMS. Normalerweise wählt die Avionik des A320-Flugzeugs die erforderlichen Navigationshilfen automatisch aus und stellt sie ein. Da für einen RNP-Anflug keine bodengestützte Infrastruktur erforderlich ist, stellt das FMS natürlich auch keine bestimmte Navigationshilfe automatisch ein. Daher kann das System die erforderliche GLS-Kanalnummer und den eingehenden Kurs nicht automatisch einstellen, um das GLASS-GLS-Signal zu verwenden. Die manuelle Eingabe des GLS-Kanals durch den Piloten in das FMS wird auf dem PFD angezeigt, aber vom Flugführungsrechner ignoriert.



Dies führt zu den größten Unterschieden im Betrieb. Die Backup-Abstimmung muss verwendet werden, um den Empfang und die Nutzung des GLS-Signals im Flugführungscomputer von A320-Flugzeugen zu ermöglichen. Die Piloten müssen die Backup-Abstimmung des GLS auf dem COM/NAV-Bedienfeld auf dem Mittelpodest manuell einschalten und während eines Anflugs mit GLASS und einem vom FMS geladenen RNP-Anflug die richtige Kanalnummer und den Anflugkurs auf diesem Bedienfeld auswählen. Alle Unterschiede in der Bedienung durch die Besatzung sind in Tabelle 2 aufgeführt.

Tabelle 2: Aufgabenliste für den Pilotenflug und die Pilotenüberwachung während eines Anflugs mit GLASS-Technologie und RNP-Betrieb. ([13], abgeleitet vom A320 Quick Reference Handbook [14])

Aufgaben für Pilot Flying	Aufgaben für die Pilotüberwachung
VORBEREITUNG AUF DEN ABSTIEG	
Bereiten Sie Navigationskarten vor. Bestätigen Sie die Landeleistung RNP-Anflug in FMS einfügen Abstimmen der GLS-Kanalnummer Inbound-Kurs auswählen LPV Minimum einstellen Landeerhöhung prüfen <i>Fortsetzung wie in Tabelle tbl. 3.1 gezeigt</i>	Wetter- und Landeinformationen einholen Nav-Karten vorbereiten Landeleistung prüfen Überprüfen Sie den korrekten Anflugsatz Abstimmen der GLS-Kanalnummer Inbound-Kurs auswählen LPV Minimum einstellen
DESCENT	
<i>Wie in Tabelle tbl. 3.1 gezeigt</i> Drücken Sie die Taste Landing System Vollständige Anflug-Checkliste	Drücken Sie die Taste Landing System Überprüfen Sie die korrekte Kanalnummer und Kennung Vollständige Anflug-Checkliste
FLUGZEUGKONFIGURATION FÜR DEN ANFLUG	
<i>Wie in Tabelle tbl. 3.1 gezeigt</i> Drücken Sie die Annäherungstaste auf der FCU Prüfen Sie LOC und GS Bewaffnet Aufruf von LOC beim Abfangen von GLS LOC* Prüfen Sie den korrekten seitlichen Abschnitt des Anfluges Abruf GS beim Abfangen von GLS GS* Prüfen Sie den korrekten vertikalen Schnittpunkt des Anfluges Go Around Höhe einstellen <i>Wie in Tabelle tbl. 3.1 gezeigt</i> Rufen Sie jede Flugmodus-Anzeigeänderung auf Fortfahren oder Umkehren bei LPV Minimum	Prüfen Sie den korrekten seitlichen Abschnitt des Anfluges Prüfen Sie den korrekten vertikalen Schnittpunkt des Anfluges Flugparameter überwachen Überwachen Sie Einhundert oben und den Mindestanruf



Simulator-Studie

Um die verschiedenen oben beschriebenen Varianten zu bewerten, haben wir eine Simulatorstudie in einem Airbus 320 CAE7000XR Typ Full-Flight zertifizierten Level D Simulator durchgeführt. Ziel der Studie war es, die Variante der Darstellung und Bedienung zu finden, die das höchste Maß an Sicherheit erzeugt. Sicherheit spielt in der Luftfahrt die wichtigste Rolle, kann aber nicht einfach gemessen werden. Um die Sicherheit im Simulator zu bewerten, haben wir die geflogenen Strecken für eine spätere Analyse aufgezeichnet und die Aufgabenbelastung der Flugbesatzungen gemessen [13].

Für jeden veröffentlichten Anflug muss vor der Veröffentlichung eine Hindernisbeurteilung durch den Verfahrensentwickler durchgeführt werden. Auf diese Weise stellt der veröffentlichte Track sicher, dass Hindernisse und Gelände für anfliegende Flugzeuge frei sind. Für jedes Segment des Anflugs wird bei der Planung des Anflugs eine Cross-Track-Toleranz (XTT) berücksichtigt. Diese XTT beträgt 1,9 km während des Anfangsanflugs und des Zwischenanflugs und reduziert sich auf 556 m im Endanflug bei einem RNP-LPV-Anflug [15]. Natürlich kann die Geländefreiheit nicht garantiert werden, wenn weiter von der veröffentlichten Strecke abgewichen wird. Daher müssen der Pilot und das Flugzeug die Abweichung vom gewünschten Track so gering wie möglich halten.

Der Cross-Track-Fehler wird von mehreren Faktoren beeinflusst. Die größten Auswirkungen haben die Eingaben des Piloten und des Autopiloten, wobei diese Eingaben selbst von verschiedenen Faktoren beeinflusst werden. Die Eingaben des Autopiloten werden hauptsächlich von den Eingangssignalen beeinflusst, wie z.B. der Abweichung vom gewünschten Kurs, die im Multi-Mode-Empfänger (MMR) des Flugzeugs berechnet wird. Ob der Autopilot diesem Signal folgt, hängt auch von dem aktiven Modus und dem geladenen Pfad im FMS ab. Da sich diese zwischen der RNP- und der GLS-Variante unterscheiden, kann die Abweichung vom Cross Track unterschiedlich sein. Ein weiterer Grund für unterschiedliche Abweichungen sind die Eingaben der Piloten zur Steuerung der Modi des Autopiloten. Da sich die Betriebsverfahren für die Flugbesatzung zwischen den beiden Varianten unterscheiden, kann es schließlich zu einem unterschiedlichen Verhalten bei Cross-Track-Fehlern kommen.

Neben der Abweichung von der Ideallinie ist auch die Arbeitsbelastung der Besatzung ein Faktor, der die Sicherheit beeinflusst. Eine optimale Leistung der Flugbesatzung kann mit Aufgaben erreicht werden, die nicht überfordern, aber auch nicht unterfordern [16]. Da die Arbeitsbelastung während eines Standardanflugs ausreicht, um sicherzustellen, dass die Besatzung nicht unterfordert ist [17], liegt der Schwerpunkt darauf, die Besatzungen während der Anflüge mit den in diesem Manuskript betrachteten Operationen nicht zu überfordern. Folglich wird eine geringe Aufgabenbelastung angestrebt.



Die Studie wurde mit zwei professionellen Flugbesatzungen durchgeführt. Wir haben uns darauf beschränkt, einen Simulatorplatz mit einer Dauer von vier Stunden zu buchen, was zwei Stunden pro Crew von zwei Piloten bedeutet. Aufgrund der hygienischen und sozialen Distanzierungsvorschriften während der Pandemiesituation im Herbst 2020, als die Studie stattfand, war dies auch die maximal zulässige Auslastung der Simulatoranlage. Daher konnte kein statistischer Signifikanztest für die gesammelten Daten durchgeführt werden. Andere Simulatorstudien zu ähnlichen Themen, bei denen jedoch eine statistische Analyse durchgeführt wurde, verwendeten mindestens 13-26 Piloten als Testpersonen [18][19][20].

Drei der Testpersonen verfügten über eine Airline Transport Pilot Licence (ATPL) und eine über eine Multi-Crew Pilot Licence (MPL). Die Flugerfahrung reichte von 1500 Flugstunden bis zum erfahrensten Piloten mit 16.000 Stunden.

Abbildung 4 zeigt den Ablauf der Simulatorstudie. Vor dem Betreten des Simulators wurden die Besatzungen in die GLASS-Technologie und die Einstellung des Back-up-Navigationspanels während der RNP-Anflüge eingewiesen. Während der Flüge hielten wir uns so nah wie möglich an die realen Trainingsszenarien. Der Flug jeder Crew begann mit einem Standard-Instrumentenabflug, gefolgt von mehreren Anflügen. Jeder Pilot flog beide Varianten als PF und PM, was zu insgesamt 4 Anflügen pro Crew führte.

Den Piloten stand es frei, den Autopiloten so zu benutzen, wie sie es bei einem Flug in einem echten Flugzeug ihrer Fluggesellschaft tun würden. Alle Piloten ließen den Autopiloten bis zu einem gewissen Punkt im Endanflug eingeschaltet. Ein ehemaliger Fluglotse der DFS übernahm die Aufgaben der Fluglotsen.

Während der Anflüge zeichneten wir die Strecke und die Höhe für eine spätere Analyse auf. Außerdem wurden die Teilnehmer gebeten, Fragebögen auszufüllen, um ihre Arbeitsbelastung und ihre Vorlieben zu erfahren.

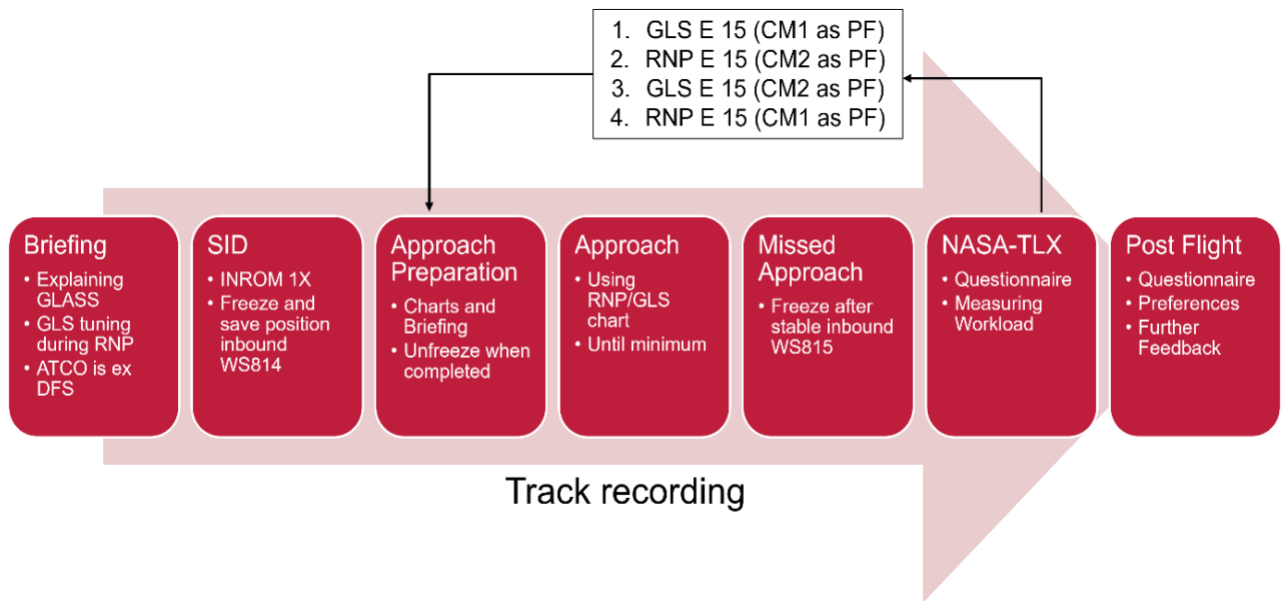


Abbildung 4: Abfolge der Ereignisse während der Simulatorstudie.

Fragebögen

In der Studie haben wir zwei Arten von Fragebögen zur Bewertung der Ansatzvarianten verwendet, den NASA Task Load Index (NASA-TLX) und eine kundenspezifische Zufriedenheitsumfrage. Der NASA-TLX ist eine mehrdimensionale Skala, mit der die Arbeitsbelastung eingeschätzt werden kann. Sie besteht aus sechs Unterskalen, auf denen die Teilnehmer ihre Erfahrungen während der Aufgabe bewerten. Dieses Verfahren wurde von [21] entwickelt. Die sechs Unterskalen sind dort ebenfalls beschrieben. Die Ergebnisse der sechs Subskalen können nach dem ursprünglich mit dem NASA-TLX veröffentlichten Verfahren gewichtet werden, um die individuelle Wahrnehmung der Arbeitsbelastung zu berücksichtigen. Hier waren wir nur an der Gesamtbelastung der Aufgabe interessiert und haben daher auf eine Gewichtung der Ergebnisse verzichtet[22]. Jeder Pilot füllte einen NASA-TLX-Fragebogen aus, nachdem jeder einzelne Anflug abgeschlossen war, um die Arbeitsbelastung für die verschiedenen Varianten zu bewerten.

Der zweite Fragebogen wurde von den Teilnehmern ausgefüllt, nachdem die Simulatorsitzung abgeschlossen war. Hier fragten wir die Teilnehmer nach ihrem persönlichen Wohlbefinden während der verschiedenen Annäherungsvarianten und nach ihrer Meinung darüber, welche Version fehleranfälliger ist und welche Option ihrer Meinung nach die übersichtlichere Darstellung hat. Außerdem erkundigten wir uns, welche Version die Teilnehmer für eine operative Umsetzung bevorzugen würden. Der persönliche Komfort wurde auf einer Skala von 0-100 bewertet und bei jeder der anderen Fragen konnten die Teilnehmer zwischen den Optionen GLS und RNP wählen. Als dritte Option wurde 'No Difference' (kein Unterschied)

hinzugefügt, falls die Teilnehmer keine Unterschiede feststellen konnten. Außerdem enthielt der Fragebogen nach dem Flug Felder für ein offenes Feedback der Teilnehmer.

9.5. Ergebnisse der Leistungsdaten

Abbildung 5 zeigt die während der Simulatorstudie geflogenen Flugbahnen. Die GLS-Anflüge, die in einer höheren und niedrigeren Höhe als die anderen beginnen, sind das Ergebnis eines Kommunikationsfehlers. Die erste Crew war sich nicht bewusst, dass sie für die Sinkflugplanung verantwortlich war. Als dies festgestellt wurde und die Besatzung über ihre eigene Verantwortung informiert wurde, leitete sie sofort einen Sinkflug ein. Obwohl sie im Vergleich zu den anderen Anflügen ein höheres Profil hatten, fühlten sie sich zu Recht zuversichtlich, die erforderliche Höhe zu erreichen. Die zweite Besatzung wurde über ihre eigene Verantwortung bei der Planung des Sinkfluges informiert und war daher sehr vorsichtig. Das führte zu einem Anflug, der niedriger war als die anderen. Abgesehen davon konnten keine weiteren großen Unterschiede in den Flugbahnen festgestellt werden.

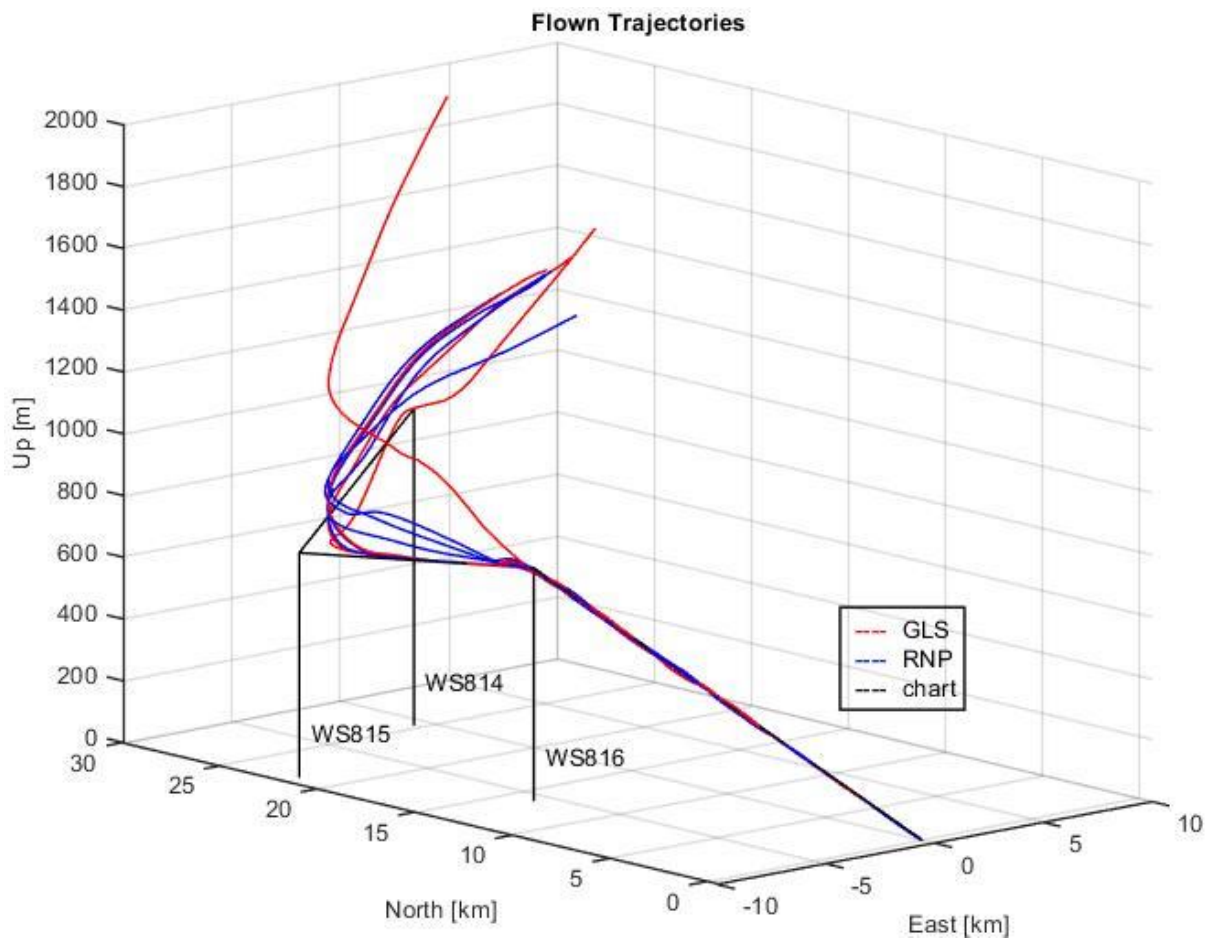


Abbildung 5.1: Während der Simulatorstudie geflogene Trajektorien. Die blauen Trajektorien wurden mit der RNP-Variante geflogen. Rot zeigt die Anflüge, die mit der GLS-Karte geflogen wurden.



Abbildung 5 zeigt die seitliche Abweichung von der Verbindungslinie zwischen den Wegpunkten WS815, WS816 und der Landebahnschwelle. Die X-Achse zeigt die Entfernung von der Landebahnschwelle in Kilometern an. Sie beginnt bei 2 km, da die Besatzungen einen Fehlanflug einleiteten, als sie die Entscheidungshöhe in etwa 2,2 km Entfernung von der Landebahn erreichten. Die Abweichung während des Fehlanflugverfahrens war nicht Teil unserer Studie. Bei 14,3 km zeigt eine schwarze vertikale Linie die Position von WS816 in Bezug auf die Landebahn an. Abweichungen in Flugrichtung nach rechts werden als negative Abweichungen dargestellt. Positive Werte auf der y-Achse zeigen eine Abweichung nach links von der idealen Flugbahn an.

Die große Abweichung auf der anderen Seite von WS816 ist eine Folge des Vorbeiflug-Wegpunkts WS815. Bei solchen Wegpunkten muss das Flugzeug vor dem Erreichen des Punktes abbiegen, um den Weg zum folgenden Wegpunkt abzuschneiden. Das FMS des Flugzeugs berechnet die Wende und befiehlt dem Autopiloten oder dem Flight Director, diese zu fliegen.

In Abbildung 6 sind die Abweichungen während der RNP-Variante in blau dargestellt, während die Abweichungen während der Anflüge mit der GLS-Variante in rot dargestellt sind. Bei der RNP-Variante verringert sich die Abweichung nach dem Abbiegen schnell auf etwa 7 m. Danach dauert es etwa 5 km, bis die Abweichung auf fast Null sinkt. Bei den RNP-Varianten wurde kein Überschwingen festgestellt.

