Garrecht Avionik GmbH · Alfred-Nobel-Str. 2d · D-55411 Bingen
Internet: https://www.air-avionics.com · email: support@air-avionics.com

SiFlA

Sicher und leise Fliegen durch hohen Automatisierungsgrad und elektrische Antriebe am Beispiel des e-Schlepps

Schlussbericht

2025

Verfasser: Dr.-Ing. Christoph G. Santel
Förderkennzeichen: 20Q1938B

Inhaltsverzeichnis

0 Vorwort · *4*

I. Kurze Darstellung **5**

1 Kurzbericht · *6*

1.1 Aufgabenstellung · *6*

1.2 Voraussetzungen des Vorhabens · *6*

1.3 Planung und Ablauf des Vorhabens · *6*

1.4 wissenschaftlich-technischer Stand, an welchen angeknüpft wurde · *7*

1.4.1 genutzte Konstruktionen, Verfahren und Schutzrechte · *7*

1.4.2 verwendete Fachliteratur sowie Informations- und Dokumentationsdienste · *7*

1.5 Zusammenarbeit mit anderen Stellen · *8*

II. Eingehende Darstellung **9**

2 Hierarchische Taskanalyse für den Flugzeugschlepp · *11*

2.1 Methode · *11*

2.1.1 Ergebnisse · *12*

3 Functional Hazard Assessment · *18*

3.1 Identifizieren und Verifizieren einer geeigneten Flugphasentaxonomie für den Flugzeugschlepp · *18*

3.2 Durchführen und Ergebnisse der FHA · *19*

4 Entwicklung einer Mensch-Maschine-Schnittstelle für den automatisierten Flugzeugschlepp · *20*

4.1 Identifizieren von Systemanforderungen · *20*

4.1.1 Entwicklung eines Schnittstellenprotokolls · *21*

4.2 Identifizieren von Softwareanforderungen · *21*

4.3 Implementierung der Mensch-Maschine-Schnittstelle · *21*

4.3.1 Hardware · *21*

4.3.2 Software · *22*

5 Ergänzungen · *24*

5.1 Wichtigste Positionen des zahlenmäßigen Nachweises · *24*

5.2 Notwendigkeit und Angemessenheit der geleisteten Projektarbeit · *24*

5.3 Voraussichtlicher Nutzen · *24*

5.4 Bekannter zeitgleicher Fortschritt anderer Stellen · *25*

5.5 Erfolgte und geplante Veröffentlichungen der Ergebnisse · *26*

6 Literaturverzeichnis · *27*

Abkürzungsverzeichnis

AFCS	Automatic Flight Control System
BFU	Bundesstelle für Flugunfalluntersuchung
DFS	Deutsche Flugsicherung
DLR	Deutsches Zentrum für Luft- und Raumfahrt
EARS	Easy Approach to Requirements Syntax
EASA	European Aviation Safety Agency
ETSO	European Technical Standard Order
FHA	Functional Hazard Assessment
HAP	Hauptarbeitspaket
HTA	hierarchische Taskanalyse
LBA	Luftfahrt-Bundesamt
MMS	Mensch-Maschine-Schnittstelle
NASA	National Aeronautics and Space Administration
NEFT	Next Generation Electric Flight Training
NKBF 98	Nebenbestimmungen für Zuwendungen auf Kostenbasis des Bundesministeriums für Bildung und Forschung an Unternehmen der gewerblichen Wirtschaft für Forschungs- und Entwicklungsvorhaben
OSTIV	Organisation Scientifique et Technique Internationale du Vol a Voile
SBO	Segelflugsport-Betriebs-Ordnung
SiFlA	Sicher und leise Fliegen durch hohen Automatisierungsgrad und elektrische Antriebe am Beispiel des e-Schlepps

Vorwort 0

Der vorliegende Schlussbericht bezieht sich auf das Forschungsvorhaben Sicher und leise Fliegen durch hohen Automatisierungsgrad und elektrische Antriebe am Beispiel des e-Schlepps (SiFlA), welches vom Zuwendungsempfänger während der Projektlaufzeit vom 01.06.2021 bis zum 30.11.2024 bearbeitet wurde.

Anforderungen an den Schlussbericht

I. Kurze Darstellung zu
   1. Aufgabenstellung
   2. Voraussetzungen, unter denen das Vorhaben durchgeführt wurde
   3. Planung und Ablauf des Vorhabens,
   4. wissenschaftlichem und technischem Stand, an den angeknüpft wurde, insbesondere
      - Angabe bekannter Konstruktionen, Verfahren und Schutzrechte, die für die Durchführung des Vorhabens benutzt wurden,
      - Angabe der verwendeten Fachliteratur sowie der benutzten Informations- und Dokumentationsdienste,
   5. Zusammenarbeit mit anderen Stellen.

II. Eingehende Darstellung
   1. der Verwendung der Zuwendung und des erzielten Ergebnisses im Einzelnen, mit Gegenüberstellung der vorgegebenen Ziele,
   2. der wichtigsten Positionen des zahlenmäßigen Nachweises,
   3. der Notwendigkeit und Angemessenheit der geleisteten Arbeit,
   4. des voraussichtlichen Nutzens, insbesondere der Verwertbarkeit des Ergebnisses im Sinne des fortgeschriebenen Verwertungsplans,
   5. des voraussichtlichen Nutzens, insbesondere der Verwertbarkeit des Ergebnisses im Sinne des fortgeschriebenen Verwertungsplans,
   6. der erfolgten oder geplanten Veröffentlichungen des Ergebnisses nach Nr.11.

   Wenn zur Wahrung berechtigter Interessen des ZE oder Dritter oder aus anderen sachlichen Gesichtspunkten bestimmte Einzelheiten aus dem Bericht vertraulich zu behandeln sind (z. B. Wahrung der Priorität bei Schutzrechtsanmeldungen), so hat der ZE den ZG ausdrücklich darauf hinzuweisen.

— NKBF 98, Anlage 2

Teil I.

Kurze Darstellung

Kurzbericht 1

1.1 Aufgabenstellung

> Hauptziel des Teilvorhabens der Garrecht Avionik GmbH ist das Erforschen und Erschließen von Technologie. Es soll eine praxistaugliche Mensch-Maschine Schnittstelle in Software erforscht werden, die in verschiedene Systeme integrierbar ist und die Anforderungen des Projekts erfüllt. Die Ergebnisse des Vorhabens sollen nach dessen Abschluss direkt zu marktfähigen Produkten bzw. zu Komponenten in Produkten weiter entwickelt werden. Speziell die Produktreihe an hauseigenen Verkehrsdisplays und Navigationslösungen soll um jene erforschten Softwarekomponenten erweitert werden können.
> — SiFlA-Vorhabensbeschreibung, Teilvorhaben der Firma Garrecht Avionik GmbH, S. 3

1.2 Voraussetzungen des Vorhabens

Das Schleppen von Segelflugzeugen mit Motorflugzeugen ist ein gängiges Betriebsverfahren im Segelflug. Hierfür kommen eine Vielzahl von unterschiedlichen Luftfahrzeugmustern mit einer ebenso breit gefächerten Zulassungsbasis zum Einsatz. Schleppflugzeuge sind u. A. nach den folgenden Regularien zugelassen:

CS-22, Amendment 3 Certification Specifications, Acceptable Means of Compliance and Guidance Material for Sailplanes and Powered Sailplanes [3]

CS-23, Amendment 6 Certification Specifications for Normal-Category Aeroplanes [4]

CS-LSA, Amendment 1 Certification Specifications and Acceptable Means of Compliance for Light Sport Aeroplanes [2]

LTF-UL 2020 Lufttüchtigkeitsforderungen für motorgetriebene, aerodynamisch gesteuerte Ultraleichtflugzeuge [5]

Zwar erlauben die oben genannten Bauvorschriften allgemein die Qualifizierung eines Flugzeugmusters als Schleppflugzeug, doch unterscheiden sie sich in ihren Anforderungen an Autopiloten. Im Falle der LTF-UL 2019 werden Autopiloten nicht näher erwähnt, während bei den anderen Bauvorschriften nicht näher auf die Anforderungen eines Autopiloten im Flugzeugschleppbetrieb eingegangen wird.