Die resultierenden Kurven während der GLS-Variante zeigen kein so einheitliches Bild. Bei zwei dieser Anflüge nahm die Abweichung langsamer ab als bei den RNP-Varianten, ging aber kontinuierlich auf Null zurück und blieb dort. In den anderen beiden Fällen nimmt die Abweichung nicht kontinuierlich ab, sondern stagniert bzw. steigt leicht an, bevor sie wieder abnimmt und den idealen Track schneidet. Bei zwei Anflügen mit GLS-Betrieb wurde ein Überschwingen aufgezeichnet.

Wir konnten den Grund für das abweichende Verhalten im GLS-Betrieb nicht zweifelsfrei feststellen, aber es wird vermutet, dass die FMS-Berechnung der Kurve dafür verantwortlich ist. Außerdem haben wir die Geschwindigkeit während des Anflugs aufgezeichnet und verwenden sie zur Erklärung dieses Verhaltens. Wir können die leichte Zunahme der Abweichung so erklären, dass die Abbremsung zu diesem Zeitpunkt stattfand und zu einem für die Geschwindigkeit zu großen Neigungswinkel führte, da die Kurve mit der Geschwindigkeit vor der Einleitung der Kurve berechnet wurde. Das FMS erkennt dann die Abweichung und korrigiert sie. Es konnte nicht überprüft werden, ob dieses Verhalten für den Anstieg verantwortlich ist, da die genauen Algorithmen, die das FMS verwendet, nicht öffentlich zugänglich sind.

Eine andere mögliche Erklärung ist, dass das FMS bei einem GLS-Anflug erwartet, dass es der Localizer-Abweichung nach dem Abfangkurs folgt und daher die Wende nicht vorwegnimmt, sobald sich das Flugzeug auf dem Abfangkurs befindet. Bei einem RNP-Anflug berechnet und steuert das FMS die Wende zum Endanflug genauso wie jede andere Wende. Wenn Sie sich auf dem Localizer-Abfangkurs befinden, übernimmt der entsprechende Abfangmodus (LOC*), ohne dass das Flugzeug eine Wende vorwegnimmt.

Nach dem Abfangen des gewünschten Kurses weicht ein Anflug mit der RNP-Variante 10 m nach rechts vom Kurs ab. Diese Abweichung ist wahrscheinlich auf das manuelle Fliegen des jeweiligen Piloten zurückzuführen. Abgesehen davon haben wir nach dem Abfangen keine Unterschiede zwischen den Varianten festgestellt. Da sich das Autoflight-System in dieser Phase im gleichen Modus (LOC GS) befindet und sich auch die Aufgaben der Besatzungen nicht unterscheiden, wurde in dieser Phase kein signifikanter Unterschied erwartet. Während eines GLS-Anflugs beträgt die maximale seitliche Abweichung, die ein Flugzeug bei einem Minimum von 356 Fuß Höhe haben darf, während es noch die vollen vertikalen Toleranzen hat, 58 m [15]. Dies ist der Punkt mit der geringsten XTE-Toleranz. Die aufgezeichneten Werte von bis zu 10 m in 10 km Entfernung liegen deutlich unter dieser Grenze.

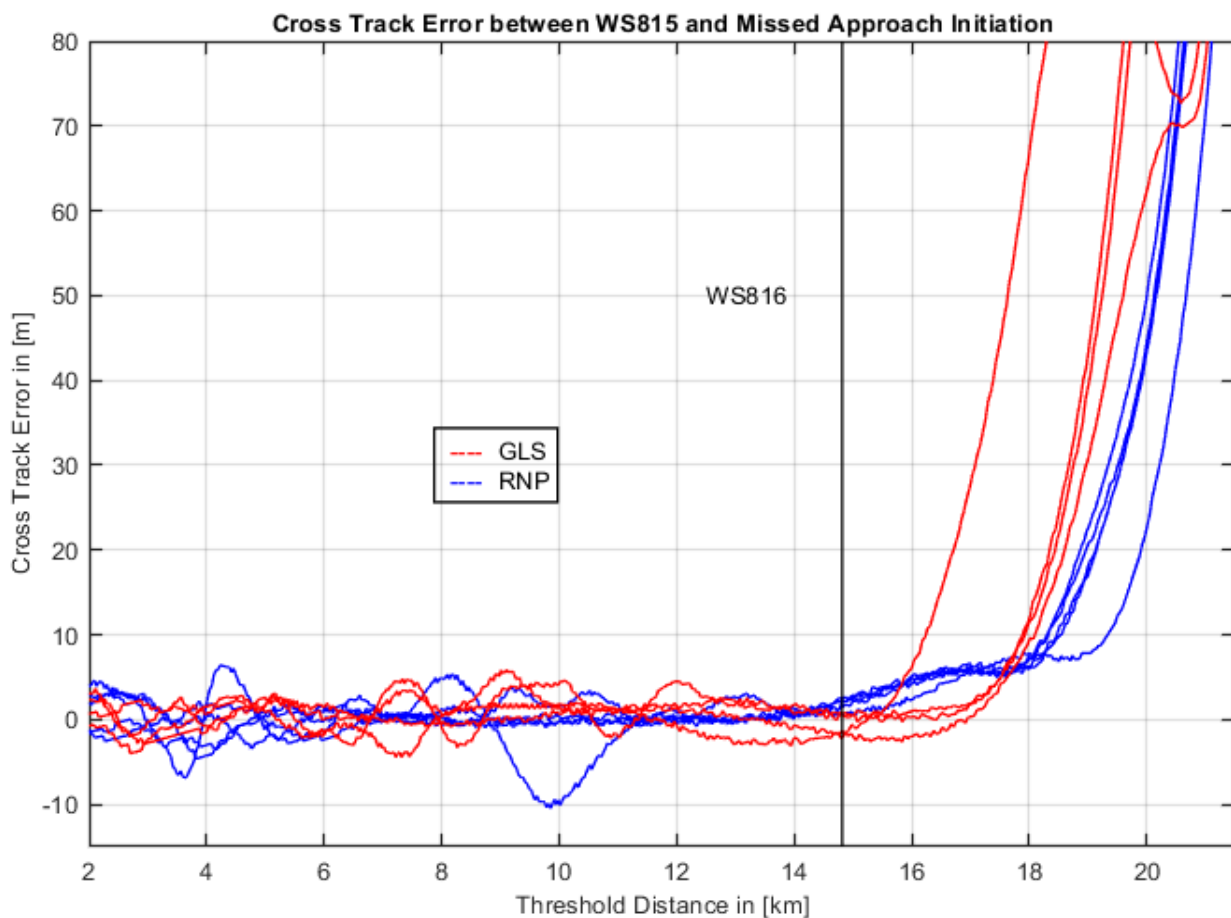


Abbildung 6: Cross Track Error während der Simulatorflüge zwischen den Wegpunkten WS815 und der Einleitung des Fehlanflugverfahrens.

Die Analyse der anderen Schenkel, der vertikalen Abweichung und der Geschwindigkeit ergab keinen Zusammenhang zwischen der Kartenvariante und der Art des Betriebs und der möglichen Abweichungen. Daher ist keine Option der anderen eindeutig überlegen, aber während des Abfangens führte die RNP-Variante zu weniger Überschwingen und zu einem kontinuierlichen Abfangen.

Fragebogen nach dem Flug

Nach dem letzten Anflug und dem letzten NASA-TLX-Fragebogen baten wir die Teilnehmer, den Post-Flight-Fragebogen auszufüllen. In diesem Fragebogen gaben alle Teilnehmer an, dass sie sich während der GLS-Variante des Anflugs wohler fühlten, wie in Abbildung 7 dargestellt. Die Werte sind bei den einzelnen Piloten sehr unterschiedlich. Ein Pilot bewertete seinen Komfort während der GLS-Variante mit etwa 90 auf einer Skala von 0-100 und während der RNP-Variante mit weniger als einem Drittel davon. Ein Pilot hingegen empfand bei beiden Varianten fast den gleichen Komfort mit einem Unterschied in der Bewertung von etwa 5.

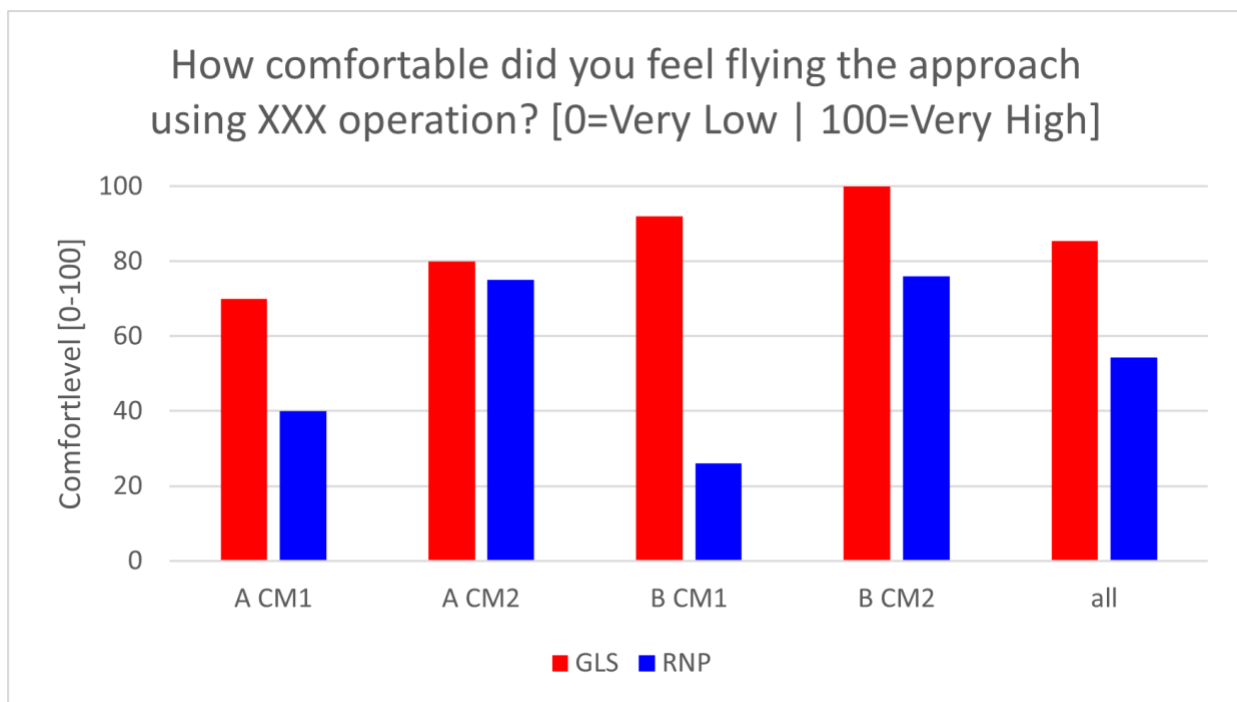


Abbildung 7: Persönlicher Komfort - Ergebnisse des Fragebogens nach dem Flug.

Bei der Frage, welche Variante fehleranfälliger ist, wählte die Hälfte der an der Studie teilnehmenden Piloten beide Varianten. Daher lässt sich aus den Antworten auf diese Frage kein Vorteil für eine der beiden Varianten ableiten. Die Ergebnisse zu den Fragen nach der



übersichtlicheren Darstellung und der persönlichen Präferenz der Teilnehmer fielen mit drei von vier und vier von vier sehr deutlich zugunsten der GLS-Variante aus.

Außerdem enthielt der Fragebogen nach dem Flug ein Feld für ein offenes Feedback der Teilnehmer. Dieses Feedback bezog sich auf die Art und Weise, wie die Abstimmung des GLS während der RNP-Version des Anflugs durchgeführt wurde. Die Teilnehmer kritisierten diese Art der Abstimmung und empfehlen sie nicht, da sie das Gefühl hervorruft, sich in einer nicht normalen Situation zu befinden. Die Ergebnisse dieses Fragebogens deuten darauf hin, dass die GLS-Variante die bessere Option für die Implementierung von GLASS ist, aber es ist möglich, dass die Ergebnisse stark durch das "nicht normale" Gefühl der Crews während des Backup-Tunings beeinflusst werden. Die Art der Abstimmung könnte den persönlichen Komfort während der Anflüge und damit die Präferenz der Teilnehmer stark beeinflussen.

9.6. NASA-TLX Fragebogen

Um die Arbeitsbelastung der Crews zu beurteilen, haben wir die von jedem Teilnehmer angegebenen TLX-Werte für die verschiedenen Varianten miteinander verglichen. Insgesamt variieren die gemeldeten Werte wieder sehr stark zwischen den einzelnen Piloten. Während ein Teilnehmer eine erfahrene Arbeitsbelastung von bis zu 67 von 100 angab, berichtete ein anderer Pilot einen Maximalwert von 22. Dieser Unterschied und die geringe Anzahl der Teilnehmer an der Studie führten zu der Entscheidung, keine Durchschnittsergebnisse zu verwenden, sondern die beiden Varianten für jeden Piloten einzeln zu vergleichen. Abbildung 8 zeigt die Ergebnisse des rohen NASA-TLX, der sich aus dem Mittelwert der Teilskalenberichte der einzelnen Teilnehmer errechnet.

Es ist zu erkennen, dass die RNP für alle PFs und zwei PMs eine höhere Arbeitsbelastung erzeugt, wovon eine für beide Varianten fast gleich ist. Auf der anderen Seite hatte nur ein Teilnehmer während der GLS als PM eine höhere Arbeitsbelastung. Auch wenn die Unterschiede in den Werten variieren, führte die RNP-Variante in den meisten Fällen zu einer höheren Arbeitsbelastung der Crew. Aufgrund eines Softwarefehlers gingen zwei Datensätze für die erste Crew verloren, so dass wir diese Daten nicht für den Vergleich verwenden konnten.

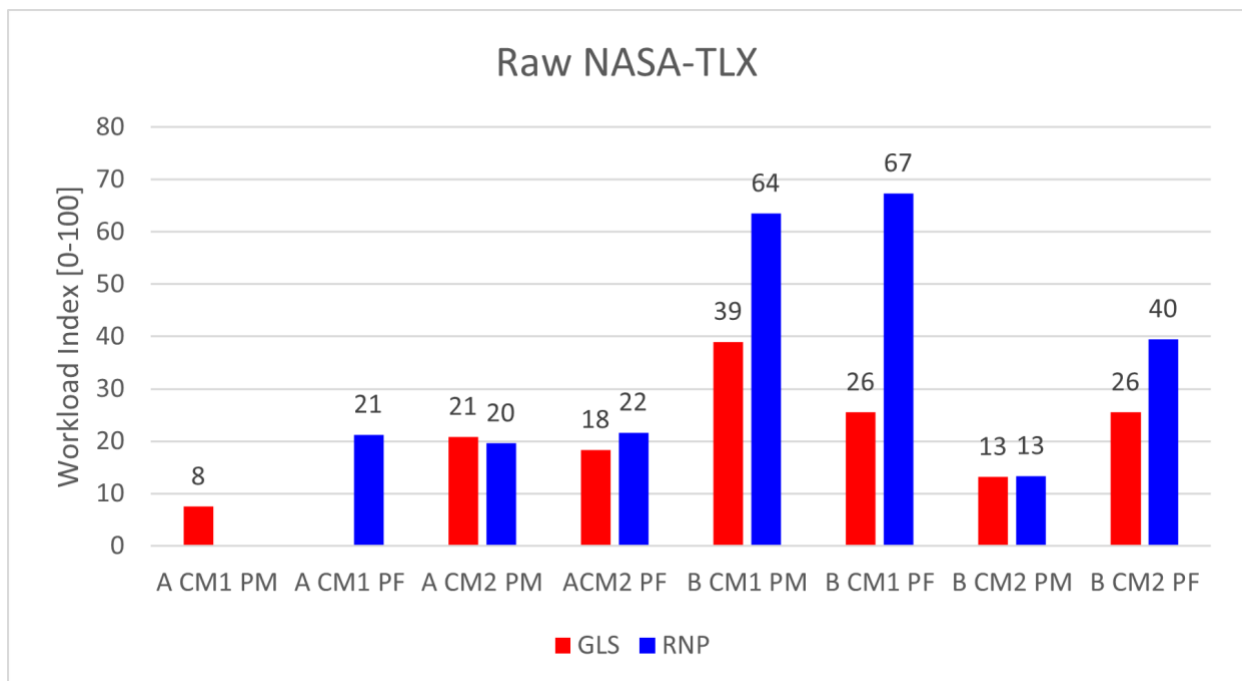


Abbildung 8: RAW NASA-TLX Ergebnisse für jedes Besatzungsmitglied in beiden Rollen.

Da die Ergebnisse des Fragebogens nach dem Flug auf einen starken Einfluss des "nicht-normalen" Gefühls hinweisen, haben wir die Subskalen "Mentale Anforderung" und "Frustrationsgrad" des NASA-TLX überprüft. Diese Subskalen wurden ausgewählt, weil wir



erwartet haben, dass der Stress, der aus der Tuning-Methode resultiert, prominent ist. Insbesondere die Werte für PF zeigen die erhöhte Arbeitsbelastung während der RNP-Variante für alle Piloten. Die Werte für die PM zeigen bei zwei Teilnehmern während der RNP-Variante größere Werte und bei einem Teilnehmer keinen Unterschied.

HAP 1 Schlussfolgerungen

Die Kritik der Teilnehmer im Fragebogen nach dem Flug deutet darauf hin, dass die GLS-Variante die bessere Option für eine Kartendarstellung von Anflügen mit GLASS ist. Dies wird auch durch die anderen Ergebnisse der Fragebögen untermauert. Sowohl der NASA-TLX-Fragebogen mit seiner geringeren Arbeitsbelastung während der GLS-Variante, als auch der Post-Flight-Fragebogen mit den subjektiven Meinungen der Teilnehmer weisen auf die Überlegenheit der GLS-Variante hin. Diese Übereinstimmung in beiden Fragebögen könnte eine Folge der ungewöhnlichen Abstimmung und der Gefühle sein, die die Piloten mit dieser ungewöhnlichen Technik verbinden. Es ist daher möglich, dass die Arbeitsbelastung in einem anderen Flugzeugtyp, bei dem keine Backup-Tuning-Funktion verwendet werden muss, anders empfunden würde.

Die objektive Spuranalyse hingegen zeigte keinen Vorteil der GLS. Während des Abfangens der GLS-Variante zeigten zwei Spuren eine nicht-kontinuierliche Abnahme des XTE. Außerdem war die Konvergenzgeschwindigkeit des Flugzeugs mit der endgültigen Anflugspur bei den GLS-Varianten schneller, was dazu führte, dass zwei der Anflüge die ideale Spurlinie überflogen. Andererseits war die Verringerung des Cross-Track-Fehlers während der RNP-Variante des Anflugs in allen Fällen kontinuierlich und es wurde keine Überschreitung festgestellt. Keine dieser Abweichungen war jedoch sicherheitskritisch.

Insgesamt zeigt diese Studie, dass eine separate GLS-Karte für Anflüge mit der GLASS-Technologie zu einer geringeren Arbeitsbelastung für die Flugbesatzung eines Airbus A320 führt. Dies ist auch die Option, die die Piloten für die neue Technologie bevorzugen und mit der sie sich am wohlsten fühlen. Wir haben auch festgestellt, dass abgesehen von den Auswirkungen der Abstimmungsmethode die Ergebnisse der Variante mit einer modifizierten RNP-Karte nicht wesentlich schlechter sind.

Da kein neuer Anflug von der nationalen Flugsicherungsorganisation (ANSP) erstellt und veröffentlicht werden muss, dürfte die RNP-Variante aus Sicht der ANSP schneller und einfacher umzusetzen sein. Für die Veröffentlichung als GLS-Anflug müsste für das FAS eine völlig neue Hindernisbeurteilung durchgeführt werden, wie es die PANS-OPS vorschreiben.

Die Flugbesatzung könnte auch geschult werden, einen Anflug vom Typ GLS aus der Datenbank zu laden, wenn sie einen GLASS RNP-Anflug durchführt. Für das Beispiel Salzburg



würde die Flugsicherung das Flugzeug für den RNP-E-Anflug freigeben. Die Flugbesatzung weiß aus dem Training, dass sie in diesem Fall den GLS-E laden muss, wenn sie das LPV-Minimum nutzen will. Wenn diese Technik angewandt wird, müssen die Sicherheitsauswirkungen der Diskrepanz zwischen den Anweisungen der Flugsicherung und dem Pilotenverfahren bewertet werden. Es würde zu einer geringeren Arbeitsbelastung im Cockpit führen, da keine Backup-Abstimmung erforderlich ist, erfordert aber eine maßgeschneiderte Datenbank für das FMS.

Wir empfehlen, dass nur speziell ausgebildete Piloten die RNP-Karte für Anflüge mit GLASS-Technologie in A320-Flugzeugen verwenden sollten, damit sie sich der unterschiedlichen Abstimmung und der höheren Aufgabenbelastung bewusst sind.

Es ist möglich, dass der Unterschied zwischen den Varianten deutlich geringer oder sogar nicht vorhanden ist, wenn ein anderer Flugzeugtyp für die Anflüge verwendet wird. Die Art und Weise der Abstimmung der erforderlichen Navigationshilfe unterscheidet sich zwischen den Herstellern und sogar zwischen verschiedenen Modellen. Außerdem kann die FMS-Berechnung der Kurven, die bei der GLS-Variante zu der höheren Abweichung führte, bei einem anderen Flugzeugtyp anders sein.

9.7. Danksagung

Wir danken dem Bundesministerium für Wirtschaft und Energie für die Finanzierung des GLASS-Industrietransferprojekts unter der Förderungsnummer 20Q1933C. Außerdem möchten wir Ferdinand Behrend von Lufthansa Aviation Training für die Bereitstellung des Datenextraktionsdienstes für den Full Flight Simulator danken. Vielen Dank auch an die Flugbesatzungen für ihre Teilnahme und ihr Feedback. Diese Arbeit wurde als Masterarbeit von Janes Biernatzki unter der Aufsicht von Prof. Dirk Kuegler durchgeführt.



Luffahrtforschungsprogramm VI
(Erster Aufruf 2020-2024)
Projektbeschreibung GLASS

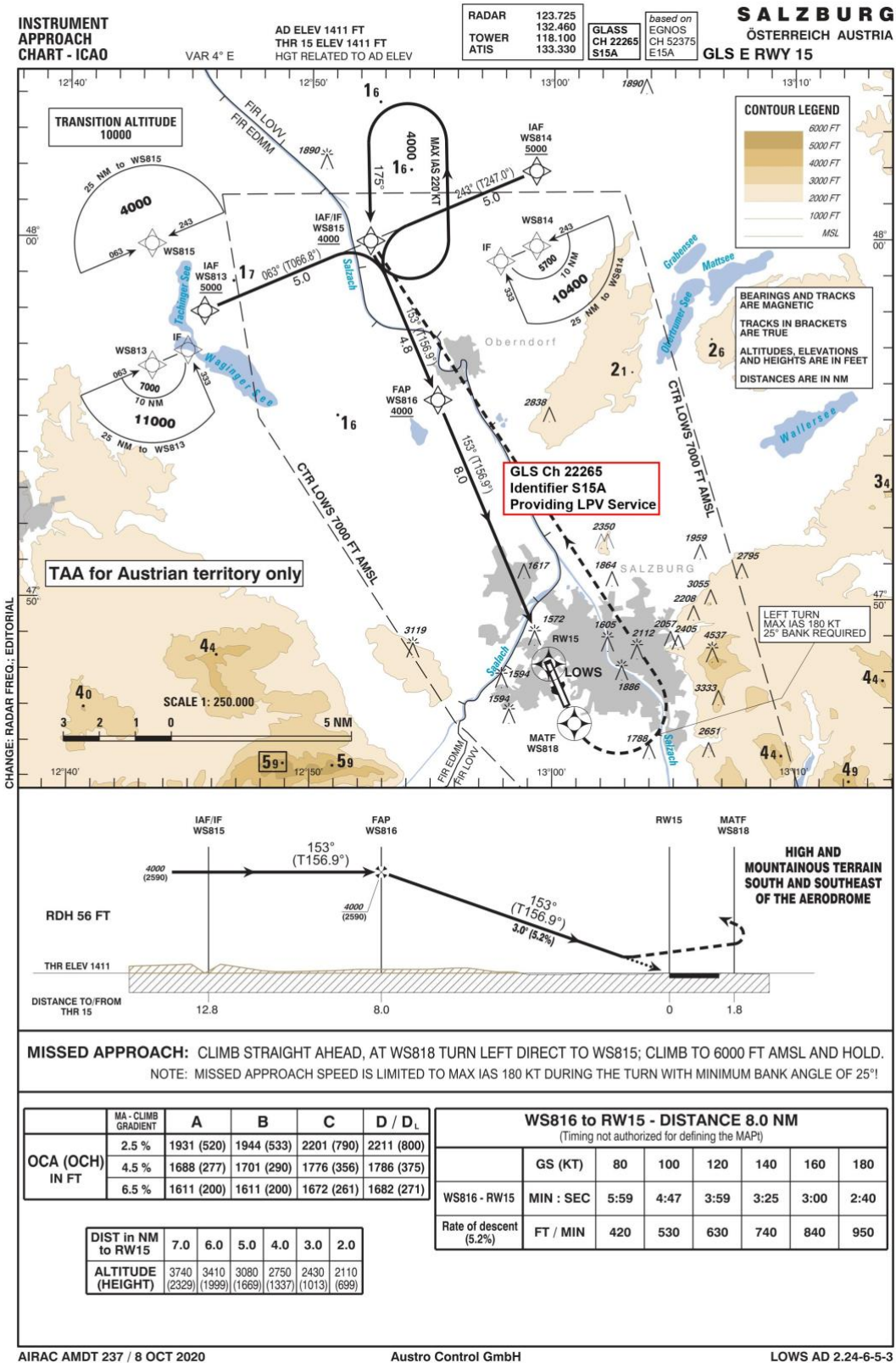


Figure 2: New GLS chart for GLASS operation to Salzburg adapted from AIP LOWS RNP E 15 chart

RNP-Variant

The second option is an RNP approach chart for GLASS operation. The difference between the published RNP E chart and ours is the remarks box next to the final on the drawing. It states that the LPV final is also provided via a GLS channel. The corresponding channel number and identifier are given in the remarks box.(Figure 3)



Luffahrtforschungsprogramm VI
(Erster Aufruf 2020-2024)
Projektbeschreibung GLASS

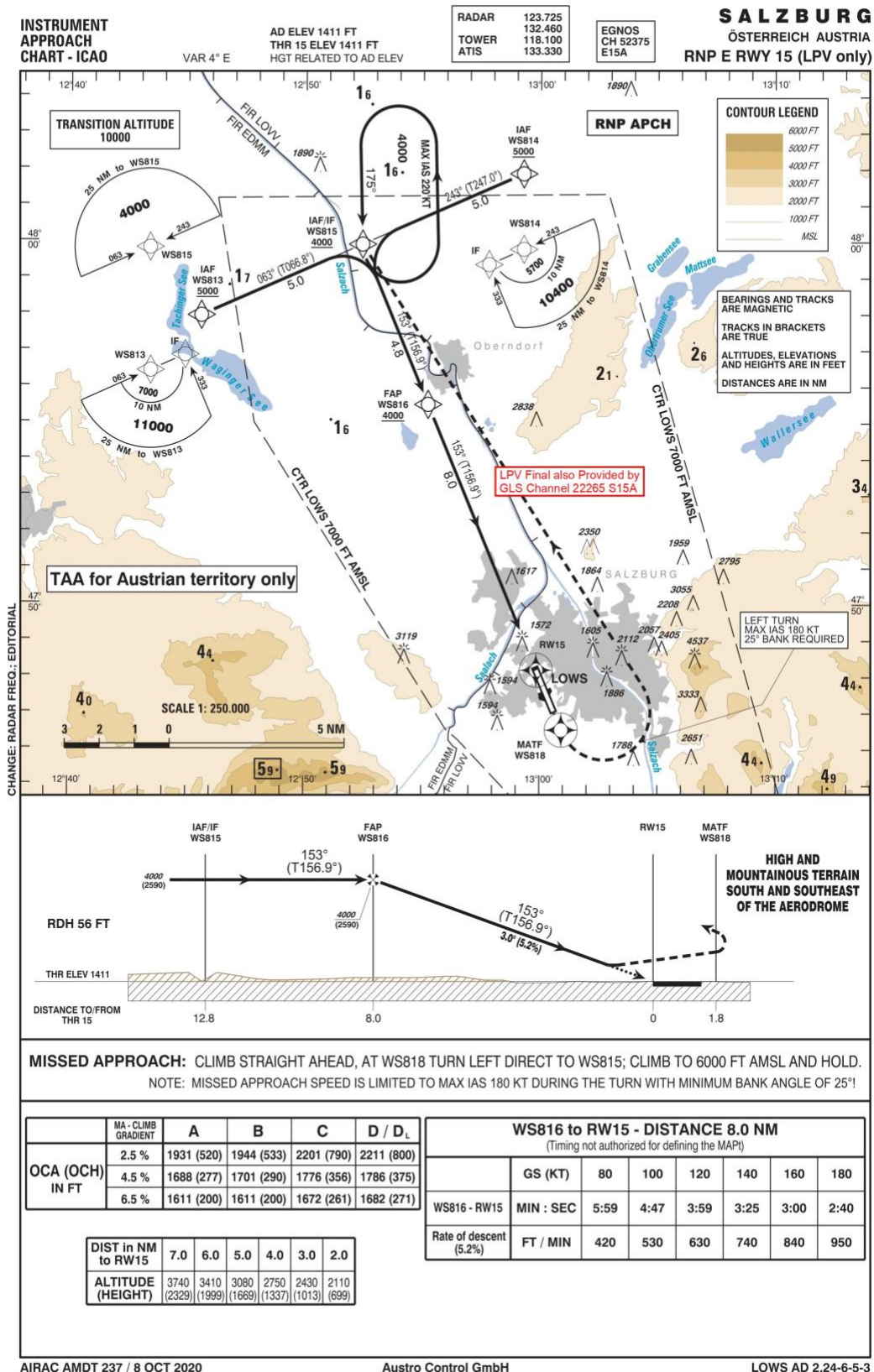


Figure 3: Adapted RNP-Chart for LOWS RNP E 15 including GLASS technology information.



Operation and Task Distribution

In order to be able to accommodate the GLASS concept, we adapted the standard operating procedures for an Airbus A320 aircraft to include the actions that are unique to the GLASS technology. We chose the A320, because it is one of the most common commercial transportation category aircraft and a A320 Full-Flight-Simulator with GLS capabilities allowing data extraction was available at Lufthansa Aviation Training .

Here, we present the crew task distribution for the two variants of GLASS usage. The tables in this chapter show the tasks the flight crew must perform when using GLASS in an A320. The tables start with the preparation of the approach and end at the minimum descent altitude, at which the pilots must decide whether to continue for landing or initiate the missed approach procedure.

Commercial transport airplanes such as the A320 are routinely flown by two pilots. Both can fly the aircraft and have the same controls options on their respective side. The tasks during flight are usually distributed to the pilot flying (PF) and the pilot monitoring (PM). The PF directly controls the flight path of the aircraft either manually, using the control interface, or by using the autopilot. The PM on the other hand performs the tasks that do not influence the path directly such as communication with air traffic control and reading of checklists. As both pilots are trained to perform both tasks, they usually change roles after each flight.

GLS

During an approach with a GLS approach chart the crew can use the standard GLS procedures that they learned during their training where the GLS is flown ILS look-a-like. The difference for the flight crews is very small compared to ILS, as the avionics of the aircraft displays GLS deviations the same way as ILS deviations and the system selects the correct settings when the approach is loaded in the Flight Management System (FMS).

The tasks the crew must perform for the approach are shown in chronological order in Table 1. Those tasks that are specific for the GLS approach are shown in bold and italic. Table 1 is divided in three parts, in order to highlight the three different situations during approach in which the listed tasks are performed.

Especially the verification of the correct channel number and identifier are important. The channel number is tuned automatically by the aircraft to allow the reception of the GLS signal. The identifier is part of that signal and displayed on the primary flight displays when received. By comparing the received identifier with the identifier shown on the chart the crew verifies that the desired signal is received.



Table 1: Task list for pilot flying and pilot monitoring during an approach using GLASS technology and GLS operation. ([13] derived from A320 Quick Reference Handbook [14])

Tasks for Pilot Flying	Tasks for Pilot Monitoring
DESCENT PREPARATION	
Prepare Nav Charts. Confirm Landing Performance Insert GLS approach in FMS Set GLS Minimum Check Landing Elevation Set Autobrake as Required Perform Approach Briefing Set Terrain on Navigation Display as Required Adjust Weather Radar as Required Set Cleared Altitude in Flight Control Unit	Obtain Weather and Landing Information Prepare Nav Charts Check Landing Performance Verify Correct Approach Set Set GLS Minimum Set Terrain on Navigation Display as Required Set Anti Ice System as Required Obtain Descent Clearance
DESCENT	
Monitor Descent Set and Crosscheck Barometric Reference when Cleared for an Altitude Press Landing System Button on EFIS Control Panel Complete Approach Checklist	Set and Crosscheck Barometric Reference when Cleared for an Altitude Check ECAM Status Switch on Landing Lights and Seat Belt Signs when Passing 10.000 ft Press Landing System Button on EFIS Control Panel Verify Correct Channel Number and Identifier Complete Approach Checklist
AIRCRAFT CONFIGURATION FOR APPROACH	
On Initial Approach Adjust Flight Plan Sequencing Approximately 15 NM before Touchdown Activate Approach Phase Check Managed Speed Monitor and Adjust Flight Path as Required Adjust Weather Radar as Required Press Approach Button on FCU Check LOC and GS Armed Call out LOC when Intercepting GLS LOC* Check Correct Lateral Intercept of Approach Callout GS when Intercepting GLS GS* Check Correct Vertical Intercept of Approach Set Go Around Altitude	Monitor Navigation Accuracy Readback Approach Clearance when Received Check Correct Lateral Intercept of Approach Check Correct Vertical Intercept of Approach



<p>At Green Dot Speed Order Flaps 1 Check S Speed Order Flaps 2 Minimum 2000ft AGL Check F Speed Order Landing Gear down when Flaps are 2</p>	<p>Select Flaps 1 when Ordered</p>
<p>Order Flaps 3 when Landing Gear is deployed</p>	<p>Select Flaps 2 when Ordered</p> <p>Select Landing Gear Lever Down when ordered Confirm Auto Brake Arm Ground Spoilers Set Exterior Lights Select Flaps 3 when ordered</p>
<p>Order Flaps FULL when Flaps are 3 Check Speed Target</p>	<p>Check ECAM Wheel Page Select Flaps FULL when ordered Check Auto Thrust on Speed Mode or Off Turn Wing Anti Ice System off if not Required</p>
<p>Stow Sliding Table</p>	<p>Stow Sliding Table Check Landing Memo no Blue on ECAM Display</p>
<p>Receive Cabin Report</p>	<p>Receive Cabin Report Advise Cabin Crew</p>
<p>Complete Landing Checklist Call Out any Flight Mode Annunciator Change Continue or Go Around at GLS Minimum</p>	<p>Complete Landing Checklist Monitor Flight Parameters Monitor One Hundred Above and Minimum call</p>

RNP-Variant

When flying the RNP variant of the approach, the pilots load the RNP approach from the FMS. Usually, the avionics of A320 aircraft selects and tunes the required navigation aids automatically. Since an RNP approach does not require any ground-based infrastructure, naturally the FMS does not automatically tune any specific navigation aid. Therefore, the system cannot tune the required GLS channel number and inbound course automatically in order to use the GLASS-GLS signal. Manual pilot input of the GLS channel into the FMS is displayed on the PFD but ignored by the flight guidance computer.

This leads to the largest difference in operation. The backup tuning function must be used to enable the reception and usage of the GLS signal in the flight guidance computer of A320 aircraft. The pilots must manually switch on backup tuning of the GLS on the COM/NAV panel on the center pedestal and select the correct channel number and inbound course on that panel during an approach using GLASS and a RNP approach loaded from the FMS. All differences in operation by the crew are shown in table Table 2.

Table 2: Task list for pilot flying and pilot monitoring during an approach using GLASS technology and RNP operation. ([13], derived from A320 Quick Reference Handbook [14])

Tasks for Pilot Flying	Tasks for Pilot Monitoring
DESCENT PREPARATION	Obtain Weather and Landing Information



Prepare Nav Charts.
Confirm Landing Performance
Insert RNP approach in FMS
Tune GLS Channel Number
Select Inbound Course
Set LPV Minimum
Check Landing Elevation
Continued as Shown in Table tbl. 3.1

Prepare Nav Charts
Check Landing Performance
Verify Correct Approach Set
Tune GLS Channel Number
Select Inbound Course
Set LPV Minimum

DESCENT

As shown in Table tbl. 3.1
Press Landing System Button

Press Landing System Button
Verify correct Channel Number and identifier

Complete Approach Checklist

Complete Approach Checklist

AIRCRAFT CONFIGURATION FOR APPROACH

As shown in Table tbl. 3.1
Press Approach Button on FCU
Check LOC and GS Armed
Call out LOC when Intercepting GLS LOC*
Check Correct Lateral Intercept of Approach
Callout GS when Intercepting GLS GS*
Check Correct Vertical Intercept of Approach
Set Go Around Altitude
As shown in Table tbl. 3.1
Call Out any Flight Mode Annunciator Change
Continue or Go Around at LPV Minimum

Check Correct Lateral Intercept of Approach

Check Correct Vertical Intercept of Approach

Monitor Flight Parameters

Monitor One Hundred Above and Minimum call

Simulator Study

To evaluate the different variants described above, we performed a simulator study in an Airbus 320 CAE7000XR type full-flight certified level D simulator. Aim of the study was to find the variant of representation and operation that produces the highest amount of safety. Safety plays the most important role in aviation but cannot be easily measured. To assess safety in the simulator, we recorded the flown tracks for later analysis and measured the task load of the flight crews [13].

For every published approach an obstacle assessment must be performed by the procedure designer before publication. Thus, the published track assures the obstacle and terrain clearance for approaching aircraft. For every segment of the approach a Cross-Track Tolerance (XTT) is considered during approach design. This XTT is 1.9 km during the initial and intermediate approach and reduces to 556 m on final approach during an RNP-LPV approach [15]. Naturally, the terrain clearance cannot be guaranteed when deviating further



than this from the published track. Therefore, the pilot and aircraft must maintain the deviation from the desired track as small a possible.

The cross track error is influenced by several factors. The largest effects come from pilot and autopilot input whilst these inputs are influenced by different factors themselves. The autopilot inputs are mostly influenced by the input signals such as the deviation from the desired track that is calculated inside the aircraft's Multi-Mode Receiver (MMR). Whether the autopilot follows that signal also depends on the active mode and loaded path in the FMS. As these differ between the RNP and GLS variant, the cross track deviation may differ. Another reason for differing deviations is the pilots' inputs to control the modes of the autopilot. Lastly, because the operating procedures for the flight crew differ between the two variants, different cross track errors behavior might result.

In addition to the deviation from the ideal track, the crew workload is a factor that influences safety. Optimal performance of flight crews can be achieved with tasks that do not overwhelm, but also do not underchallenge [16]. Since the workload during a standard approach is enough to assure the crew is not underchallenged [17], the focus lies on not overwhelming the crews during the approaches with the operations considered in this manuscript. Consequently, a low task load is desired.

The study was performed with two professional flight crews. We restricted ourselves to booking one simulator slot lasting four hours, resulting in two hours per crew of two pilots. Due to the hygienic and social distancing regulations during the pandemic situation in fall 2020, when the study took place, this was also the maximum allowable traffic load of the simulator facility. Hence, no statistical significance test could be run on the data collected. Other simulator studies to similar topics but utilizing statistical analysis used a minimum of 13-26 pilots as test subjects [18][19][20].

Three of the test subjects possessed an Airline Transport Pilot Licence (ATPL) and one held a Multi-Crew Pilot Licence (MPL). Flight experience ranged from 1500 flight hours to the most experienced pilot with 16,000 hours.

Figure 4 shows the course of the simulator study. Before entering the simulator, the crews were briefed on the GLASS technology and the tuning of the back-up navigation panel during the RNP approaches. During the flights we stayed as close to real world training scenarios as possible. The flight of each crew started with a standard instrument departure followed by several approaches. Each pilot flew both variants as PF and PM resulting in a total of 4 approaches per crew.

Pilots were free to use the autopilot, as they would during flight in a real aircraft for their airline. All pilots kept the autopilot on until some point on the final. A former DFS air traffic controller handled the tasks of the air traffic control officers.

During the approaches we recorded the track and altitude for later analysis. Additionally, the participants were asked to fill in questionnaires to assess their workload and preferences.