Detaillierte Zulassungsanforderungen ergeben sich aus der Luftfahrzeug-unspezfischen Zulassungsvorschrift ETSO-C198 [1] und der darin verwiesenen Norm DO-325 [38]. Zwar wird der Flugzeugschlepp-Betrieb mit einem Autopiloten in keiner der zuvor genannten Quellen explizit ausgeschlossen, jedoch wird das automatisierte Durchführen von Flugzeugschlepps auch nicht implizit behandelt.

Den Konsortialpartnern sind keine Vorgänge bekannt, in denen ein bemannter Flugzeugschlepp eines Segelflugzeugs automatisiert durchgeführt wurde.

Der Flugzeugschlepp mit einem elektrisch angetriebenen Schleppflugzeug wurde hingegen bereits im Jahr 2017 erfolgreich demonstriert [39]. Das dafür verwendete Schleppflugzeug Extra 330LE ist jedoch für den Kunstflug optimiert und findet in der flugbetrieblichen Praxis kaum Anwendung als Schleppflugzeug. Zudem wurden zu dem Vorhaben keinerlei weitere wissenschaftlich auswertbare Daten veröffentlicht, sodass der öffentliche Erkenntnisgewinn jener Fähigkeitsdemonstration überschaubar ist.

1.3 Planung und Ablauf des Vorhabens

Das Forschungsvorhaben wurde durch mittels drei Hauptarbeitspaketen (HAPs) durch die Konsortialpartner bearbeitet. Hierbei brachte sich die Garrecht Avionik GmbH wie folgt ein:

HAP 1 (Systemtechnik & Flugführung) Schwerpunkt der Arbeiten des Zuwendungsempfängers in diesem HAP war das Entwickeln einer geeigneten MMS für den Anwendungsfall des automatisierten

Flugzeugschlepps. Zusammen mit den betroffenen Instituten der Universität Stuttgart wurde erst eine hierarchische Taskanalyse für den konventionellen Flugzeugschlepp durchgeführt [36]. Anschließend wurde mit den Partnern ein FHA in Anlehnung an ARP4761 [31] durchgeführt, um im Systementwurf frühzeitig Risiken für die Besatzungen zu erkennen und zu mitigieren. Da für das FHA jedoch keine geeignete Flugphasentaxonomie zur Verfügung stand, welche die Flugphasen des Schleppflugzeuges geeignet abbildet, wurde diese selbst entwickelt und validiert [35]. Anschließend wurden zusammen mit der Universität Stuttgart die Systemanforderungen an das AFCS erfasst. Hieraus wurde ein Anzeigekonzept entwickelt, welches es der Besatzung erlaubt, das AFCS während des automatisierten Flugzeugschlepps zu überwachen. Nach Erstellung von Konzeptskizzen wurden daraus Software-Requirements in Anlehnung an DO-178C [37] erstellt. Außerdem wurde ein elektronisches Schnittstellenformat zwischen dem AFCS und den Anzeigen der MMS abgestimmt. Anschließend wurden die entsprechenden Anzeigen für die MMS auf bestehender Hardware implementiert. Die fertigen Anzeigen wurden der Universität Stuttgart zur Systemintegration übergeben.

HAP 2 (Antrieb & Infrastruktur) Dieses HAP wurde vollständig durch andere Konsortialpartner bearbeitet. Eine Beteiligung der Garrecht Avionik GmbH war weder geplant noch wurde sie geleistet.

HAP 3 (Lärmmessung & Erprobung) Im Rahmen der Systemintegration und „bench tests“ des AFCS durch die Universität Stuttgart wurde das erste Optimierungspotenzial im Bereich der Kommunikation zwischen AFCS und MMS identifiziert. Anpassungen an der Software der MMS nutzen nun das Potenzial. Während der anschließenden Flugversuche stellte die Besatzung ihre qualitativen Beobachtungen zur MMS zur Verfügung.

1.4 wissenschaftlich-technischer Stand, an welchen angeknüpft wurde

1.4.1 genutzte Konstruktionen, Verfahren und Schutzrechte

genutzte Konstruktionen

Die beiden Anzeigen der MMS wurden auf bestehender Hardware implementiert. Hierbei wurde auf dieselbe Hardware zurückgegriffen, welche im kommerziellen Produkt ATD-57 [22] aus dem Hause Garrecht Avionik zum Einsatz kommt.

Verfahren

Folgende Verfahren wurden während des Forschungsvorhabens durch die Garrecht Avionik GmbH angewandt oder durch dessen Verfahrensergebnisse verwertet.

- Hierarchical Task Analysis nach [6]
- Functional Hazard Assessment nach ARP4761 [31]
- Expertenbefragung (siehe [35])
- Inferenzstatistische Auswertung unter Verwendung des AC_1-Kennwerts nach [23]
- Requirements Capture nach ARP4754A [32] und DO-178C [37]
- Anzeigen-Konzipierung (für Ziele siehe [15])
- System Testing nach ARP4754A [32]
- Flugerprobung [25]

Schutzrechte

Im Rahmen des Forschungsvorhabens wurde durch den Zuwendungsempfänger auf keine Schutzrechte zugegriffen. Zudem wurden keine Schutzrechte geltend gemacht.

1.4.2 verwendete Fachliteratur sowie Informations- und Dokumentationsdienste

Eine Übersicht der verwendeten Literatur ist u. A. im nachfolgenden Literaturverzeichnis sowie in [36] sowie [35] gegeben. Folgende Informations- und Dokumentationsdienste wurden u. A. verwendet.

- firmeninterne Normbibliothek

- Privatbibliothek der Mitarbeiter
- Handbuchsammlungen von Flugschulen
- NASA Technical Report Server
- electronic library des DLR
- universitäre Literaturdatenbanken

1.5 Zusammenarbeit mit anderen Stellen

Neben der Arbeit im Projektkonsortium arbeitete der Zuwendungsempfänger im Rahmen des Forschungsvorhabens mit mehreren anderen Stellen zusammen.

Für die hierarchische Taskanalyse [36] standen Experten zur Verfügung, welche mit folgenden externen Einrichtungen – teils in Personalunion – affiliiert waren.

- Flugwissenschaftliche Vereinigung Aachen
- Akaflieg Stuttgart
- Fränkische Fliegerschule Feuerstein
- Ausbildungsbetrieb in Aeroclub NRW
- Interessengemeinschaft deutscher akademischer Fliegergruppen
- Forschungsflugbetrieb der Fachhochschule Aachen

Für die Expertenbefragung zur Validierung der neuen Flugphasentaxonomie wurde auf Experten folgender Einrichtungen zugegangen:

- EASA
- Flugbetrieb des DLR
- Forschungsflugbetrieb der Fachhochschule Aachen
- Forschungsflugbetrieb der Technischen Universität Darmstadt
- Department of Aerospace Engineering, Toronto Metropolitan University
- BFU
- Luftsportclub Bayer Leverkusen
- Luftsportgruppe Erbslöh Langenfeld
- OSTIV Safety and Training Panel

Zum Austausch bezüglich der Praxistauglichkeit von Elektroflugzeugen in der allgemeinen Luftfahrt wurde Kontakt zum Projektkonsortium des Forschungsvorhabens „Next Generation Electric Flight Training“ geknüpft. Sowohl Vertreter der Fachhochschule Aachen als auch der Westflug Flight Training waren bei der Vor-Ort-Besichtigung der Elektroflugzeuge Velis Electro zugegen.

Teil II.

Eingehende Darstellung

Ergebnisse und Zielerfüllung

Im folgenden Arbeitsbericht werden die bedeutendsten Arbeiten des Forschungsvorhabens aufgeführt, an welchen die Garrecht Avionik GmbH mitgewirkt hat. Zur besseren Nachvollziehbarkeit anhand ihrer Ergebnisse gruppiert und nicht entlang ihrer Arbeitspakete, in welchen sie angefallen sind.

Hierarchische Taskanalyse für den Flugzeugschlepp 2

Um im Rahmen des Forschungsvorhabens für die Automatisierung des Flugzeugschlepps geeignete Aufgaben zu identifizieren, wurde vorerst eine HTA durchgeführt. Sie beantwortet die Frage „Wer macht was im aktuellen Flugzeugschleppverfahren?“

2.1 Methode

Methodisch lehnt sich die HTA an Empfehlungen von Stanton [42] an. Er beschreibt eine HTA als klar strukturierten Prozess, in welchem Expertenwissen qualitativ erfasst und strukturiert wird. Er sieht folgende Schritte vor:

Ziel definieren Das Ziel der HTA ist es, einen Überblick über die Aufgaben zu erhalten, welche aktuell im Flugzeugschlepp durchgeführt werden sollen. Die Granularität dieses Überblicks soll ausreichen, um anhand der Ergebnisse jene Aufgaben zu identifizieren, welche im Rahmen des Forschungsvorhabens zur Automatisierung geeignet sind.

Umfang definieren Prinzipiell wird der Flugzeugschlepp betrachtet, wie er in der deutschen SBO [13] beschrieben wird. Folgende Aspekte bleiben explizit unbeachtet:

- jegliche aktuelle Automatisierung
- Schleppflugzeuge mit Einziehfahrwerk
- Freigaben durch die Flugsicherung
- Schleppbetrieb in Instrumentenflugbedingungen
- Schleppbetrieb ohne Funkverbindung der Teilnehmer
- Überlandflugschlepps
- Versagen des Ausklinkmechanismus
- Schlepplandungen
- Tägliche Vor- und Nachflugkontrollen

Zerlegen von Aufgaben anhand Literatur Die Aufgaben während eines Flugzeugschlepps wurden anhand von bestehender Literatur vorerst erfasst und gegliedert. Hierfür kamen unter anderem folgende Arten von Literatur zum Einsatz: Betriebsordnungen [13], Lehrbücher und Curricula für die Segelfliegerausbildung [12, 20, 7, 27, 24, 43, 41, 26, 30, 17, 14, 9], Literatur zur Schlepppilotenausbildung [40, 8, 10, 11, 21] sowie luftrechtliche Regelwerke [18, AMC1 FCL.805], [19, AMC1 SFCL.205].

Durchsicht der Zwischenergebnisse durch Experten Nachdem ein erster Baum an Aufgaben erstellt wurde, wurden diese Zwischenergebnisse durch insgesamt fünf Experten besprochen und weiter modifiziert, bis Einigkeit über die Aufgabenteilung bestand. Die Experten hatten Erfahrung als Segelfluglehrer, Schlepppiloten, in der Flugerprobung von Schleppflugzeugen und -verfahren, im Forschungsflugbetrieb sowie in der Forschung zum Flugzeugbau. Sie prüften die Zwischenergebnisse auf folgende Punkte:

- Korrektheit
- praktische Vollständigkeit
- Verständlichkeit
- Granularität

2.1.1 Ergebnisse

Abbildungen 2.1 und 2.2 zeigen, dass der Flugzeugschlepp in insgesamt 120 Aufgaben und Unteraufgaben zerlegt wurde. Zudem existieren 19 Voraussetzungen um bestimmte Aufgaben auszuführen. Beteiligt sind neben den Besatzungen der beiden Luftfahrzeuge noch der Startleiter sowie die Bodenmannschaft.