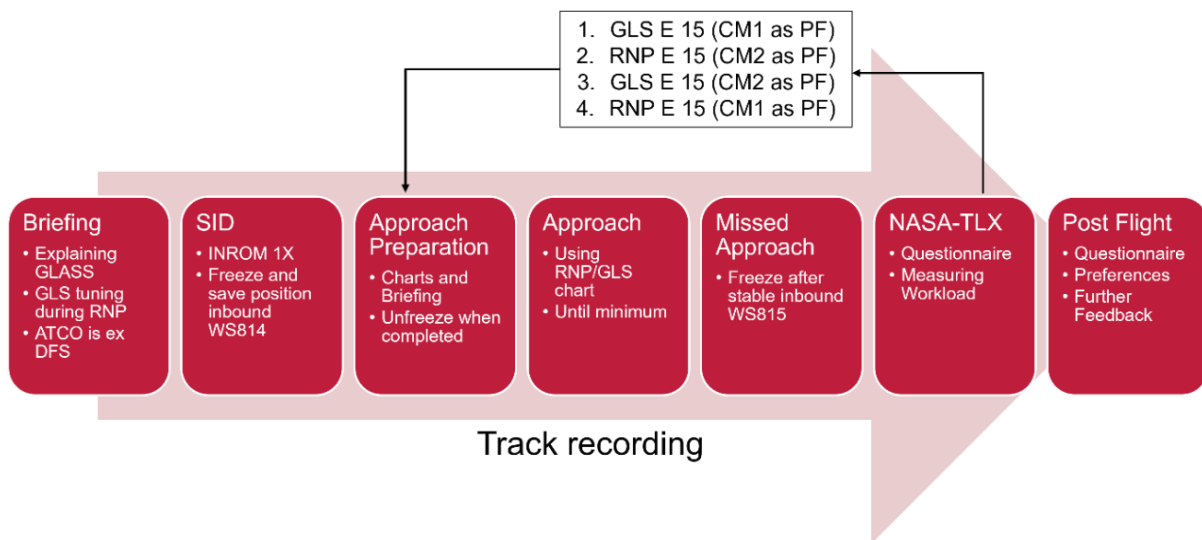


Figure 4: Sequence of events during the simulator study.

Questionnaires

In the study we used two types of questionnaires to evaluate the approach variants, NASA Task Load Index (NASA-TLX) and a customized satisfaction survey. NASA-TLX is a multi-dimensional scale designed to obtain workload estimates. It consists of six subscales on which the participants rate their experience during the task. This procedure was developed by [21]. The six subscales are also described there. The results of the six subscales can be weighted using the procedure originally published with the NASA-TLX to account for the individual perception of workload. Here, we were only interested in overall task load and we chose hence to not perform any weighting on the results[22]. Each pilot completed one NASA TLX questionnaire after each individual approach was completed to assess workload for the different variants.

The second questionnaire was filled by the participants after the simulator session was completed. Here, we asked the participants for their personal comfort during the different approach variants and their opinion on which version is more prone to error and which option, in their opinion, has the clearer presentation. Additionally, we inquired which version the participants would prefer for an operational implementation. The personal comfort was rated on a 0-100 scale and with each of the other questions the participants could choose between the options GLS and RNP. As a third option, 'No Difference' was added in case the participants

could not detect differences. Additionally, the post flight questionnaire had fields for open feedback by the participants.

9.8. Performance Data Results

Figure 5 shows the trajectories flown during the simulator study. The GLS approaches that commence at a higher and lower altitude than the others are a result of miscommunication. The first crew was not aware that they were responsible for the descent planning. When this was detected and the crew was informed about their own responsibility, they immediately initiated a descent. Even though they were on a higher profile compared to the other approaches, they rightfully felt confident to reach the required altitudes. The second crew was told about their own responsibility to plan the descent and as a result were very cautious. That lead to one approach that was lower than the others. Apart from that no other large-scale differences could be found in the trajectories.

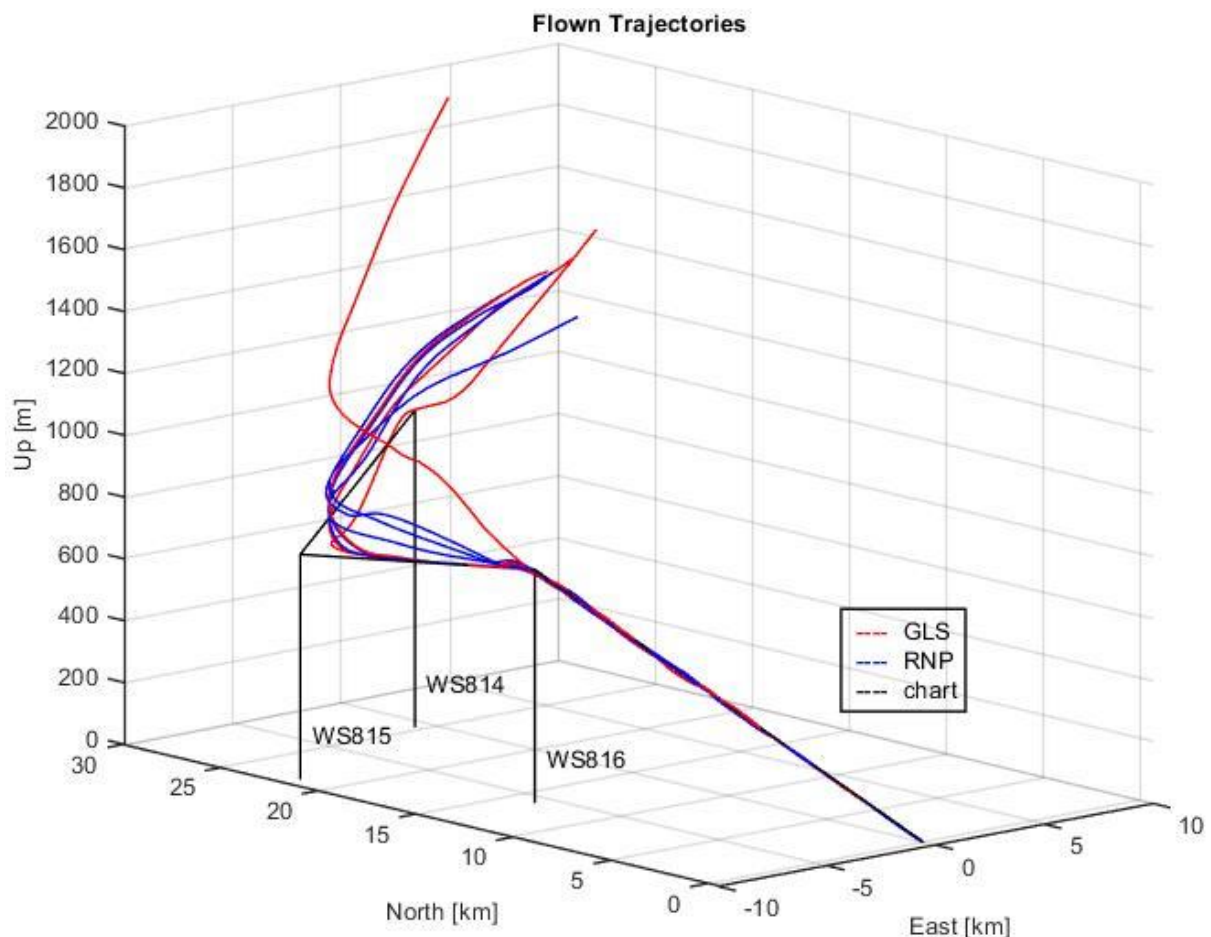


Figure 5.1: Trajectories flown during the simulator study. Blue trajectories were flown using the RNP variant. Red shows the approaches flown with the GLS chart.



Figure 5 indicates the lateral deviation from the line connecting the waypoints WS815, WS816 and the runway threshold. The X-axis shows the distance from the runway threshold in kilometers. It starts at 2 km, because the crews initiated a missed approach procedure when reaching the decision altitude approximately 2.2 km from the runway. The deviation during the missed approach procedure was not part of our study. At 14.3 km a black vertical line shows the location of WS816 with respect to the runway. Deviations in flight direction to the right are shown as negative deviations. Positive values on the y-axis indicate a deviation to the left of the ideal track.

The large deviation on the far side of WS816 is a result of the fly-by waypoint WS815. At such waypoints, the aircraft shall turn before reaching the point to intercept the track towards the following waypoint. The aircraft's FMS calculates the turn and commands the autopilot or flight director to fly it.

In Figure 6 the deviations during the RNP variant are shown in blue, while those during approaches with the GLS variant are shown in red. Using the RNP variant, the deviation after the turn reduces quickly to approximately 7 m. After that it takes about 5 km to reduce the deviation to almost zero. No overshoot was recorded during the RNP variants.

The resulting turns during the GLS variant do not show such a uniform picture. During two of those approaches the deviation was diminishing slower than during the RNP variants, but continuously down to zero and stayed there. In the other two instances the deviation does not decrease continuously but stagnates respectively increases slightly, before decreasing again and intercepting the ideal track. During two approaches using GLS operation an overshoot was recorded.

We could not determine the reason for the different behavior using GLS operation beyond doubt, but it is assumed, that the FMS calculation of the turn is responsible. Additionally, we recorded the speed during the approach and use it for explanation of this behavior. We can explain the slight increase in deviation in such a way, that the deceleration was happening at that time resulting in a bank angle that is too large for the speed, as the turn was calculated with the speed prior the initiation of the turn. The FMS then detects the deviation and corrects for it. It could not be verified that this behavior is responsible for that increase, because the exact algorithms used by the FMS are not publicly available.

Another possible explanation is, that during a GLS approach the FMS expects to follow the localizer deviation after the intercept course and therefore does not anticipate the turn once the aircraft is on the intercept course. During an RNP approach the FMS calculates and directs the turn to final just as any other turn. When on localizer intercept course, the corresponding intercept mode (LOC*) takes over without the plane anticipating a turn.

After the intercept of the desired track, one approach using the RNP variant deviates 10 m to the right of the course. This deviation is likely caused by manual flying of the respective pilot. Apart from that we found no differences between the variants after the intercept. Since the autoflight system is in the same mode (LOC GS) at this stage and the crews' tasks also do not differ, no significant difference was expected during this phase. During an GLS approach the maximum lateral deviation an aircraft may have at the minimum of 356 ft height, while still having the full vertical tolerances, is 58 m [15]. This is the point with the lowest XTE tolerance. The recorded values of up to 10 m in 10 km distance are well below that limit.

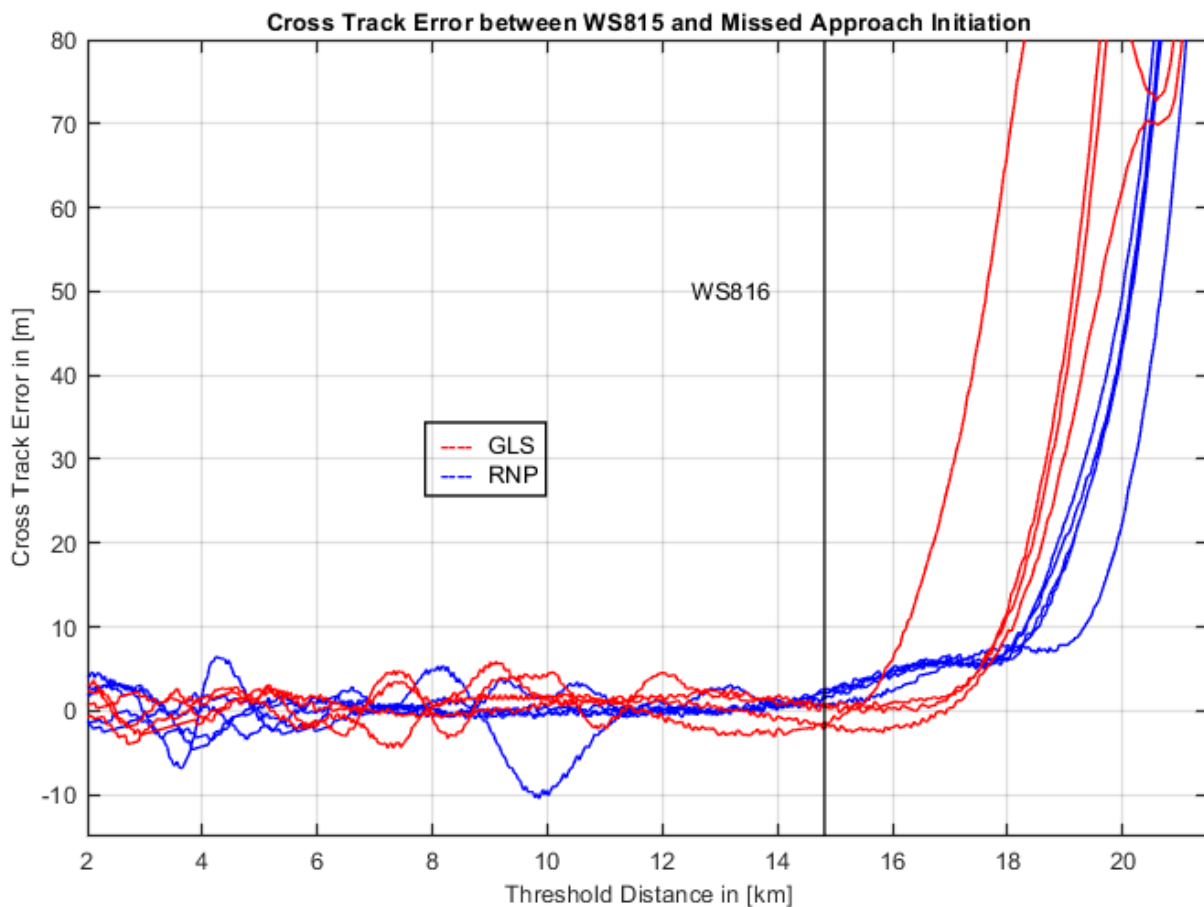


Figure 6: Cross Track Error during the simulator flights between waypoints WS815 and the initiation of the missed approach procedure.

Analysis of the other legs, the vertical deviation, and speed revealed no connection between the variant of chart with its type of operation and possible deviations. Therefore, no option is clearly superior to the other, but during the intercept the RNP variant led to less overshoot and to a continuous intercept.

9.9. Post Flight Questionnaire

After the last approach and the last NASA-TLX questionnaire, we asked the participants to fill in the post-flight questionnaire. In this questionnaire all participants revealed that they felt more comfortable during the GLS variant of the approach as shown in Figure 7. The values differ a lot between the individual pilots. One pilot rated his comfort during the GLS variant with about 90 on a scale of 0-100 and during the RNP variant less than a third of that. One pilot on the other hand felt almost the same comfort during both variants with a difference in rating of about 5.

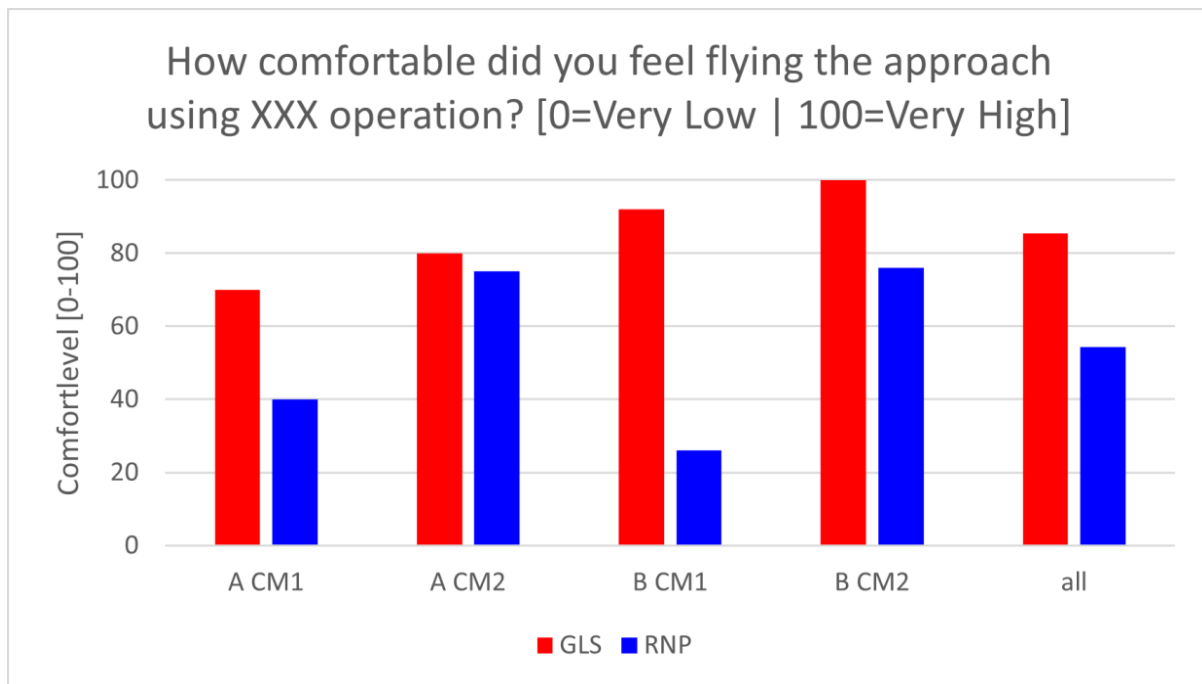


Figure 7: Personal comfort results from the Post Flight questionnaire.

With respect to the question which variant is more prone to error, half of the pilots taking part in the study chose either option. Therefore, no advantage for either option can be determined from the answers to this question. With three out of four and four out of four the results to the questions for the clearer presentation and the personal preference of the participants were very much in favor of the GLS variant.

Additionally, the post-flight questionnaire had a field for open feedback by the participants. This feedback was focused on the way the tuning of the GLS was performed during the RNP version of the approach. The participants criticized this way of tuning and don't recommend it, as it induces the feeling of being in a non-normal situation. The results from this questionnaire indicate, that the GLS variant is the better option for the implementation of GLASS, but it is possible that the results are strongly influenced by the "non-normal" feeling of the crews during

the backup tuning. The way of tuning could influence the personal comfort during the approaches and therefore the preference of the participants greatly.

9.10. NASA-TLX Questionnaire

To assess the workload which the crews experienced, we compared the reported TLX values of every participant for the different variants to each other. Overall, the reported values again vary a lot between the individual pilots. While one participant reported an experienced workload of up to 67 out of 100 another pilot reported a maximum value of 22. That difference and the small number of participants in the study lead to the decision to not use average results but compare the two variants for every pilot individually. Figure. 8 shows the results of the raw NASA-TLX that is calculated by averaging the subscale reports of the individual participants.

It can be seen that the RNP generates higher workloads for all PFs and two PMs, whereof one is almost the same for both variants. On the other hand, only one participant experienced a higher workload during the GLS as PM. Even though the differences in the values vary, in most cases the RNP variant resulted in higher crew workload. Due to a software glitch, two datasets for the first crew were lost, therefore we could not use that data for comparison.

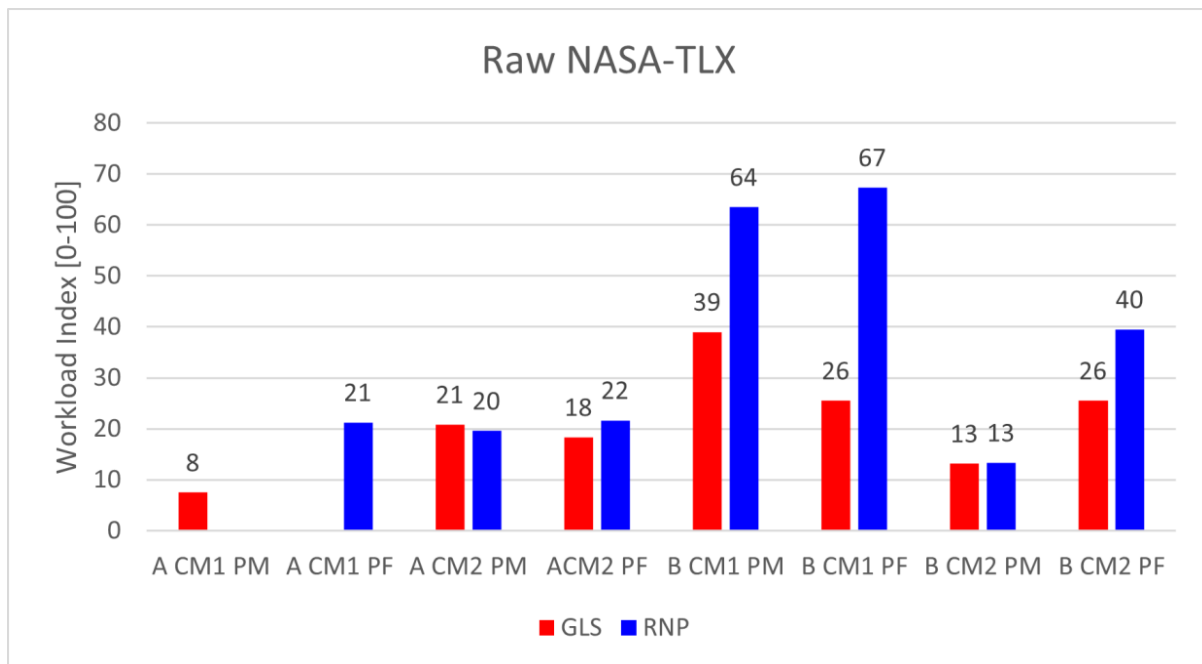


Figure 8: RAW NASA-TLX results for each crew member in both roles.