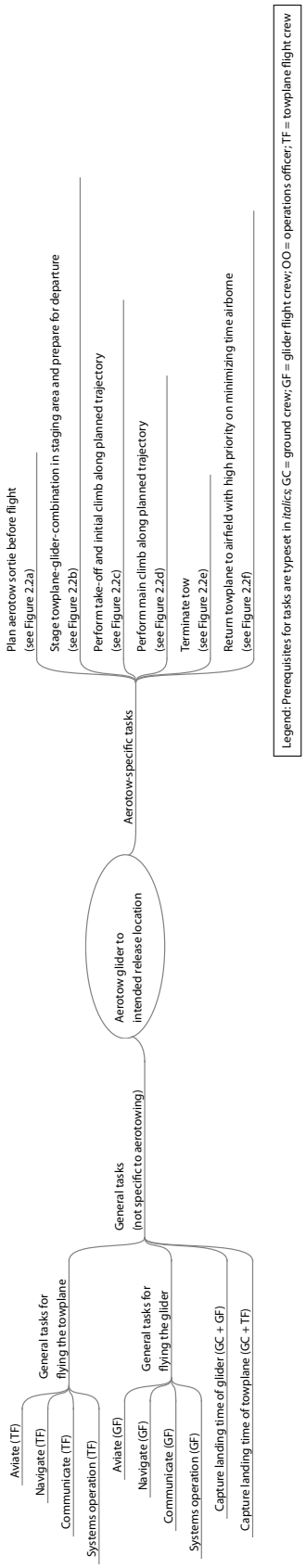


Abbildung 2.1.: Gröbste Aufteilung der Aufgaben während des Flugzeugschlepps

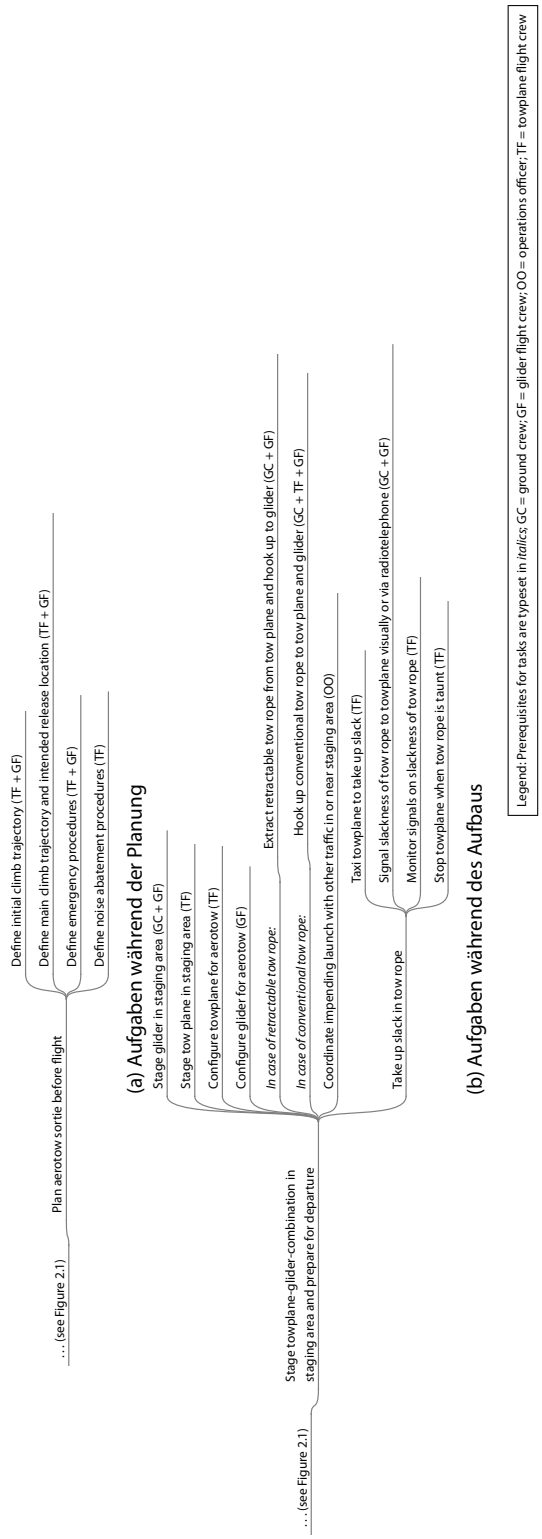
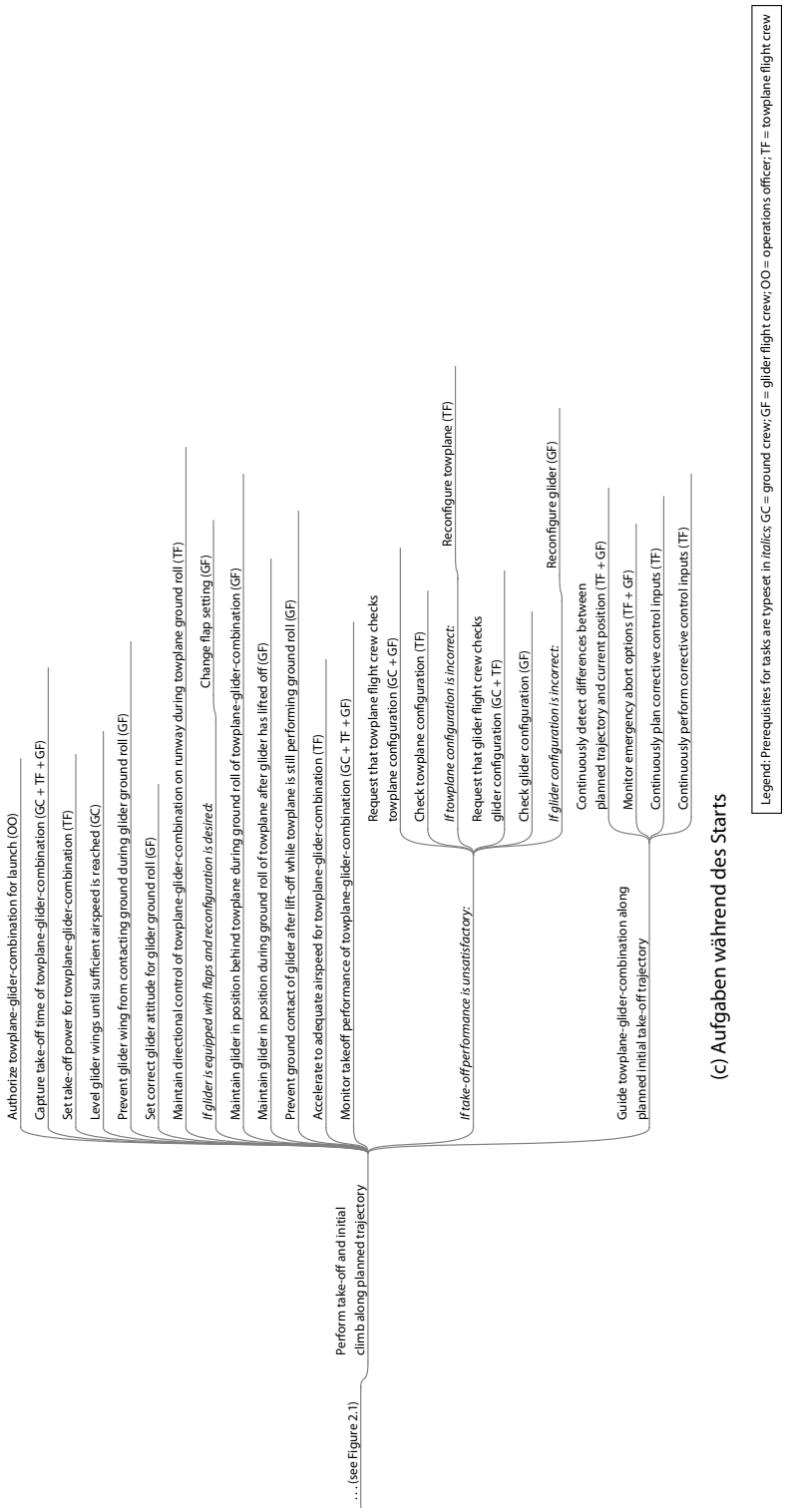


Abbildung 2.2.: Aufgaben während des Flugzeugschlepps



(c) Aufgaben während des Starts

Legend: Prerequisites for tasks are typeset in *italics*; GC = ground crew; GF = glider flight crew; OO = operations officer; TF = towplane flight crew

Abbildung 2.2.: Aufgaben während des Flugzeugschlepps (fortgesetzt)