Since the results of the post flight questionnaire indicate a strong influence of the “non-normal” feeling, we checked the subscales “Mental Demand” and “Frustration Level” of the NASA-TLX. These subscales were chosen, because we expected that the stress resulting from the tuning method is prominent. Especially the values for PF show the increased workload during the



RNP variant for all pilots. The values for the PM show larger values for two participants during the RNP variant and no difference for one.

Conclusions

The criticism of the participants in the post flight questionnaire indicate that the GLS variant is the better option for a chart representation of approaches using GLASS. This is further substantiated by the other results of the questionnaires. The NASA-TLX questionnaire with its lower workload during the GLS variant, as well as the post flight questionnaire with the subjective opinions of the participants indicate the superiority of the GLS variant. This agreement in both questionnaires could be a result of the unusual tuning and the feelings pilots associate with this unusual technique. It is therefore possible, that the workload would be felt differently in another airplane type, in which no backup tuning function must be used.

The objective track analysis on the other hand did not show any advantage of the GLS. During the intercept of the GLS variant two tracks showed a non-continuous decrease of the XTE. Additionally, the aircraft speed of convergence with the final approach track was faster during the GLS variants, leading to two of the approaches overshooting the ideal track line. On the other hand, the reduction of the cross-track error during the RNP variant of the approach was in all cases continuous and no overshoot was recorded. However, non of these deviations were safety critical.

Overall, this study shows that a separate GLS chart for approaches using the GLASS technology results in less workload for the flight crew of an Airbus A320. This is also the option pilots prefer for the new technology and the option they feel more comfortable using. We also found that apart from the effects of the tuning method, the results of the variant using a modified RNP chart are not significantly worse.

As no new approach would have to be generated and published by the national Air Navigation Service Provider (ANSP), the RNP variant is expected to be quicker and easier in implementation from a ANSP perspective. For the publication as GLS approach, a completely new obstacle assessment would need to be performed for the FAS as required by PANS-OPS.

The flight crew could also be trained to load a GLS type approach from the database when performing GLASS RNP approach. For the Salzburg example, air traffic control would clear the aircraft for the RNP-E approach. The flight crew knows from training, that in this case they need to load the GLS-E if they want to make use of the LPV minimum. If this technique is used, the safety impact of the mismatch between ATC instructions and pilot procedure must be assessed. It would lead to a lower cockpit workload, since no backup tuning is required, but necessitates a tailored database for the FMS.



Our recommendation is that only specially trained pilots should use the RNP chart for approaches using GLASS technology in A320 aircraft, so they are aware of the different tuning and higher taskload.

It is possible that the difference between the variants is significantly lower or even non-existent when another type of aircraft is used to fly the approaches. The way of tuning the required navigation aid differs between the manufacturers and even between different models. Additionally, the FMS calculation of turns that resulted in the higher deviation during the GLS variant may differ in another aircraft type.

9.11. Acknowledgements

We would like to thank the German Ministry for Economic Affairs and Energy for funding the GLASS industry transfer project under grant number 20Q1933C. Furthermore, we would like to acknowledge Ferdinand Behrend from Lufthansa Aviation Training for providing the data extraction service for the full flight simulator. Many thanks also to the flight crews for their participation and feedback. This work was conducted as Janes Biernatzki's master's thesis under the supervision of Prof. Dirk Kuegler.

9.12. References

- [1] "Performance-based navigation (PBN) manual." International Civil Aviation Organization; ICAO, Montreal, 2008.
- [2] T. Dautermann, "Civil air navigation using {gnss} enhanced by wide area satellite based augmentation systems," *Progress in Aerospace Sciences*, vol. 67, no. 0, pp. 51–62, 2014, doi: 10.1016/j.paerosci.2014.01.003.
- [3] T. Dautermann, M. Felux, and A. Grosch, "Approach service type D evaluation of the DLR GBAS testbed," *GPS Solutions*, vol. 16, no. 3, pp. 375–387, 2012, doi: 10.1007/s10291-011-0239-3.
- [4] T. Dautermann, "Civil air navigation using gnss enhanced by wide area satellite based augmentation systems," *Progress in Aerospace Sciences*, vol. 67, pp. 51–62, 2014, doi: 10.1016/j.paerosci.2014.01.003.
- [5] M. Felux, T. Dautermann, and H. Becker, "GBAS landing system – precision approach guidance after ILS," *Aircraft Engineering and Aerospace Technology*, vol. 85, no. 5, pp. 382–388, Jan. 2013, doi: 10.1108/AEAT-07-2012-0115.
- [6] T. Dautermann, T. Ludwig, R. Geister, L. Ehmke, and M. Fermor, Eds., *GLS approaches using sbas: A sbas to gbas converter*. 2019. Available:



http://www.atmseminarus.org/seminarContent/seminar13/papers/ATM_Seminar_2019_paper_1.pdf

- [7] Radio Technical Commission for Aeronautics, “GNSS-based precision approach local area augmentation system (laas) signal-in-space interference control document (icd).”
- [8] International Civil Aviation Organization, “Annex 10, aeronautical telecommunications, volume 1 (radio navigation aids), seventh edition, published july 2018, effective 8 november 2018,” 2018.
- [9] G. K. Crosby et al., “A ground-based regional augmentation system (gras)-the australian proposal,” in Proceedings of the 13th international technical meeting of the satellite division of the institute of navigation (ion gps 2000), 2000, pp. 713–721.
- [10] T. Dautermann, T. Ludwig, R. Geister, and E. Akkogiounoglou, “Benefits for greek regional airports through innovative approach technology using an lpv to gls converter: A case study for corfu and thessaloniki,” IEEE Aerospace and Electronic Systems Magazine, vol. 36, no. 4, pp. 36–44, 2021, doi: 10.1109/MAES.2021.3050678.
- [11] T. Dautermann, T. Ludwig, R. Geister, and L. Ehmke, “Extending access to localizer performance with vertical guidance approaches by means of an sbas to gbas converter,” GPS Solutions, vol. 24, no. 2, p. 37, 2020, Available: <https://link.springer.com/article/10.1007/s10291-019-0947-7>
- [12] International Civil Aviation Organization, “Annex 15 to the convention on international civil aviation aeronautical information services,” 2013, Available: <https://www.icao.int/NACC/Documents/Meetings/2014/ECARAIM/REF05-Annex15.pdf>
- [13] J. J. Biernatzki, “Operational Concept Development and Evaluation of Pilots Acceptance of the GLASS SBAS to GLS Converter,” MS thesis, Technische Universität Braunschweig, 2021.
- [14] AIRBUS S.A.S, “DLR a318/a319/a320/a321 quick reference handbook.” 2017.
- [15] International Civil Aviation Organization, “Doc 8168 Procedures for Air Navigation Services Aircraft Operations Volume II Construction of Visual and Instrument Flight Procedures.” 2020.
- [16] D. de Waard, The measurement of drivers’ mental workload. Haren, the Netherlands: Groningen University, Traffic Research Center, 1996.
- [17] A. Alaimo, A. Esposito, C. Orlando, and A. Simoncini, “Aircraft pilots workload analysis: Heart rate variability objective measures and nasa-task load index subjective evaluation,” Aerospace, vol. 7, no. 9, p. 137, 2020.



- [18] M. G. Mykityshyn, J. K. Kuchar, and R. J. Hansman, "Experimental study of electronically based instrument approach plates," *The International Journal of Aviation Psychology*, vol. 4, no. 2, pp. 141–166, 1994, doi: 10.1207/s15327108ijap0402_3.
- [19] M. Yeh, J. Jaworski, and S. Chase, "Pilot perceptions on the integration of electronic flight bag information in new flight deck designs," *Proceedings of the Human Factors and Ergonomics Society Annual Meeting*, vol. 63, no. 1, pp. 91–95, 2019, doi: 10.1177/1071181319631335.
- [20] N. C. M. van Zon, C. Borst, D. M. Pool, and M. M. van Paassen, "Touchscreens for Aircraft Navigation Tasks: Comparing Accuracy and Throughput of Three Flight Deck Interfaces Using Fitts' Law," *Human Factors*, vol. 62, no. 6, pp. 897–908, 2020, doi: 10.1177/0018720819862146.
- [21] S. G. Hart, "NASA task load index (tlx): Paper and pencil package." NASA, Mofett Field California, 1986.
- [22] S. G. Hart, "Nasa-task load index (nasa-tlx); 20 years later," *Proceedings of the Human Factors and Ergonomics Society Annual Meeting*, vol. 50, no. 9, pp. 904–908, 2006, doi: 10.1177/154193120605000909.

Ein operationelles Konzept zum Fliegen von GLS-Ansätzen mit satellitengestützten Augmentierungssystemen

9.13. Abstrakt

Eine neue Konvertertechnologie ermöglicht es entsprechend ausgerüsteten Flugzeugen, die Daten des satellitengestützten Augmentierungssystems in Empfängern zu nutzen, die ursprünglich für das bodengestützte Augmentierungslandesystem entwickelt wurden. Für diese Flugzeuge ermöglicht dieses System eine niedrigere Entscheidungshöhe und damit einen besseren Zugang zu Flughäfen. Um diese Technologie nutzbar zu machen, benötigen die Flugzeugbesatzungen ein Betriebskonzept und die Flugbesatzung muss mit den entsprechenden Informationen in Form von Anflugkarten versorgt werden. Es wurden zwei verschiedene Möglichkeiten für ein Betriebskonzept entwickelt und die entsprechenden Anflugkarten erstellt. Eine Möglichkeit ist eine modifizierte Anflugkarte für die Flächennavigation, der die spezifischen Informationen hinzugefügt werden. Die andere Karte ist ein völlig separates Verfahren für den Anflug. Diese beiden Optionen wurden mit Airline-Piloten in einem Airbus A320 Full Flight Training-Simulator getestet. Während der Simulatorflüge wurden die Leistungsdaten des Flugzeugs aufgezeichnet und die Teilnehmer füllten Fragebögen zur Arbeitsbelastung und Qualität des Betriebskonzepts aus. Die Ergebnisse zeigen ein unterschiedliches Verhalten während des Abfangens des Endkurses,



aber alle Anflüge blieben innerhalb der geforderten Grenzen. Die Fragebögen ergaben, dass die Arbeitsbelastung bei der Variante der Flächennavigation höher ist und dass alle Teilnehmer die Variante des separaten bodengestützten Erweiterunglandesystems bevorzugen.

9.14. Einführung

Heutzutage basieren die meisten Instrumentenanflugverfahren zur Landung auf Flughäfen, die in der kommerziellen Luftfahrt geflogen werden, auf dem Instrumentenlandesystem (ILS). Auf Flugplätzen, für die keine ILS-Anflüge verfügbar sind, werden von globalen Navigationssatellitensystemen (GNSS) abgeleitete Positionsdaten verwendet, um RNP-Anflüge (Required Navigation Performance) zu fliegen, die auf Flächennavigation basieren. Um die Genauigkeit und Integrität zu verbessern, können GNSS wie das Global Positioning System (GPS) durch ein satellitengestütztes Erweiterungssystem (SBAS) oder ein bodengestütztes Erweiterungssystem (GBAS)[1] ergänzt werden. Diese Systeme bieten zusätzliche Integrität sowie eine höhere Genauigkeit und Kontinuität im Vergleich zu einem eigenständigen GPS-System (siehe z.B. [2], [3] und die darin enthaltenen Referenzen).

Ein SBAS besteht aus mehreren Bodenstationen, die über einen ganzen Kontinent verteilt sind, einer oder mehreren Hauptkontrollstationen, die die Korrektur- und Integritätsinformationen berechnen, sowie mindestens einem Satelliten in einer geostationären Umlaufbahn. Die Informationen werden auf der zivilen GPS-Frequenz über einen Transponder auf dem geostationären Satelliten an den Nutzer übertragen. In Flugzeugen ermöglicht der Empfang des Signals Localizer Performance with Vertical guidance (LPV) Endanflugsegmente und ihre entsprechenden Entscheidungshöhen. Bei diesen Höhen muss der Pilot die Landebahn visuell erkennen oder andernfalls das Fehlanflugverfahren einleiten [4]. Für diese Art der Anflugführung werden die Daten des Endanflugsegments (FAS) in der Navigationsdatenbank des Flugzeugs gespeichert. Wenn LPV verfügbar ist, ist die entsprechende Entscheidungshöhe in der Regel die niedrigste unter allen für diese Anflüge verfügbaren Minima. Leider kann das LPV-Endanflugsegment nur von sehr wenigen Verkehrsflugzeugen geflogen werden (zum Zeitpunkt des Verfassens dieses Artikels nur von der A350 und der A220), da die erforderliche Ausrüstung in der Regel nicht für andere mittlere oder schwere Verkehrsflugzeuge zugelassen ist.

Ein GBAS besteht aus drei bis vier GPS-Empfängern, einer Hauptstation und einem UKW-Sender, der sich auf dem Flugplatz befindet. Wie bei SBAS berechnet die Hauptstation die Korrektur- und Integritätsinformationen und stellt sie dem Nutzer zur Verfügung, diesmal mit einer UKW-Datenübertragung vom Boden aus. Diese Datenübertragung enthält bis zu 49 FAS-Datenblöcke. Wenn ein Flugzeug diese Technologie zur Landung nutzt, muss es GBAS-



Landesysteme (GLS) anfliegen. Obwohl viele Verkehrsflugzeuge mit GLS-Empfängern ausgestattet sind, um diese Anflüge zu fliegen, sind sie aufgrund der hohen Kosten für eine GBAS-Installation auf Flugplätzen nicht weit verbreitet. [5].

Dautermann et al. [6] haben ein System entwickelt, das die Vorteile der beiden verschiedenen Augmentierungssysteme kombiniert und gleichzeitig die meisten Nachteile eliminiert. Das GLS Approach using SBAS (GLASS) System besteht aus einer Bodenstation, einem Empfänger für das SBAS-Signal und einem VDB-Sender für das GLS-Signal (siehe auch Abbildung 1). Die empfangenen SBAS-Informationen werden mit den lokal gespeicherten FAS-Daten kombiniert, um ein GBAS Approach Service Type A (GAST-A) Signal zu erzeugen [7]. Daher können mit GLS ausgestattete Flugzeuge das LPV-Endanflugsegment von RNP-Anflügen fliegen. Dieses System könnte auf Flugplätzen mit begrenzter Installationsfläche oder Investitionsbeschränkungen eingesetzt werden, die die Installation eines Standard-GLS verhindern, das den mit einem ILS vergleichbaren GAST-C-Dienst bietet.

Der von GLASS angebotene Dienst entspricht dem GBAS Approach Service Type A (GAST-A), einem Anflugdienst, der ursprünglich von dem australischen Ground based Regional Augmentation System GRAS [8], [9] entwickelt wurde.

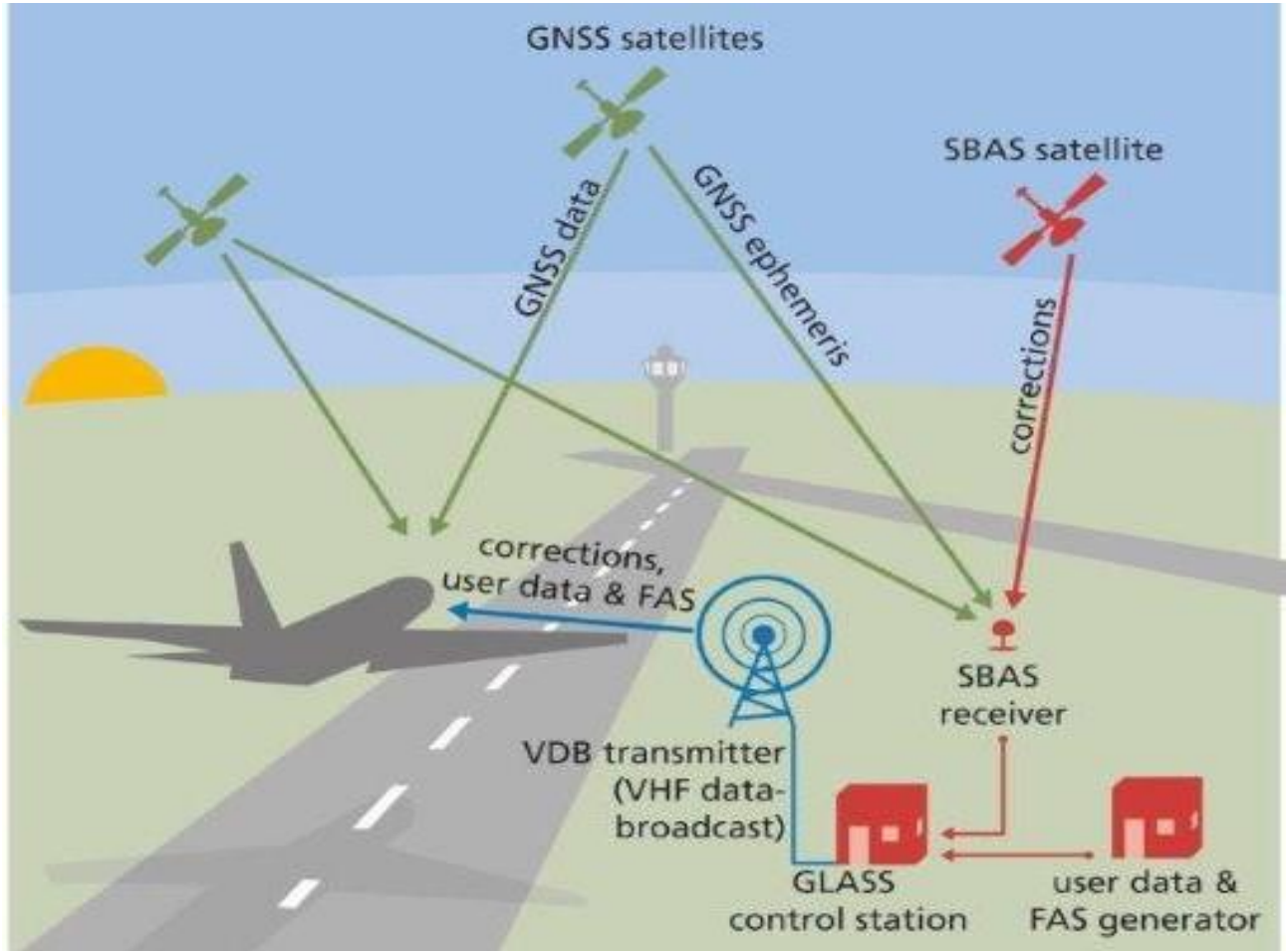


Abbildung 1: Die GLASS-Architektur ermöglicht mit GLS ausgestatteten Flugzeugen Flüge zum LPV-Minimum.

Die Technologie wurde in Flugversuchen getestet und hat die GAST-A Standards [10] [11] gut erfüllt. Der nächste Schritt zum Einsatz der GLASS-Technologie ist die Entwicklung eines Betriebskonzepts (CON OPS) für die Nutzung dieser Technologie im Flugbetrieb. Dazu präsentieren wir den Flugzeugbesatzungen verschiedene Anflugkarten und Cockpit-Prozeduren, lassen jede Besatzung die verschiedenen Prozeduren fliegen und bewerten ihre Leistung und Reaktionen.