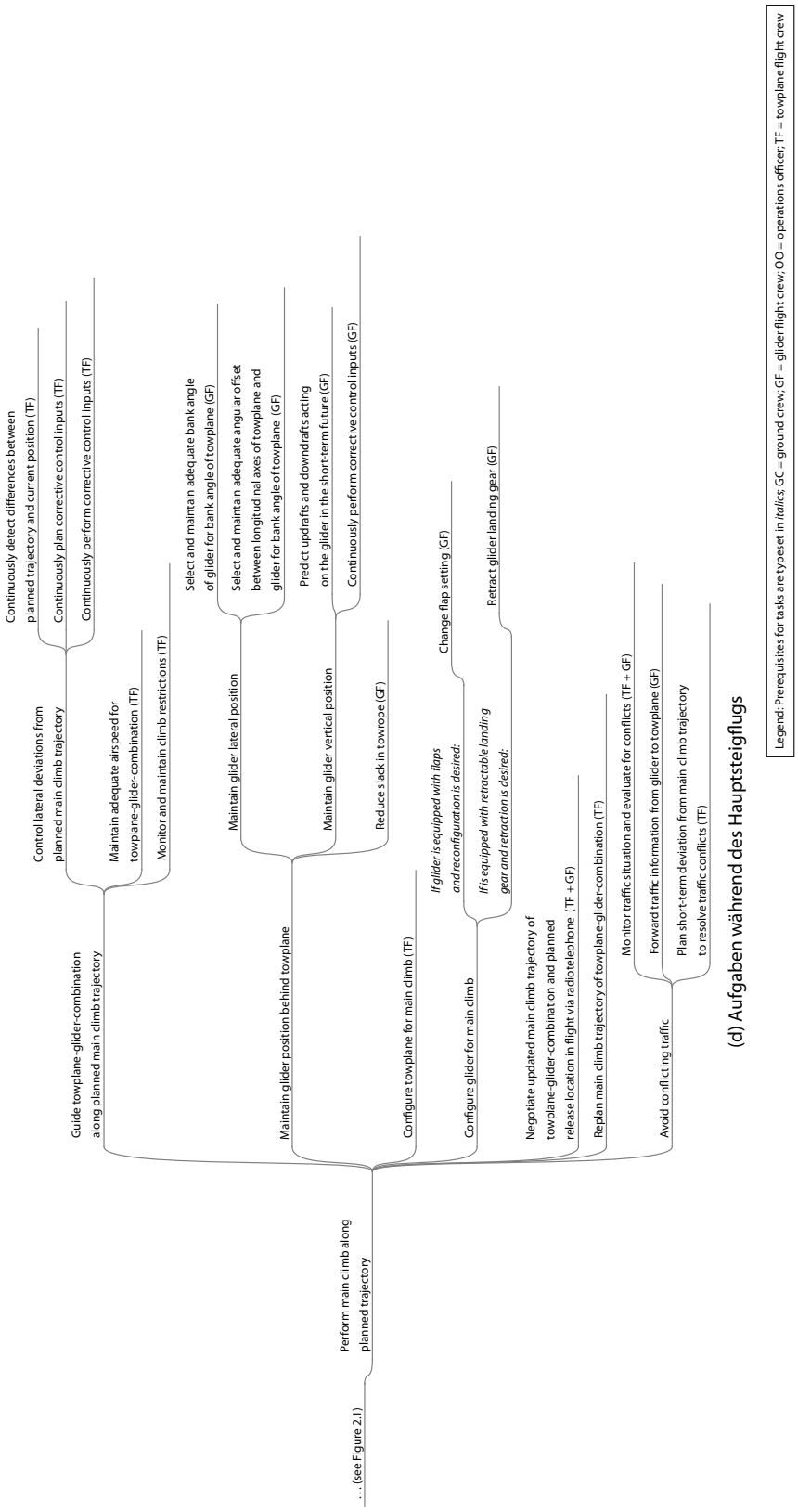


Abbildung 2.2.: Aufgaben während des Flugzeugschlepps (fortgesetzt)

Abbildung 2.2.: Aufgaben während des Flugzeugschlepps (fortgesetzt)

Zur genaueren Fokussierung des Entwicklungsaufwandes wurde ein FHA für das elektronische Flugsteuerungssystem des Forschungsflugzeugs eGenius entwickelt. Hierbei werden die Auswirkungen einer Fehlfunktion im System abhängig von der Flugphase bewertet. Leider erwiesen sich bestehende Flugphasentaxonomien als ungeeignet, sodass eine eigene Taxonomie für das Schleppflugzeug während des Schleppvorgangs entwickelt und validiert werden musste, bevor die FHA abgeschlossen werden konnte.

3.1 Identifizieren und Verifizieren einer geeigneten Flugphasentaxonomie für den Flugzeugschlepp

Um die FHA durchführen zu können, wurde eine neue Flugphasentaxonomien für das Schleppflugzeug während des Schleppvorgangs postuliert. Hierbei wurde die Taxonomie als Zustandsautomat definiert, um einerseits eine Eindeutigkeit der Flugphasenzuordnung zu gewährleisten als auch spätere Automatisierungen zu vereinfachen.

Das Zustandsdiagramm der Taxonomie ist in Abbildung 3.1 dargestellt. Die Transitionsvoraussetzungen zwischen den Zuständen werden in Tabelle 3.1 erläutert.

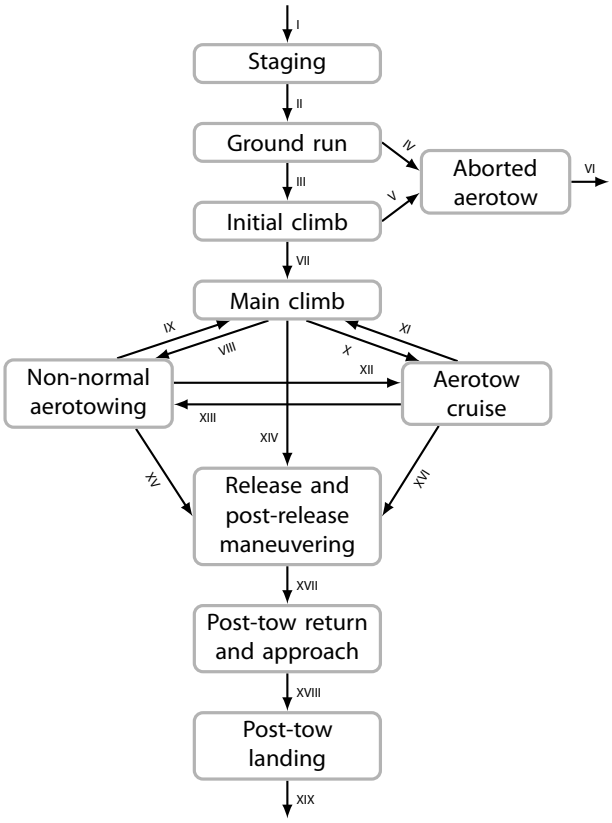


Abbildung 3.1.: Zustandsdiagramm der Flugphasentaxonomie

An einer experimentellen Evaluierung dieser Taxonomie nahmen 13 Experten aus Europa und Nordamerika teil. Sie beschrieben sich als Forschungspiloten, Fluglehrer mit einer Erfahrung von bis zu 2400 Flugzeugschlepps und Erfahrung in der Erprobung von Schleppflugzeugen, Schleppiloten, Unfalluntersucher, Behördenmitarbeiter und Wettbewerbspiloten. Ihnen wurden jeweils 10 Stillbilder, 10 Videosequenzen sowie 10 Textpassagen gezeigt. Jeder dieser Darstellungen sollte die am besten passendste Flugphase des dargestellten Schleppflugzeugs zugeordnet werden. Eine quantitative Auswertung unter Berücksichtigung des AC_1-Koeffizienten nach Gwet [23] ergab eine Übereinstimmung der Experten

Tabelle 3.1.: Transitionsbedingungen der Flugphasentaxonomie

Transition	Criteria
I	towplane is inside staging area AND has a ground speed of walking speed or below
II	take-off power is applied
III	glider main landing gear AND towplane main landing gear having lost ground contact
IV, V	take-off power is reduced with the intent of terminating the ground roll OR tow-rope is released or cut at towplane or glider end
VI	towplane and glider standing still on the ground
VII, IX, XI	altitude of towplane-glider-combination exceeds traffic pattern altitude of the departure runway AND glider's intended position is conventional high-tow position behind towplane AND intended rate of climb is positive
VIII, XIII	glider is intentionally maneuvered out of conventional high-tow position OR towplane-glider-combination is descending with the intent of a coupled landing
X, XII	altitude of towplane-glider-combination exceeds traffic pattern altitude of the departure runway AND glider's intended position is conventional high-tow position behind towplane AND intended rate of climb is zero
XIV, XV, XVI	tow-rope is released or cut at towplane end or glider end, either intentionally or unintentionally
XVII	no notable collision risk between towplane and glider exists
XVIII	towplane enters the landing flare
XIX	towplane is free of landing runway environment AND ground speed is at walking speed or below

mit $AC_1 = 0,74$. Dies entspricht einer nennenswerten Übereinstimmung der Experten und unterstreicht die Praxistauglichkeit der Taxonomie.

Ein weiterer Nachweis der Praxistauglichkeit ist die Tatsache, dass die Taxonomie inzwischen im Forschungsflugbetrieb des Deutsches Zentrum für Luft- und Raumfahrt (DLR) Anwendung findet. DLR Forschungspilot Anton Dilcher entwickelte ein F-Schlepp-Erporbungsprogramm [16] und wendete es bereits auf dem IDAFLIEG-Sommertreffen auf die Evaluierung mehrerer Schleppflugzeuge an. Das Erprobungsprogramm ist so ausgelegt, dass jede in Abbildung 3.1 aufgeführte Flugphase dediziert untersucht wird. Somit bietet die in SiFlA entwickelte Taxonomie inzwischen das Grundgerüst für das F-Schlepp-Erprobungsprogramm des DLR.

3.2 Durchführen und Ergebnisse der FHA

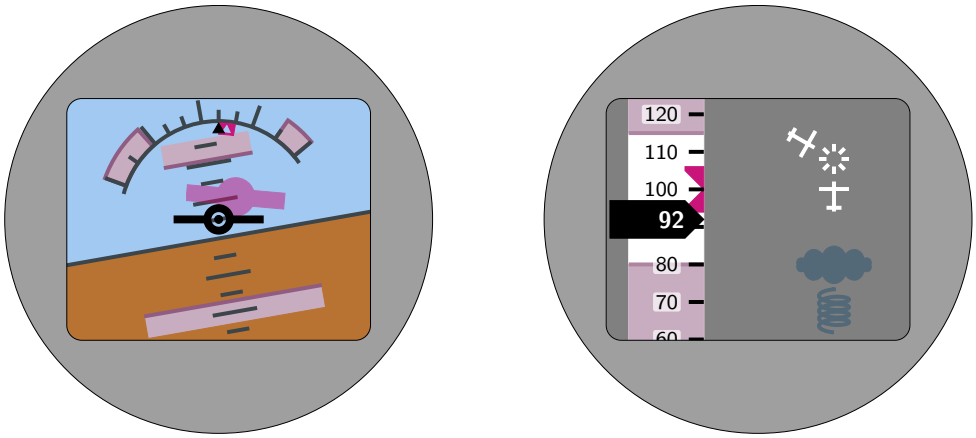
Die Kritikalität von Fehlfunktionen der elektronischen Steuerung während eines Flugzeugschlepps wurde mittels einer FHA nach ARP4761 [31] durchgeführt. Aufgrund der vorhandenen Zulassungserfahrung moderierte die Garrecht Avionik die Durchführung dieser FHA. Erste Iterationen ergaben, dass eine Fehlfunktion beim automatisierten Flugzeugschlepp während des Anfangssteigflugs katastrophale Auswirkungen haben kann. Entsprechend wurde eine Betriebsbeschränkung eingeführt, welche den Betrieb des automatisierten Flugzeugschlepps nur nach Erreichen des Hauptsteigfluges (siehe Abbildung 2.2d) erlaubt. Dennoch bleiben einige Fehlfunktionen als „hazardous“ nach ARP4761 [31] bestehen.

Entwicklung einer Mensch-Maschine-Schnittstelle für den automatisierten Flugzeugschlepp

4

Die Entwicklung der MMS für den automatisierten Flugzeugschlepp – welche den Hauptbeitrag der Garrecht Avionik am Forschungsvorhaben darstellt – verlief unter Berücksichtigung mehrerer Unwägbarkeiten. Sie stellt eine Komponente des elektronischen Flugsteuerungssystems dar. Die MMS-Entwicklung verlief zeitlich parallel mit dem Entwurf der restlichen Systemarchitektur, sodass mehrere Angaben zu noch nicht verfügbaren Eigenschaften getroffen werden mussten.

Das Bedienkonzept der MMS sieht vor, dass die Besatzung des Schleppflugzeugs in der Ausführung des automatisierten Schleppbetriebs überwacht wird. Hierfür werden der Besatzung Soll- und Ist-Größen sowie Betriebsgrenzen des Reglers dargestellt. Da im Instrumentenbrett der eGenius nur sehr begrenzt Platz verfügbar war, wurden die Darstellungen auf zwei separate Anzeigegeräte aufgeteilt; einem *attitude control display* (Abbildung 4.1a) auf dem die Fluglage dargestellt wird, sowie einem *multifunction control display* (Abbildung 4.1b) für Luftdaten und Betriebsmodi.



(a) Skizze des attitude control display

(b) Skizze des multifunction control display

Abbildung 4.1.: Entwurfsskizzen der Mensch-Maschine-Schnittstellen

Die Darstellung des *attitude control display* ist an die Darstellung eines *flight director* angelehnt. Sollwerte für Nick- und Hängewinkel sind über ein „Geisterflugzeug“ vorgegeben, das es zu verfolgen gilt. Zudem sind die Betriebsgrenzen für diese Werte auf den Skalen des künstlichen Horizonts im Hintergrund nachgezeichnet.

Das *multifunction control display* stellt Soll- und Istwerte für die Fahrt dar. Hier wurde auf eine bandartige Darstellung, zusammen mit eingezeichneten Betriebsgrenzen und einem „airspeed bug“, wie sie in modernen Cockpitanzeigen üblich ist, zurückgegriffen. Die in Abbildung 4.1b noch vorhandene symbolische Darstellung der Betriebsmodi wurde im Rahmen iterativer Optimierung auf textuelle Darstellungen umgestaltet.

Das entwickelte Bedienkonzept sieht vor, dass die Anzeigen lediglich zur Darstellung der vom Hauptrechner der elektronischen Flugsteuerung erhaltenen Daten anzeigen. Es ist keinerlei Input der Besatzung via der beiden Anzeigen vorgesehen. Außerdem wurde bei der Farbgebung explizit darauf geachtet, keine Farben zu verwenden, die als luftrechtliche Betriebsgrenzen verstanden werden können.

4.1 Identifizieren von Systemanforderungen

Nachdem die ersten Interaktionskonzepte erstellt wurden, wurden für die MMS die Systemanforderungen in Anlehnung an ARP4754A [32] erfasst. Hierbei kam die EARS-Syntax [28, 29] zur Anwendung, um die Geltungsbedingungen der Anforderungen klarer zu formulieren. Diese Anforderungen wurden regelmäßig mit den Entwicklern der elektronischen Flugsteuerung abgestimmt.

4.1.1 Entwicklung eines Schnittstellenprotokolls

Zur Interaktion mit weiteren Systemkomponenten im elektronischen Steuerungssystem musste ein Schnittstellenprotokoll definiert werden. Die physischen Schnittstellen und darin ausgetauschten Daten stellen immer einen Kompromiss zwischen folgenden Punkten dar:

- Robustheit gegenüber elektromagnetischen Störungen / Integrität
- Stückkosten der Hardwarekomponenten
- Unterbindung der Übertragung überflüssiger Informationen
- Lesbarkeit der Daten zu Debugging-Zwecken

Als Kompromiss dieser widersprüchlichen Punkte wurde ein Einwege-Protokoll definiert, in welchem der Hauptrechner der elektronischen Flugsteuerung, die darzustellenden Daten an das *attitude control display* (Abbildung 4.1a) sowie *multifunction control display* überträgt.

Dieses proprietäre Protokoll ist an das NMEA 0183 Protokoll angelehnt. Hierbei werden vom Hauptrechner auf einen seriellen Datenport Nachrichten folgender Syntax übertragen:

> $SIFLA,<current pitch>,<commanded pitch>,<pitch lower limit>,<pitch upper limit>, <current bank>,<commanded bank>, <bank lower limit>,<bank upper limit>,<current IAS>, <commanded IAS>,<IAS lower limit>,<IAS upper limit>,<mode>* <checksum><cr><lf>

Die entsprechenden Dateninhalte der $SIFLA-Nachricht sind näher in Tabelle 4.1 spezifiziert.

Außerdem schicken das *attitude control display* sowie das *multifunction control display* je eine Heartbeat-Nachricht je Sekunde an den Hauptrechner der elektronischen Flugsteuerung.

Die Implementierung des Protokolls mittels menschenlesbarer ASCII strings anstatt der Verwendung eines binären Datenformats erlaubt ein einfacheres Debuggen in der Implementierung. Es ist für Forschungsprojekte mit einer geringeren Technologiereife als luftfahrtzugelassene Produkte somit angebrachter.