Charting

Jedes veröffentlichte Instrumentenanflugverfahren (IAP) auf einen Flughafen hat eine zugehörige Karte. Diese Karten unterscheiden sich je nach Anflugart und werden von den Flugbesatzungen verwendet, um die erforderlichen Informationen über den Anflug zu erhalten und die Avionik im Flugzeug entsprechend einzustellen [12].



Hier haben wir nach der besten Karte gesucht, um der Besatzung die erforderlichen Informationen über GLASS zu präsentieren. Die Karten, die wir entwickelt haben, basieren auf dem RNP E-Anflug auf die Piste 15 in Salzburg (LWS). Diese Karte ist im österreichischen Luftfahrthandbuch (AIP) veröffentlicht und kann unter <https://eaip.austrocontrol.at/> abgerufen werden. Der auf dieser Karte dargestellte Anflug ist ein "LPV only"-Anflug, d.h. nur Flugzeuge, die SBAS für IAPs verwenden können, können ihn fliegen. Die gängigsten kommerziellen Verkehrsflugzeuge, die Boeing 737 und der Airbus A320, verfügen nicht über diese erforderliche Ausrüstung. Wir haben zwei Karten entwickelt, die es mit GLS ausgestatteten Flugzeugen ermöglichen, diesen Anflug zu nutzen.

GLS-Variante

Die erste Option ist eine GLS-Karte (Abbildung 2) mit zusätzlichen Informationen, die den Piloten darüber informieren, dass sie auf SBAS basiert. Der Anflug muss als GLS-Typ kodiert und in der Flugzeugdatenbank gespeichert werden, damit er geflogen werden kann. Wir haben mehrere Änderungen an der Karte im Vergleich zur RNP-E-Basiskarte aus dem AIP [13] vorgenommen. Die Karte wurde umbenannt und zeigt nun in der oberen rechten Ecke GLS-E anstelle von RNP-E. Ein weiteres Kästchen weiter links in der oberen Reihe zeigt die Informationen an, die zum Fliegen des GLS erforderlich sind. Dazu gehören die 5-stellige Kanalnummer (22265), die für den Empfang des GLS-Signals über die Avionik erforderlich ist, und die 4-stellige Kennung S15A. Wenn die richtige Kanalnummer eingestellt ist und die Avionik das Signal empfängt, wird diese Kennung auf dem Primary Flight Display (PFD) auf dem Flugdeck angezeigt. So kann die Flugbesatzung die korrekte Einstellung des GLS-Empfängers überprüfen. Zusätzlich zu den Informationen am oberen Rand der Karte wird in einem Feld in der Mitte der Karte eine Bemerkung angezeigt. Diese Bemerkung enthält dieselbe Kanalnummer und Kennung wie die oben auf der Karte angezeigte. Außerdem informiert er die Piloten darüber, dass der LPV-Dienst über dieses GLS-Signal bereitgestellt wird.



Luffahrtforschungsprogramm VI
(Erster Aufruf 2020-2024)
Projektbeschreibung GLASS

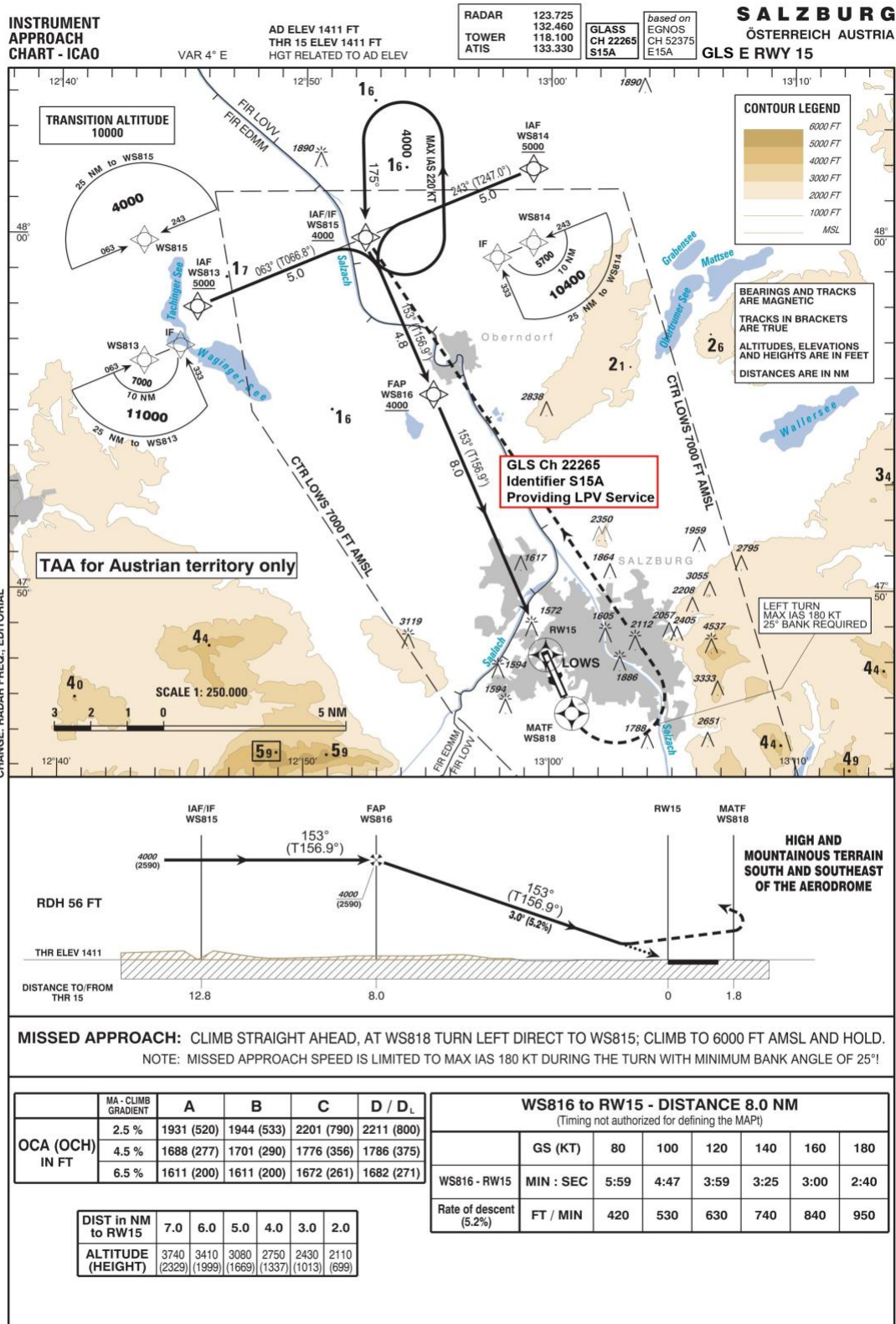


Abbildung 2: Neue GLS-Karte für den GLASS-Betrieb nach Salzburg nach der AIP LOWS RNP E 15-Karte



RNP-Variante

Die zweite Option ist eine RNP-Anflugkarte für den GLASS-Betrieb. Der Unterschied zwischen der veröffentlichten RNP E-Karte und der unseren ist das Bemerkungsfeld neben dem Final auf der Zeichnung. Dort steht, dass das LPV-Finale auch über einen GLS-Kanal bereitgestellt wird. Die entsprechende Kanalnummer und die Kennung sind im Bemerkungsfeld angegeben.(Abbildung 3)



Luffahrtforschungsprogramm VI
(Erster Aufruf 2020-2024)
Projektbeschreibung GLASS

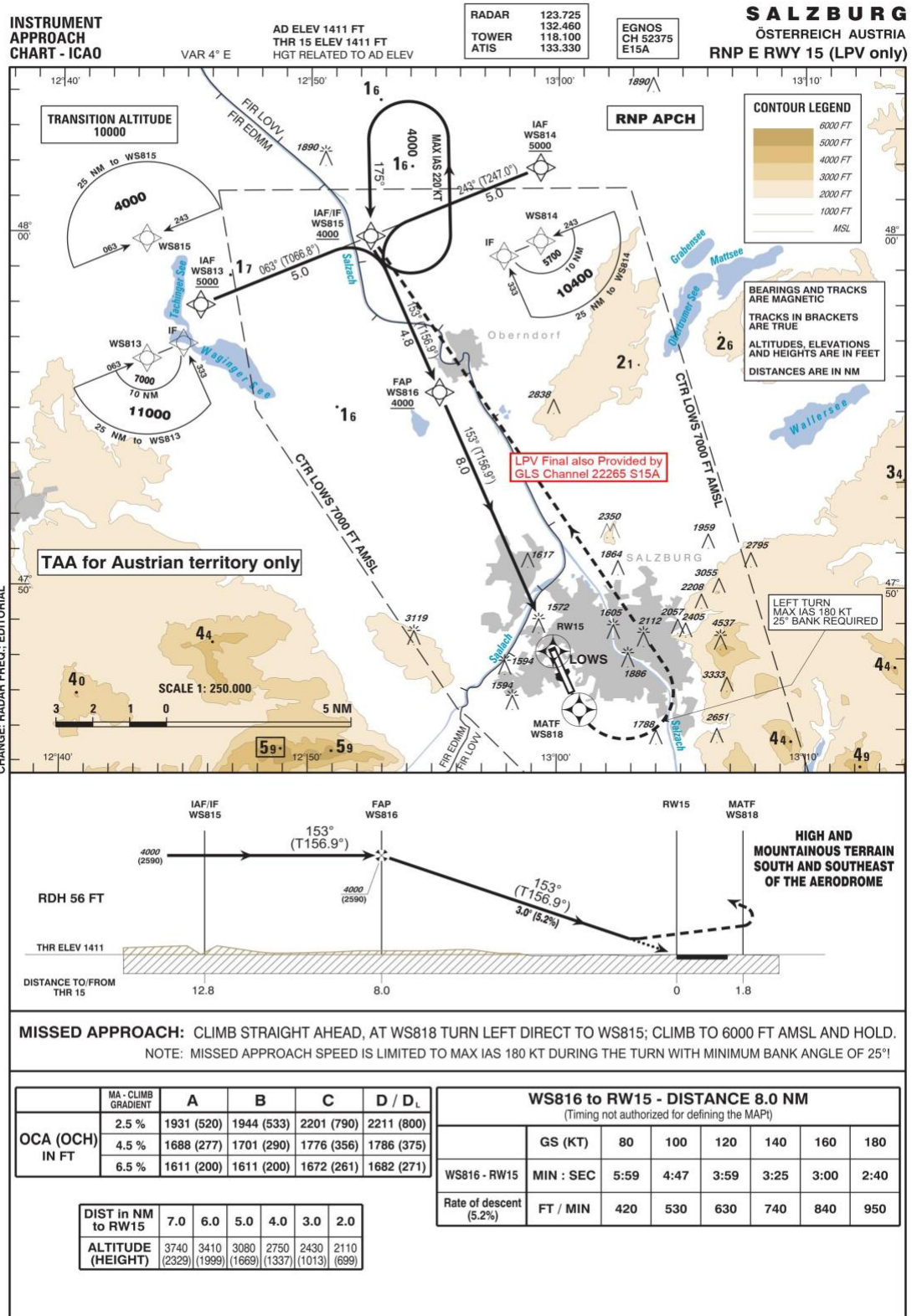


Abbildung 3: Angepasstes RNP-Diagramm für LOWS RNP E 15 mit Informationen zur GLASS-Technologie.



Betrieb und Aufgabenverteilung

Um das GLASS-Konzept berücksichtigen zu können, haben wir die Standardbetriebsverfahren für ein Airbus A320-Flugzeug angepasst, um die für die GLASS-Technologie einzigartigen Aktionen einzubeziehen. Wir haben uns für den A320 entschieden, weil es sich um eines der gängigsten Verkehrsflugzeuge handelt und bei Lufthansa Aviation Training ein A320 Full-Flight-Simulator mit GLS-Funktionen zur Datenextraktion zur Verfügung stand.

Hier stellen wir die Aufgabenverteilung der Crew für die beiden Varianten der GLASS-Nutzung vor. Die Tabellen in diesem Kapitel zeigen die Aufgaben, die die Flugbesatzung bei der Verwendung von GLASS in einer A320 durchführen muss. Die Tabellen beginnen mit der Vorbereitung des Anflugs und enden bei der Mindestsinkflughöhe, bei der die Piloten entscheiden müssen, ob sie die Landung fortsetzen oder das Fehlanflugverfahren einleiten wollen.

Kommerzielle Transportflugzeuge wie der A320 werden routinemäßig von zwei Piloten geflogen. Beide können das Flugzeug fliegen und haben die gleichen Steuerungsmöglichkeiten auf ihrer jeweiligen Seite. Die Aufgaben während des Fluges werden in der Regel auf den fliegenden Piloten (PF) und den überwachenden Piloten (PM) aufgeteilt. Der PF steuert die Flugbahn des Flugzeugs direkt, entweder manuell, über die Steuerungsschnittstelle oder mit Hilfe des Autopiloten. Der PM hingegen führt die Aufgaben aus, die den Flugweg nicht direkt beeinflussen, wie die Kommunikation mit der Flugsicherung und das Lesen der Checklisten. Da beide Piloten für beide Aufgaben ausgebildet sind, wechseln sie in der Regel nach jedem Flug die Rollen.

GLS

Bei einem Anflug mit einer GLS-Anflugkarte kann die Besatzung die Standard-GLS-Verfahren verwenden, die sie während ihrer Ausbildung gelernt hat, bei der das GLS wie ein ILS geflogen wird. Der Unterschied für die Flugbesatzungen ist im Vergleich zu ILS sehr gering, da die Avionik des Flugzeugs GLS-Abweichungen auf die gleiche Weise anzeigt wie ILS-Abweichungen und das System die richtigen Einstellungen auswählt, wenn der Anflug in das Flight Management System (FMS) geladen wird.

Die Aufgaben, die die Besatzung für den Anflug erfüllen muss, sind in chronologischer Reihenfolge in Tabelle 1 aufgeführt. Die Aufgaben, die speziell für den GLS-Anflug gelten, sind fett und kursiv dargestellt. Tabelle 1 ist in drei Teile unterteilt, um die drei verschiedenen Situationen während des Anflugs hervorzuheben, in denen die aufgeführten Aufgaben ausgeführt werden.

Besonders wichtig ist die Überprüfung der richtigen Kanalnummer und Kennung. Die Kanalnummer wird vom Flugzeug automatisch eingestellt, um den Empfang des GLS-Signals



zu ermöglichen. Die Kennung ist Teil dieses Signals und wird bei Empfang auf den primären Fluganzeigen angezeigt. Durch den Vergleich der empfangenen Kennung mit der auf der Karte angezeigten Kennung prüft die Besatzung, ob das gewünschte Signal empfangen wird.

Tabelle 1: Aufgabenliste für den Pilotenflug und die Pilotenüberwachung während eines Anflugs mit GLASS-Technologie und GLS-Betrieb. ([13] abgeleitet vom A320 Quick Reference Handbook [14])

Aufgaben für Pilot Flying	Aufgaben für die Pilotüberwachung
VORBEREITUNG AUF DEN ABSTIEG	
Bereiten Sie Navigationskarten vor. Bestätigen Sie die Landeleistung GLS-Ansatz in FMS einfügen GLS Minimum einstellen Landeerhöhung prüfen Stellen Sie Autobrake als erforderlich ein Anflugbesprechung durchführen Terrain auf dem Navigationsdisplay nach Bedarf einstellen Wetterradar nach Bedarf einstellen Freigegebene Höhe im Flugsteuerungsgerät einstellen	Wetter- und Landeinformationen einholen Nav-Karten vorbereiten Landeleistung prüfen Überprüfen Sie den korrekten Anflugsatz GLS Minimum einstellen Terrain auf dem Navigationsdisplay nach Bedarf einstellen Anti-Eis-System nach Bedarf einstellen Abstiegs Genehmigung einholen
DESCENT	
Bildschirmabstieg Barometrische Referenz bei Freigabe für eine Höhe einstellen und gegenprüfen Drücken Sie die Taste Landing System auf dem EFIS-Bedienfeld Vollständige Anflug-Checkliste	Barometrische Referenz bei Freigabe für eine Höhe einstellen und gegenprüfen ECAM-Status prüfen Landescheinwerfer und Anschlagzeichen beim Überflug von 10.000 ft einschalten Drücken Sie die Taste Landing System auf dem EFIS-Bedienfeld Überprüfen Sie die korrekte Kanalnummer und Kennung Vollständige Anflug-Checkliste
FLUGZEUGKONFIGURATION FÜR DEN ANFLUG	
Bei Erstanflug Flugplansequenzierung anpassen Ca. 15 NM vor dem Touchdown Aktivieren Sie die Anflugphase Managed Speed prüfen Flugbahn überwachen und bei Bedarf anpassen Wetterradar nach Bedarf einstellen Drücken Sie die Annäherungstaste auf der FCU Prüfen Sie LOC und GS Bewaffnet	Navigationsgenauigkeit überwachen Anflugfreigabe bei Empfang zurücklesen



Aufruf von LOC beim Abfangen von GLS

LOC*

Prüfen Sie den korrekten seitlichen Abschnitt des Anfluges

Abruf GS beim Abfangen von GLS GS*

Prüfen Sie den korrekten vertikalen Schnittpunkt des Anfluges

Go Around Höhe einstellen

Bei Grüner-Punkt-Geschwindigkeit Klappen 1 anordnen

S Geschwindigkeit prüfen

Klappen 2 bestellen Minimum 2000ft AGL

F Geschwindigkeit prüfen

Fahrwerk ausfahren, wenn Klappen 2 sind

Bestellen Sie Landeklappen 3, wenn das Fahrwerk ausgefahren ist.

Bestellen Sie Klappen VOLL, wenn Klappen 3 sind

Geschwindigkeitsziel prüfen

Stow Schiebetisch

Empfang des Kabinenberichts

Vollständige Checkliste für die Landung
Rufen Sie jede Flugmodus-Anzeigeänderung auf

Fortfahren oder Umkehren bei GLS Minimum

Prüfen Sie den korrekten seitlichen Abschnitt des Anfluges

Prüfen Sie den korrekten vertikalen Schnittpunkt des Anfluges

Wählen Sie Klappen 1 bei Bestellung

Wählen Sie Klappen 2 bei der Bestellung

Wählen Sie bei der Bestellung

Fahrwerkshebel unten

Bestätigen Sie Auto-Bremse

Arm Boden Spoiler

Außenlichter einstellen

Wählen Sie bei der Bestellung Klappen 3

ECAM Rad Seite prüfen

Wählen Sie bei der Bestellung Klappen

FULL

Prüfen Sie Auto Thrust auf Speed Mode oder Off

Schalten Sie das Wing Anti Ice System aus, wenn es nicht benötigt wird.

Stow Schiebetisch

Check Landing Memo kein Blau im ECAM-Display

Empfang des Kabinenberichts

Kabinenpersonal beraten

Vollständige Checkliste für die Landung

Flugparameter überwachen

Überwachen Sie Einhundert oben und Mindestanforderung

RNP-Variante

Wenn Sie die RNP-Variante des Anfluges fliegen, laden die Piloten den RNP-Anflug aus dem FMS. Normalerweise wählt die Avionik des A320-Flugzeugs die erforderlichen Navigationshilfen automatisch aus und stellt sie ein. Da für einen RNP-Anflug keine bodengestützte Infrastruktur erforderlich ist, stellt das FMS natürlich auch keine bestimmte Navigationshilfe automatisch ein. Daher kann das System die erforderliche GLS-Kanalnummer und den eingehenden Kurs nicht automatisch einstellen, um das GLASS-GLS-Signal zu verwenden. Die manuelle Eingabe des GLS-Kanals durch den Piloten in das FMS wird auf dem PFD angezeigt, aber vom Flugführungsrechner ignoriert.

Dies führt zu den größten Unterschieden im Betrieb. Die Backup-Abstimmung muss verwendet werden, um den Empfang und die Nutzung des GLS-Signals im Flugführungscomputer von



A320-Flugzeugen zu ermöglichen. Die Piloten müssen die Backup-Abstimmung des GLS auf dem COM/NAV-Bedienfeld auf dem Mittelpodest manuell einschalten und während eines Anflugs mit GLASS und einem vom FMS geladenen RNP-Anflug die richtige Kanalnummer und den Anflugkurs auf diesem Bedienfeld auswählen. Alle Unterschiede in der Bedienung durch die Besatzung sind in Tabelle 2 aufgeführt.

Tabelle 2: Aufgabenliste für den Pilotenflug und die Pilotenüberwachung während eines Anflugs mit GLASS-Technologie und RNP-Betrieb. ([13], abgeleitet vom A320 Quick Reference Handbook [14])

Aufgaben für Pilot Flying	Aufgaben für die Pilotüberwachung
VORBEREITUNG AUF DEN ABSTIEG	
Bereiten Sie Navigationskarten vor. Bestätigen Sie die Landeleistung RNP-Anflug in FMS einfügen Abstimmen der GLS-Kanalnummer Inbound-Kurs auswählen LPV Minimum einstellen Landeerhöhung prüfen <i>Fortsetzung wie in Tabelle tbl. 3.1 gezeigt</i>	Wetter- und Landeinformationen einholen Nav-Karten vorbereiten Landeleistung prüfen Überprüfen Sie den korrekten Anflugsatz Abstimmen der GLS-Kanalnummer Inbound-Kurs auswählen LPV Minimum einstellen
DESCENT	
<i>Wie in Tabelle tbl. 3.1 gezeigt</i> Drücken Sie die Taste Landing System Vollständige Anflug-Checkliste	Drücken Sie die Taste Landing System Überprüfen Sie die korrekte Kanalnummer und Kennung Vollständige Anflug-Checkliste
FLUGZEUGKONFIGURATION FÜR DEN ANFLUG	
<i>Wie in Tabelle tbl. 3.1 gezeigt</i> Drücken Sie die Annäherungstaste auf der FCU Prüfen Sie LOC und GS Bewaffnet Aufruf von LOC beim Abfangen von GLS LOC* Prüfen Sie den korrekten seitlichen Abschnitt des Anfluges Abruf GS beim Abfangen von GLS GS* Prüfen Sie den korrekten vertikalen Schnittpunkt des Anfluges Go Around Höhe einstellen <i>Wie in Tabelle tbl. 3.1 gezeigt</i> Rufen Sie jede Flugmodus-Anzeigeänderung auf Fortfahren oder Umkehren bei LPV Minimum	Prüfen Sie den korrekten seitlichen Abschnitt des Anfluges Prüfen Sie den korrekten vertikalen Schnittpunkt des Anfluges Flugparameter überwachen Überwachen Sie Einhundert oben und den Mindestanruf



Simulator-Studie

Um die verschiedenen oben beschriebenen Varianten zu bewerten, haben wir eine Simulatorstudie in einem Airbus 320 CAE7000XR Typ Full-Flight zertifizierten Level D Simulator durchgeführt. Ziel der Studie war es, die Variante der Darstellung und Bedienung zu finden, die das höchste Maß an Sicherheit erzeugt. Sicherheit spielt in der Luftfahrt die wichtigste Rolle, kann aber nicht einfach gemessen werden. Um die Sicherheit im Simulator zu bewerten, haben wir die geflogenen Strecken für eine spätere Analyse aufgezeichnet und die Aufgabenbelastung der Flugbesatzungen gemessen [13].

Für jeden veröffentlichten Anflug muss vor der Veröffentlichung eine Hindernisbeurteilung durch den Verfahrensentwickler durchgeführt werden. Auf diese Weise stellt der veröffentlichte Track sicher, dass Hindernisse und Gelände für anfliegende Flugzeuge frei sind. Für jedes Segment des Anflugs wird bei der Planung des Anflugs eine Cross-Track-Toleranz (XTT) berücksichtigt. Diese XTT beträgt 1,9 km während des Anfangsanflugs und des Zwischenanflugs und reduziert sich auf 556 m im Endanflug bei einem RNP-LPV-Anflug [15]. Natürlich kann die Geländefreiheit nicht garantiert werden, wenn weiter von der veröffentlichten Strecke abgewichen wird. Daher müssen der Pilot und das Flugzeug die Abweichung vom gewünschten Track so gering wie möglich halten.

Der Cross-Track-Fehler wird von mehreren Faktoren beeinflusst. Die größten Auswirkungen haben die Eingaben des Piloten und des Autopiloten, wobei diese Eingaben selbst von verschiedenen Faktoren beeinflusst werden. Die Eingaben des Autopiloten werden hauptsächlich von den Eingangssignalen beeinflusst, wie z.B. der Abweichung vom gewünschten Kurs, die im Multi-Mode-Empfänger (MMR) des Flugzeugs berechnet wird. Ob der Autopilot diesem Signal folgt, hängt auch von dem aktiven Modus und dem geladenen Pfad im FMS ab. Da sich diese zwischen der RNP- und der GLS-Variante unterscheiden, kann die Abweichung vom Cross Track unterschiedlich sein. Ein weiterer Grund für unterschiedliche Abweichungen sind die Eingaben der Piloten zur Steuerung der Modi des Autopiloten. Da sich die Betriebsverfahren für die Flugbesatzung zwischen den beiden Varianten unterscheiden, kann es schließlich zu einem unterschiedlichen Verhalten bei Cross-Track-Fehlern kommen.

Neben der Abweichung von der Ideallinie ist auch die Arbeitsbelastung der Besatzung ein Faktor, der die Sicherheit beeinflusst. Eine optimale Leistung der Flugbesatzung kann mit Aufgaben erreicht werden, die nicht überfordern, aber auch nicht unterfordern [16]. Da die Arbeitsbelastung während eines Standardanflugs ausreicht, um sicherzustellen, dass die Besatzung nicht unterfordert ist [17], liegt der Schwerpunkt darauf, die Besatzungen während der Anflüge mit den in diesem Manuskript betrachteten Operationen nicht zu überfordern. Folglich wird eine geringe Aufgabenbelastung angestrebt.



Die Studie wurde mit zwei professionellen Flugbesatzungen durchgeführt. Wir haben uns darauf beschränkt, einen Simulatorplatz mit einer Dauer von vier Stunden zu buchen, was zwei Stunden pro Crew von zwei Piloten bedeutet. Aufgrund der hygienischen und sozialen Distanzierungsvorschriften während der Pandemiesituation im Herbst 2020, als die Studie stattfand, war dies auch die maximal zulässige Auslastung der Simulatoranlage. Daher konnte kein statistischer Signifikanztest für die gesammelten Daten durchgeführt werden. Andere Simulatorstudien zu ähnlichen Themen, bei denen jedoch eine statistische Analyse durchgeführt wurde, verwendeten mindestens 13-26 Piloten als Testpersonen [18][19][20].

Drei der Testpersonen verfügten über eine Airline Transport Pilot Licence (ATPL) und eine über eine Multi-Crew Pilot Licence (MPL). Die Flugerfahrung reichte von 1500 Flugstunden bis zum erfahrensten Piloten mit 16.000 Stunden.

Abbildung 4 zeigt den Ablauf der Simulatorstudie. Vor dem Betreten des Simulators wurden die Besatzungen in die GLASS-Technologie und die Einstellung des Back-up-Navigationspanels während der RNP-Anflüge eingewiesen. Während der Flüge hielten wir uns so nah wie möglich an die realen Trainingsszenarien. Der Flug jeder Crew begann mit einem Standard-Instrumentenabflug, gefolgt von mehreren Anflügen. Jeder Pilot flog beide Varianten als PF und PM, was zu insgesamt 4 Anflügen pro Crew führte.

Den Piloten stand es frei, den Autopiloten so zu benutzen, wie sie es bei einem Flug in einem echten Flugzeug ihrer Fluggesellschaft tun würden. Alle Piloten ließen den Autopiloten bis zu einem gewissen Punkt im Endanflug eingeschaltet. Ein ehemaliger Fluglotse der DFS übernahm die Aufgaben der Fluglotsen.

Während der Anflüge zeichneten wir die Strecke und die Höhe für eine spätere Analyse auf. Außerdem wurden die Teilnehmer gebeten, Fragebögen auszufüllen, um ihre Arbeitsbelastung und ihre Vorlieben zu erfahren.

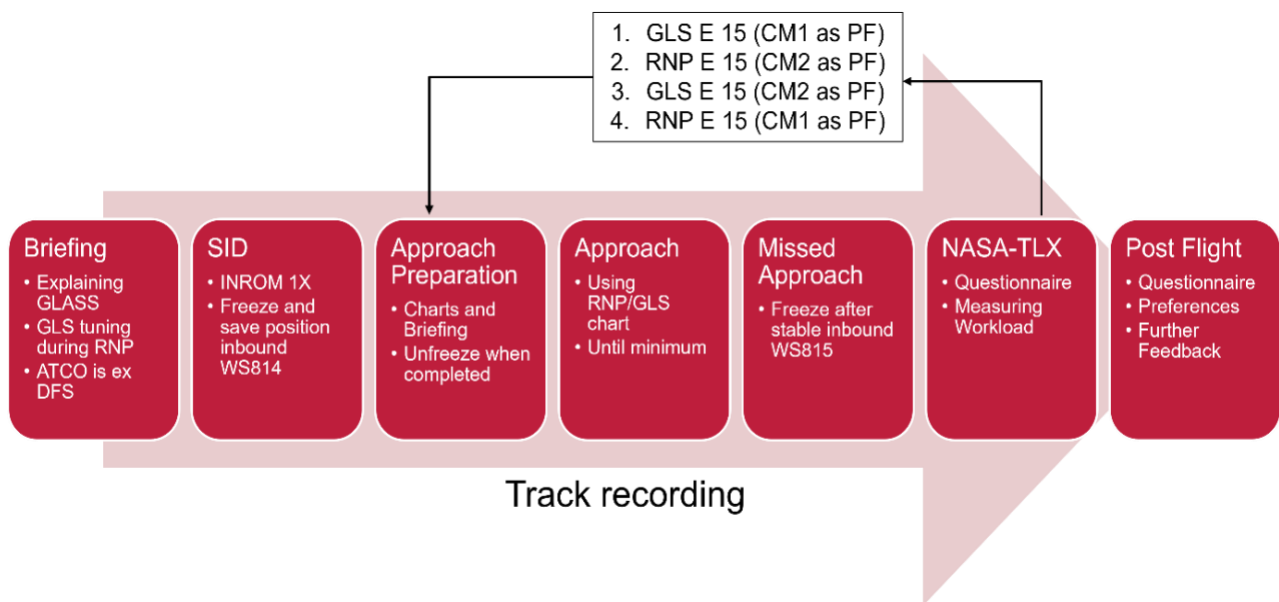


Abbildung 4: Abfolge der Ereignisse während der Simulatorstudie.

Fragebögen

In der Studie haben wir zwei Arten von Fragebögen zur Bewertung der Ansatzvarianten verwendet, den NASA Task Load Index (NASA-TLX) und eine kundenspezifische Zufriedenheitsumfrage. Der NASA-TLX ist eine mehrdimensionale Skala, mit der die Arbeitsbelastung eingeschätzt werden kann. Sie besteht aus sechs Unterskalen, auf denen die Teilnehmer ihre Erfahrungen während der Aufgabe bewerten. Dieses Verfahren wurde von [21] entwickelt. Die sechs Unterskalen sind dort ebenfalls beschrieben. Die Ergebnisse der sechs Subskalen können nach dem ursprünglich mit dem NASA-TLX veröffentlichten Verfahren gewichtet werden, um die individuelle Wahrnehmung der Arbeitsbelastung zu berücksichtigen. Hier waren wir nur an der Gesamtbelastung der Aufgabe interessiert und haben daher auf eine Gewichtung der Ergebnisse verzichtet[22]. Jeder Pilot füllte einen NASA-TLX-Fragebogen aus, nachdem jeder einzelne Anflug abgeschlossen war, um die Arbeitsbelastung für die verschiedenen Varianten zu bewerten.

Der zweite Fragebogen wurde von den Teilnehmern ausgefüllt, nachdem die Simulatorsitzung abgeschlossen war. Hier fragten wir die Teilnehmer nach ihrem persönlichen Wohlbefinden während der verschiedenen Annäherungsvarianten und nach ihrer Meinung darüber, welche Version fehleranfälliger ist und welche Option ihrer Meinung nach die übersichtlichere Darstellung hat. Außerdem erkundigten wir uns, welche Version die Teilnehmer für eine operative Umsetzung bevorzugen würden. Der persönliche Komfort wurde auf einer Skala von 0-100 bewertet und bei jeder der anderen Fragen konnten die Teilnehmer zwischen den Optionen GLS und RNP wählen. Als dritte Option wurde 'No Difference' (kein Unterschied)

hinzugefügt, falls die Teilnehmer keine Unterschiede feststellen konnten. Außerdem enthielt der Fragebogen nach dem Flug Felder für ein offenes Feedback der Teilnehmer.

Ergebnisse der Leistungsdaten

Abbildung 5 zeigt die während der Simulatorstudie geflogenen Flugbahnen. Die GLS-Anflüge, die in einer höheren und niedrigeren Höhe als die anderen beginnen, sind das Ergebnis eines Kommunikationsfehlers. Die erste Crew war sich nicht bewusst, dass sie für die Sinkflugplanung verantwortlich war. Als dies festgestellt wurde und die Besatzung über ihre eigene Verantwortung informiert wurde, leitete sie sofort einen Sinkflug ein. Obwohl sie im Vergleich zu den anderen Anflügen ein höheres Profil hatten, fühlten sie sich zu Recht zuversichtlich, die erforderliche Höhe zu erreichen. Die zweite Besatzung wurde über ihre eigene Verantwortung bei der Planung des Sinkfluges informiert und war daher sehr vorsichtig. Das führte zu einem Anflug, der niedriger war als die anderen. Abgesehen davon konnten keine weiteren großen Unterschiede in den Flugbahnen festgestellt werden.

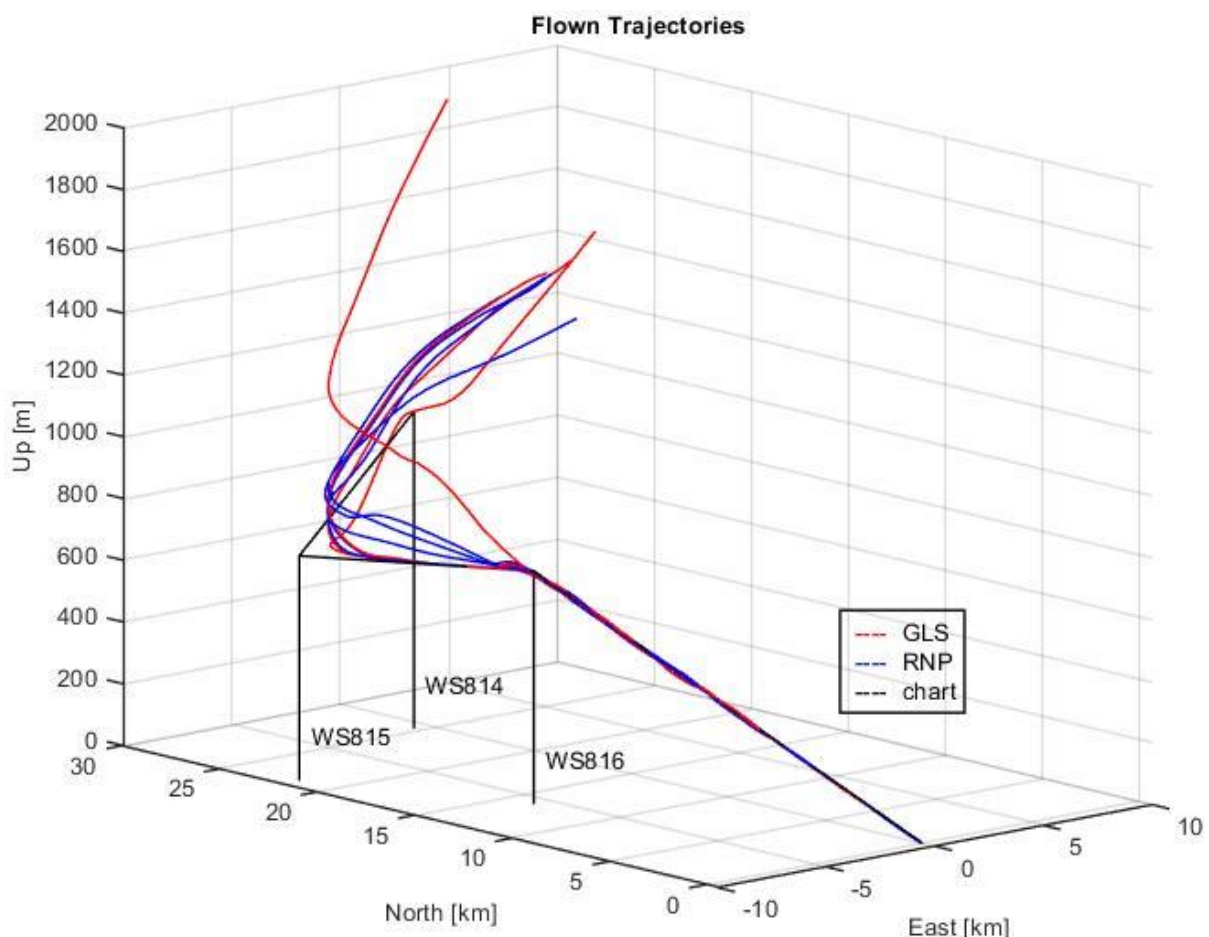


Abbildung 5.1: Während der Simulatorstudie geflogene Trajektorien. Die blauen Trajektorien wurden mit der RNP-Variante geflogen. Rot zeigt die Anflüge, die mit der GLS-Karte geflogen wurden.



Abbildung 5 zeigt die seitliche Abweichung von der Verbindungslinie zwischen den Wegpunkten WS815, WS816 und der Landebahnschwelle. Die X-Achse zeigt die Entfernung von der Landebahnschwelle in Kilometern an. Sie beginnt bei 2 km, da die Besatzungen einen Fehlanflug einleiteten, als sie die Entscheidungshöhe in etwa 2,2 km Entfernung von der Landebahn erreichten. Die Abweichung während des Fehlanflugverfahrens war nicht Teil unserer Studie. Bei 14,3 km zeigt eine schwarze vertikale Linie die Position von WS816 in Bezug auf die Landebahn an. Abweichungen in Flugrichtung nach rechts werden als negative Abweichungen dargestellt. Positive Werte auf der y-Achse zeigen eine Abweichung nach links von der idealen Flugbahn an.

Die große Abweichung auf der anderen Seite von WS816 ist eine Folge des Vorbeiflug-Wegpunkts WS815. Bei solchen Wegpunkten muss das Flugzeug vor dem Erreichen des Punktes abbiegen, um den Weg zum folgenden Wegpunkt abzuschneiden. Das FMS des Flugzeugs berechnet die Wende und befiehlt dem Autopiloten oder dem Flight Director, diese zu fliegen.

In Abbildung 6 sind die Abweichungen während der RNP-Variante in blau dargestellt, während die Abweichungen während der Anflüge mit der GLS-Variante in rot dargestellt sind. Bei der RNP-Variante verringert sich die Abweichung nach dem Abbiegen schnell auf etwa 7 m. Danach dauert es etwa 5 km, bis die Abweichung auf fast Null sinkt. Bei den RNP-Varianten wurde kein Überschwingen festgestellt.

Die resultierenden Kurven während der GLS-Variante zeigen kein so einheitliches Bild. Bei zwei dieser Anflüge nahm die Abweichung langsamer ab als bei den RNP-Varianten, ging aber kontinuierlich auf Null zurück und blieb dort. In den anderen beiden Fällen nimmt die Abweichung nicht kontinuierlich ab, sondern stagniert bzw. steigt leicht an, bevor sie wieder abnimmt und den idealen Track schneidet. Bei zwei Anflügen mit GLS-Betrieb wurde ein Überschwingen aufgezeichnet.

Wir konnten den Grund für das abweichende Verhalten im GLS-Betrieb nicht zweifelsfrei feststellen, aber es wird vermutet, dass die FMS-Berechnung der Kurve dafür verantwortlich ist. Außerdem haben wir die Geschwindigkeit während des Anflugs aufgezeichnet und verwenden sie zur Erklärung dieses Verhaltens. Wir können die leichte Zunahme der Abweichung so erklären, dass die Abbremsung zu diesem Zeitpunkt stattfand und zu einem für die Geschwindigkeit zu großen Neigungswinkel führte, da die Kurve mit der Geschwindigkeit vor der Einleitung der Kurve berechnet wurde. Das FMS erkennt dann die Abweichung und korrigiert sie. Es konnte nicht überprüft werden, ob dieses Verhalten für den Anstieg verantwortlich ist, da die genauen Algorithmen, die das FMS verwendet, nicht öffentlich zugänglich sind.