4.2 Identifizieren von Softwareanforderungen

Nachdem die Systemanforderungen für die beiden Anzeigen erfasst waren (siehe Abschnitt 4.1), wurden sowohl für das *attitude control display* sowie für das *multifunction control display* Software High-Level Requirements erfasst. Da sich diese Software-Anforderungen aus den Systemanforderungen ergeben, ist dieses Vorgehen an DO-178C angelehnt [37].

4.3 Implementierung der Mensch-Maschine-Schnittstelle

Software- und Hardware-Entwicklung verfolgten unterschiedliche Ansätze. Während die Software speziell für den Anwendungsfall des Forschungsvorhabens entwickelt wurde, wurde im Falle der Hardware auf bereits bestehende Lösungen zurückgegriffen.

4.3.1 Hardware

Das Zurückgreifen auf bestehende Anzeigegeräte aus dem Hause Garrecht Avionik bot mehrere Vorteile.

- Sparsamer Einsatz der Projektmittel durch Verkürzung des Entwicklungszyklus
- Zugriff auf mit der Hardware kompatibler Software-Entwicklungsumgebung
- Verringerung des Projektrisikos durch im Feld erworbene Erfahrungen mit den Geräten

In die nähere Auswahl kamen die Anzeigegeräte folgender Produkte:

ATD-11 Anzeigegerät zur Aufsteck-Montage auf Instrumentenpilz

ATD-57 Anzeigegerät zur Montage im Instrumentenbrett mit 57 mm Rundausschnitt

ATD-80 Anzeigegerät zur Montage im Instrumentenbrett mit 80 mm Rundausschnitt

Aus Installationsüberlegungen wurde sich für das im ATD-57 verwendete Anzeigegerät entschieden. Dies hatte folgende Beweggründe:

- Verwendung bestehender Ausschnitte im Instrumentenbrett des eGenius
- Keine Sichteinschränkungen für die Luftraumbeobachtung im Vergleich zum ATD-11
- Hohe Zuverlässigkeit durch nahezu identische Hardware wie das Luftfahrt-zugelassene (ETSO-autorisierte) Anzeigegerät ACD-57

Sowohl das *attitude control display* als auch *multifunction control display* wurden auf unabhängigen Hardwaregeräten aus der ACD-57-Reihe implementiert. Abbildung 4.2 zeigt eine gerenderte Darstellung des *attitude control display* auf der Hardware.

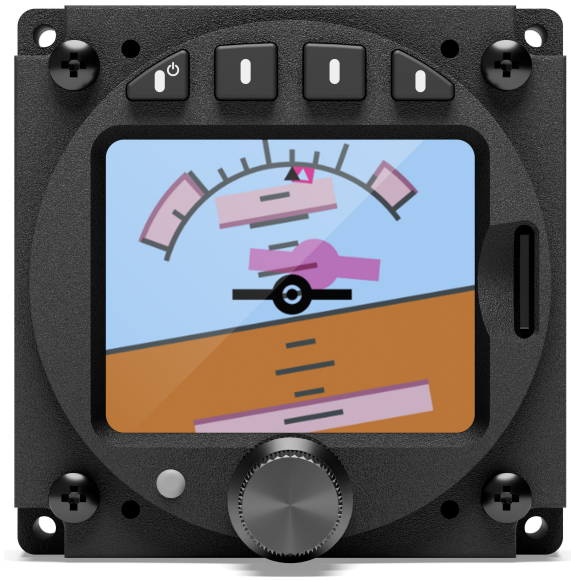


Abbildung 4.2.: Attitude Control Display auf Hardware des ACD-57

4.3.2 Software

Die Software-Entwicklung beider Anzeigeformate (*attitude control display* und *multifunction control display*) wurde mittels in der Entwicklungsumgebung `Atollic TrueSTUDIO® for STM32, Built on Eclipse Neon.1a., Version 9.3.0.` durchgeführt. Als Programmiersprache wurde C verwendet. Außerdem standen proprietäre Bibliotheken für die Displaygestaltung auf der vorhandenen Hardware zur Verfügung.

Tabelle 4.1.: Inhalt der $SIFLA-Nachrichten

Element	Max Bytes	Symbols	Unit	Valid interval	Comment
<current pitch>	3	Signed INT as ASCII string	°	[-90°,90°]	<0 is nose-down; >0 is nose-up; no leading signum is >0
,	1	ASCII String			
<commanded pitch>	3	Signed INT as ASCII string	°	[-90°,90°]	<0 is nose-down; >0 is nose-up; no leading signum is >0
,	1	ASCII String			
<pitch lower limit>	3	Signed INT as ASCII string	°	[-45°,0°]	<0 is nose-down; >0 is nose-up; no leading signum is >0
,	1	ASCII String			
<pitch upper limit>	3	Signed INT as ASCII string	°	[0,45°]	<0 is nose-down; >0 is nose-up; no leading signum is >0
,	1	ASCII String			
<current bank>	3	Signed INT as ASCII string	°	[-90°,90°]	<0 is left wingtip down; >0 is right wingtip down; no leading signum is >0
,	1	ASCII String			
<commanded bank>	3	Signed INT as ASCII string	°	[-90°,90°]	<0 is left wingtip down; >0 is right wingtip down; no leading signum is >0
,	1	ASCII String			
<bank lower limit>	3	Signed INT as ASCII string	°	[-45°,0°]	<0 is left wingtip down; >0 is right wingtip down; no leading signum is >0
,	1	ASCII String			
<bank upper limit>	3	Signed INT as ASCII string	°	[0,45°]	<0 is left wingtip down; >0 is right wingtip down; no leading signum is >0
,	1	ASCII String			
<current IAS>	6	FLOAT as ASCII string	km/h	[0, 200 km/h]	Up to 2 decimal digits possible
,	1	ASCII String			
<commanded IAS>	6	FLOAT as ASCII string	km/h	[0, 200 km/h]	Up to 2 decimal digits possible
,	1	ASCII String			
<IAS lower limit>	6	FLOAT as ASCII string	km/h	[0, 200 km/h]	Up to 2 decimal digits possible
,	1	ASCII String			
<IAS upper limit>	6	FLOAT as ASCII string	km/h	[0, 200 km/h]	Up to 2 decimal digits possible
,	1	ASCII String			
<mode>	1	unsigned INT as ASCII string	-		1=„AP N/A“ 2=„AP OFF“ 3= „AP ON“
	1	ASCII String			checksum delimiter
<checksum>	2	hexadecimal INT as ASCII string			hexadecimal checksum (per NMEA 0813 definition)
<cr><lf>	2	carriage return, line feed			0x0D0A; indicates end of transmission

5.1 Wichtigste Positionen des zahlenmäßigen Nachweises

Tabelle 5.1 stellt die im Forschungsvorhaben durch die Garrecht Avionik GmbH abgerechneten buchhalterischen Positionen dar. Hieraus ist ersichtlich, dass die kostenmäßig größte buchhalterische Position durch Personalkosten gestellt wird. Dies ist insofern schlüssig, als die angemessene Bearbeitung der bewilligten Arbeitspakete primär mittels Personaleinsatz sichergestellt werden konnte (siehe folgenden Abschnitt).