Eine andere mögliche Erklärung ist, dass das FMS bei einem GLS-Anflug erwartet, dass es der Localizer-Abweichung nach dem Abfangkurs folgt und daher die Wende nicht vorwegnimmt, sobald sich das Flugzeug auf dem Abfangkurs befindet. Bei einem RNP-Anflug berechnet und steuert das FMS die Wende zum Endanflug genauso wie jede andere Wende. Wenn Sie sich auf dem Localizer-Abfangkurs befinden, übernimmt der entsprechende Abfangmodus (LOC*), ohne dass das Flugzeug eine Wende vorwegnimmt.

Nach dem Abfangen des gewünschten Kurses weicht ein Anflug mit der RNP-Variante 10 m nach rechts vom Kurs ab. Diese Abweichung ist wahrscheinlich auf das manuelle Fliegen des jeweiligen Piloten zurückzuführen. Abgesehen davon haben wir nach dem Abfangen keine Unterschiede zwischen den Varianten festgestellt. Da sich das Autoflight-System in dieser Phase im gleichen Modus (LOC GS) befindet und sich auch die Aufgaben der Besatzungen nicht unterscheiden, wurde in dieser Phase kein signifikanter Unterschied erwartet. Während eines GLS-Anflugs beträgt die maximale seitliche Abweichung, die ein Flugzeug bei einem Minimum von 356 Fuß Höhe haben darf, während es noch die vollen vertikalen Toleranzen hat, 58 m [15]. Dies ist der Punkt mit der geringsten XTE-Toleranz. Die aufgezeichneten Werte von bis zu 10 m in 10 km Entfernung liegen deutlich unter dieser Grenze.

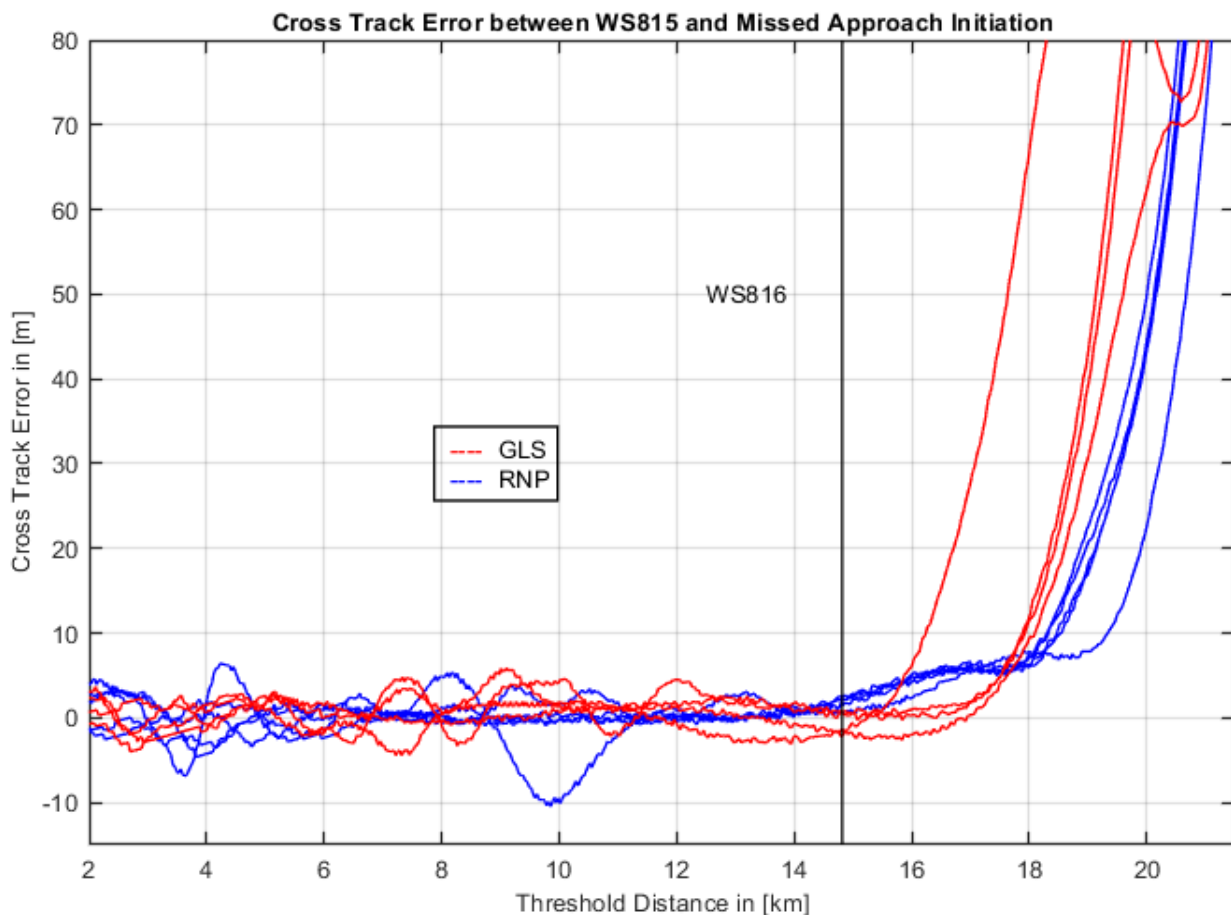


Abbildung 6: Cross Track Error während der Simulatorflüge zwischen den Wegpunkten WS815 und der Einleitung des Fehlanflugverfahrens.

Die Analyse der anderen Schenkel, der vertikalen Abweichung und der Geschwindigkeit ergab keinen Zusammenhang zwischen der Kartenvariante und der Art des Betriebs und der möglichen Abweichungen. Daher ist keine Option der anderen eindeutig überlegen, aber während des Abfangens führte die RNP-Variante zu weniger Überschwingen und zu einem kontinuierlichen Abfangen.

Fragebogen nach dem Flug

Nach dem letzten Anflug und dem letzten NASA-TLX-Fragebogen baten wir die Teilnehmer, den Post-Flight-Fragebogen auszufüllen. In diesem Fragebogen gaben alle Teilnehmer an, dass sie sich während der GLS-Variante des Anflugs wohler fühlten, wie in Abbildung 7 dargestellt. Die Werte sind bei den einzelnen Piloten sehr unterschiedlich. Ein Pilot bewertete seinen Komfort während der GLS-Variante mit etwa 90 auf einer Skala von 0-100 und während der RNP-Variante mit weniger als einem Drittel davon. Ein Pilot hingegen empfand bei beiden Varianten fast den gleichen Komfort mit einem Unterschied in der Bewertung von etwa 5.

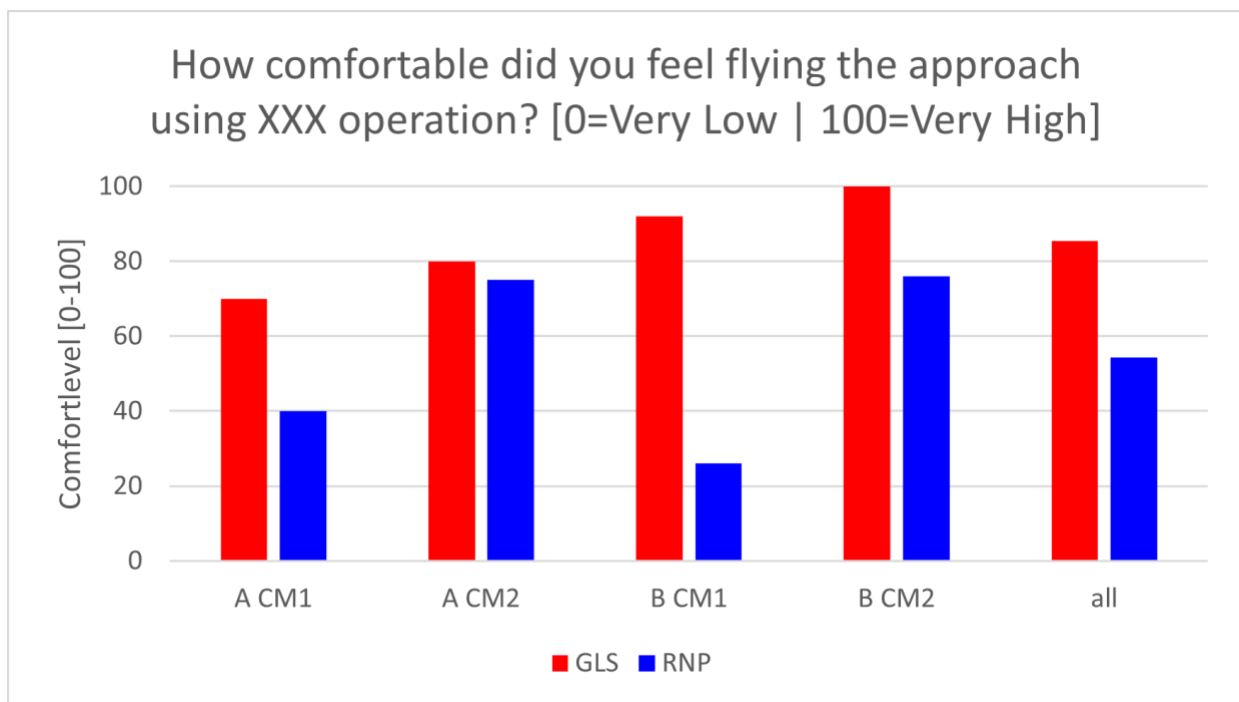


Abbildung 7: Persönlicher Komfort - Ergebnisse des Fragebogens nach dem Flug.

Bei der Frage, welche Variante fehleranfälliger ist, wählte die Hälfte der an der Studie teilnehmenden Piloten beide Varianten. Daher lässt sich aus den Antworten auf diese Frage kein Vorteil für eine der beiden Varianten ableiten. Die Ergebnisse zu den Fragen nach der



übersichtlicheren Darstellung und der persönlichen Präferenz der Teilnehmer fielen mit drei von vier und vier von vier sehr deutlich zugunsten der GLS-Variante aus.

Außerdem enthielt der Fragebogen nach dem Flug ein Feld für ein offenes Feedback der Teilnehmer. Dieses Feedback bezog sich auf die Art und Weise, wie die Abstimmung des GLS während der RNP-Version des Anflugs durchgeführt wurde. Die Teilnehmer kritisierten diese Art der Abstimmung und empfehlen sie nicht, da sie das Gefühl hervorruft, sich in einer nicht normalen Situation zu befinden. Die Ergebnisse dieses Fragebogens deuten darauf hin, dass die GLS-Variante die bessere Option für die Implementierung von GLASS ist, aber es ist möglich, dass die Ergebnisse stark durch das "nicht normale" Gefühl der Crews während des Backup-Tunings beeinflusst werden. Die Art der Abstimmung könnte den persönlichen Komfort während der Anflüge und damit die Präferenz der Teilnehmer stark beeinflussen.

NASA-TLX Fragebogen

Um die Arbeitsbelastung der Crews zu beurteilen, haben wir die von jedem Teilnehmer angegebenen TLX-Werte für die verschiedenen Varianten miteinander verglichen. Insgesamt variieren die gemeldeten Werte wieder sehr stark zwischen den einzelnen Piloten. Während ein Teilnehmer eine erfahrene Arbeitsbelastung von bis zu 67 von 100 angab, berichtete ein anderer Pilot einen Maximalwert von 22. Dieser Unterschied und die geringe Anzahl der Teilnehmer an der Studie führten zu der Entscheidung, keine Durchschnittsergebnisse zu verwenden, sondern die beiden Varianten für jeden Piloten einzeln zu vergleichen. Abbildung. 8 zeigt die Ergebnisse des rohen NASA-TLX, der sich aus dem Mittelwert der Teilskalenberichte der einzelnen Teilnehmer errechnet.

Es ist zu erkennen, dass die RNP für alle PFs und zwei PMs eine höhere Arbeitsbelastung erzeugt, wovon eine für beide Varianten fast gleich ist. Auf der anderen Seite hatte nur ein Teilnehmer während der GLS als PM eine höhere Arbeitsbelastung. Auch wenn die Unterschiede in den Werten variieren, führte die RNP-Variante in den meisten Fällen zu einer höheren Arbeitsbelastung der Crew. Aufgrund eines Softwarefehlers gingen zwei Datensätze für die erste Crew verloren, so dass wir diese Daten nicht für den Vergleich verwenden konnten.

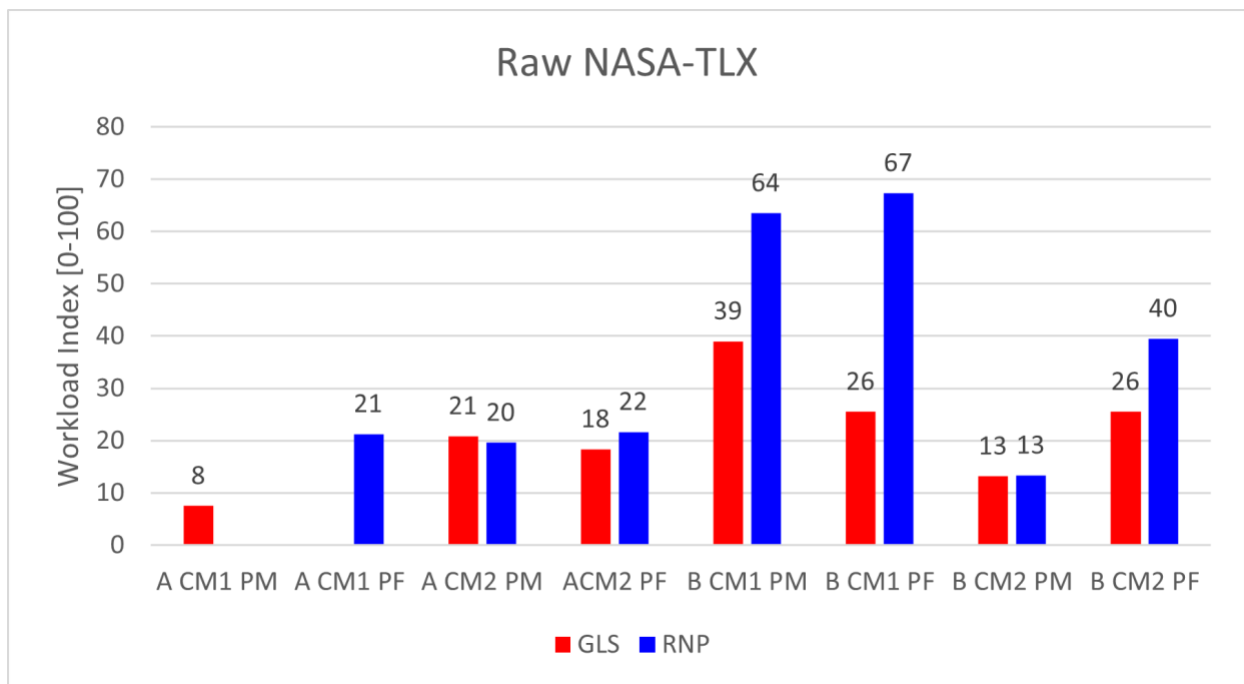


Abbildung 8: RAW NASA-TLX Ergebnisse für jedes Besatzungsmitglied in beiden Rollen.

Da die Ergebnisse des Fragebogens nach dem Flug auf einen starken Einfluss des "nicht-normalen" Gefühls hinweisen, haben wir die Subskalen "Mentale Anforderung" und "Frustrationsgrad" des NASA-TLX überprüft. Diese Subskalen wurden ausgewählt, weil wir erwartet haben, dass der Stress, der aus der Tuning-Methode resultiert, prominent ist. Insbesondere die Werte für PF zeigen die erhöhte Arbeitsbelastung während der RNP-Variante für alle Piloten. Die Werte für die PM zeigen bei zwei Teilnehmern während der RNP-Variante größere Werte und bei einem Teilnehmer keinen Unterschied.



Schlussfolgerungen

Die Kritik der Teilnehmer im Fragebogen nach dem Flug deutet darauf hin, dass die GLS-Variante die bessere Option für eine Kartendarstellung von Anflügen mit GLASS ist. Dies wird auch durch die anderen Ergebnisse der Fragebögen untermauert. Sowohl der NASA-TLX-Fragebogen mit seiner geringeren Arbeitsbelastung während der GLS-Variante, als auch der Post-Flight-Fragebogen mit den subjektiven Meinungen der Teilnehmer weisen auf die Überlegenheit der GLS-Variante hin. Diese Übereinstimmung in beiden Fragebögen könnte eine Folge der ungewöhnlichen Abstimmung und der Gefühle sein, die die Piloten mit dieser ungewöhnlichen Technik verbinden. Es ist daher möglich, dass die Arbeitsbelastung in einem anderen Flugzeugtyp, bei dem keine Backup-Tuning-Funktion verwendet werden muss, anders empfunden würde.

Die objektive Spuranalyse hingegen zeigte keinen Vorteil der GLS. Während des Abfangens der GLS-Variante zeigten zwei Spuren eine nicht-kontinuierliche Abnahme des XTE. Außerdem war die Konvergenzgeschwindigkeit des Flugzeugs mit der endgültigen Anflugspur bei den GLS-Varianten schneller, was dazu führte, dass zwei der Anflüge die ideale Spurlinie überflogen. Andererseits war die Verringerung des Cross-Track-Fehlers während der RNP-Variante des Anflugs in allen Fällen kontinuierlich und es wurde keine Überschreitung festgestellt. Keine dieser Abweichungen war jedoch sicherheitskritisch.

Insgesamt zeigt diese Studie, dass eine separate GLS-Karte für Anflüge mit der GLASS-Technologie zu einer geringeren Arbeitsbelastung für die Flugbesatzung eines Airbus A320 führt. Dies ist auch die Option, die die Piloten für die neue Technologie bevorzugen und mit der sie sich am wohlsten fühlen. Wir haben auch festgestellt, dass abgesehen von den Auswirkungen der Abstimmungsmethode die Ergebnisse der Variante mit einer modifizierten RNP-Karte nicht wesentlich schlechter sind.

Da kein neuer Anflug von der nationalen Flugsicherungsorganisation (ANSP) erstellt und veröffentlicht werden muss, dürfte die RNP-Variante aus Sicht der ANSP schneller und einfacher umzusetzen sein. Für die Veröffentlichung als GLS-Anflug müsste für das FAS eine völlig neue Hindernisbeurteilung durchgeführt werden, wie es die PANS-OPS vorschreiben.

Die Flugbesatzung könnte auch geschult werden, einen Anflug vom Typ GLS aus der Datenbank zu laden, wenn sie einen GLASS RNP-Anflug durchführt. Für das Beispiel Salzburg würde die Flugsicherung das Flugzeug für den RNP-E-Anflug freigeben. Die Flugbesatzung weiß aus dem Training, dass sie in diesem Fall den GLS-E laden muss, wenn sie das LPV-Minimum nutzen will. Wenn diese Technik angewandt wird, müssen die Sicherheitsauswirkungen der Diskrepanz zwischen den Anweisungen der Flugsicherung und dem Pilotenverfahren bewertet werden. Es würde zu einer geringeren Arbeitsbelastung im



Cockpit führen, da keine Backup-Abstimmung erforderlich ist, erfordert aber eine maßgeschneiderte Datenbank für das FMS.

Wir empfehlen, dass nur speziell ausgebildete Piloten die RNP-Karte für Anflüge mit GLASS-Technologie in A320-Flugzeugen verwenden sollten, damit sie sich der unterschiedlichen Abstimmung und der höheren Aufgabenbelastung bewusst sind.

Es ist möglich, dass der Unterschied zwischen den Varianten deutlich geringer oder sogar nicht vorhanden ist, wenn ein anderer Flugzeugtyp für die Anflüge verwendet wird. Die Art und Weise der Abstimmung der erforderlichen Navigationshilfe unterscheidet sich zwischen den Herstellern und sogar zwischen verschiedenen Modellen. Außerdem kann die FMS-Berechnung der Kurven, die bei der GLS-Variante zu der höheren Abweichung führte, bei einem anderen Flugzeugtyp anders sein.

Danksagung

Wir danken dem Bundesministerium für Wirtschaft und Energie für die Finanzierung des GLASS-Industrietransferprojekts unter der Förderungsnummer 20Q1933C. Außerdem möchten wir Ferdinand Behrend von Lufthansa Aviation Training für die Bereitstellung des Datenextraktionsdienstes für den Full Flight Simulator danken. Vielen Dank auch an die Flugbesatzungen für ihre Teilnahme und ihr Feedback. Diese Arbeit wurde als Masterarbeit von Janes Biernatzki unter der Aufsicht von Prof. Dirk Kuegler durchgeführt.