Tabelle 5.1.: Beanspruchte buchhalterische Positionen im Forschungsvorhaben

Position	Beschreibung
0837	Personalkosten
0847	vorhabenspezifische Abschreibungen
0838	Reisekosten

Darstellung der Positionen in absteigender Reihenfolge; Position mit umfangreichsten Kosten zuerst

5.2 Notwendigkeit und Angemessenheit der geleisteten Projektarbeit

Die bewilligten Arbeitspakete waren primär konzeptionell, analytisch und implementierend-programmierend. Die Arbeitsanteile der Garrecht Avionik GmbH konnten und mussten fast ausschließlich durch den Einsatz von fachlich hochqualifiziertem Personal gelöst werden. Das eingesetzte Personal der Garrecht Avionik GmbH umfasste

den Chief Operating Officer zur Koordinierung der projektbezogenen Öffentlichkeitsarbeit,

den Chief Technology Officer zur Implementierung der Embedded Software,

zwei Ingenieuren mit Master-Abschluss zur Fertigung von Hardware für Entwicklungszwecke, und

einen promovierten Ingenieur mit Schwerpunkterfahrungen in der Entwicklung und Evaluierung von MMSen zur konzeptionellen und analytischen Arbeit, Durchführung der Sicherheitsanalysen sowie zur fachlichen Projektleitung.

In Anbetracht der gewonnenen Projektergebnisse und des dafür notwendigerweise eingesetzten hoch qualifizierten Personals erscheinen die geleisteten Arbeiten und damit einhergehenden Kosten als angemessen.

5.3 Voraussichtlicher Nutzen

Folgende Arbeitsergebnisse bringen einen expliziten Nutzen für zukünftige Entwicklungsvorhaben.

- hierarchische Taskanalyse
- Flugphasentaxonomie
- konzipierte Mensch-Maschine-Schnittstelle

Die HTA zu bestehenden Betriebsverfahren im Flugzeugschlepp erweitert ähnliche Arbeiten, welche sich zuvor auf die Besatzung des Segelflugzeugs konzentrierten. Durch die Erweiterung um weitere Akteure – nämlich um das Bodenpersonal und die Besatzung des Schleppflugzeugs – steht eine umfassendere Analyse zur Verfügung. Durch die klare Zuweisung von Verantwortlichkeiten ist die Analyse dazu geeignet, Ausbildungsinhalte und -materialien für alle Beteiligten am Flugzeugschlepp zu untermauern. Außerdem kann die Analyse dazu genutzt werden, neben geeigneten Funktionen für Automatisierungssysteme auch Funktionen für Assistenzsysteme zu identifizieren und somit die Mensch-Maschine-Kollaboration

im Flugzeugschlepp zukünftig zu beeinflussen. Diese Automatisierungs- und Assistenzsysteme können sowohl bodengebunden als auch in den beteiligten Luftfahrzeugen installiert sein. Durch die Verbreitung der Ergebnisse über die Fachzeitschrift *Technical Soaring* [36] werden sie direkt möglichen Nutzern im Bereich der Segelflugentwicklung präsentiert.

Während der Nutzen der durchgeführten HTA voraussichtlich in der Ausbildung von Luftfahrtpersonal und den ersten Schritten des Systementwurfs von Luftfahrtsystemen (siehe hierzu [33]) liegt, ist der voraussichtliche Nutzen der Flugphasentaxonomie ein anderer. Sie wurde erfolgreich im Rahmen eines Functional Hazard Assessment (siehe hierzu [34]) angewandt. Ähnliche Taxonomien werden bereits für die Kodierung von Unfällen und Zwischenfällen in der Luftfahrt verwendet. Es ist davon auszugehen, dass die neue Flugphasentaxonomie auch für diese Anwendungen geeignet ist und somit zur statistischen Auswertung von sicherheitsrelevanten Ereignissen dienen kann.

Wie in Abschnitt 3.1 bereits geschildert, findet die Flugphasentaxonomie bereits Anwendung im Forschungsflugbetrieb des DLR. Sie bildet die Grundlage für ein dort neu entwickeltes Erprobungsprogramm von Schleppflugzeugen.

Der Nutzen der vom Zuwendungsempfänger entwickelten MMS ist jedoch stark durch den verfügbaren Bauraum im Forschungsflugzeug eGenius eingeschränkt. So standen für die Entwicklung nur zwei Anzeigegeräte mit rechteckigen Bildschirmen zur Verfügung, welche in Rundausschnitte mit einem Durchmesser von 57 mm passen. Außerdem ist sie für eine Nischenanwendung in der Forschung, den automatisierten Flugzeugschlepp, entwickelt. Von einer nennenswerten Verwertung der Anzeige außerhalb des Forschungskontexts ist nicht auszugehen.

Ungeachtet dessen möchte dir Garrecht Avionik GmbH den weiteren wissenschaftlich-technischen Erfolg des Forschungsvorhabens unterstreichen. Dieser beinhaltet nicht nur die wissenschaftlichen Veröffentlichungen [36, 35], die unter Federführung der Garrecht Avionik GmbH entstanden sind. Eine weitere volkswirtschaftlich bedeutende wissenschaftlich-technische Verwertung findet in der Qualifizierung des technisch-wissenschaftlichen akademischen Nachwuchses statt. Mehrere Studierende der Universität Stuttgart fertigten Abschlussarbeiten im Rahmen des Vorhabens an. Zudem ist davon auszugehen, dass mehrere Mitarbeiter der Universität Stuttgart aufbauend auf den Projektergebnissen ein Promotionsverfahren zum Dr.-Ing. erfolgreich durchlaufen werden.

In diesem Zusammenhang möchte die Garrecht Avionik GmbH auf die besondere Eignung von Forschungsvorhaben in der allgemeinen Luftfahrt zur Qualifikation des wissenschaftlich-technischen Nachwuchses aufmerksam machen. Anders als Verkehrsflugzeuge sind bemannte Luftfahrzeuge der allgemeinen Luftfahrt in ihrer Komplexität meist als Gesamtsystem von Studierenden und Nachwuchswissenschaftlern durchdringbar. Dies fördert das Gesamtsystemverständnis, was wiederum zum interdisziplinären Arbeiten einlädt und fördert die Motivation während der Bearbeitung der Forschungsfragen. In diesem Sinne amortisieren sich volkswirtschaftliche Investitionen in die Qualifikation des wissenschaftlich-technischen Nachwuchses über ein gesamtes Berufsleben.

5.4 Bekannter zeitgleicher Fortschritt anderer Stellen

Es ist kein relevanter zeitgleicher Fortschritt von anderen Stellen während der Projektlaufzeit bekannt geworden. Die letzten bekannten Arbeiten von Extra und Siemens im Bereich des Flugzeugschlepps von bemannten Segelflugzeugen mit elektrisch angetriebenen Schleppflugzeugen fanden 2017 statt [39]. Somit ist davon auszugehen, dass diese Arbeiten seither eingestellt wurden. Vollständig unbekannt sind Arbeiten anderer Stellen im Bereich der Automatisierung von Flugzeugschleppverfahren für bemannte Segel- und Schleppflugzeuge.

Während der Laufzeit des Forschungsvorhabens veröffentlichte die Norminstitution SAE International Neufassungen der Normen ARP4754A [32] und ARP4761 [31]. An diese ursprünglichen Normen lehnte sich das Projektkonsortium an, um das Functional Hazard Assessment und die ersten Schritte des Systementwurfs durchzuführen. Ende 2023 wurden die beiden Normen durch die überarbeiteten Fassungen ARP4754B [33] und ARP4761A [34] ersetzt. Die vorgenommenen Änderungen betreffen jedoch keine der Aspekte, welche durch das Forschungsvorhaben berührt werden.

5.5 Erfolgte und geplante Veröffentlichungen der Ergebnisse

Die im Rahmen des Forschungsvorhabens durch die Garrecht Avionik GmbH entwickelte und verifizierte Flugphasentaxonomie (siehe Abschnitt 3.1) wurde in der Fachzeitschrift *Aviation Psychology and Applied Human Factors* veröffentlicht [35]. Das dazugehörige Manuskript durchlief im Rahmen der Veröffentlichung ein „double blind peer review“ unter Einbindung zwei unabhängiger Reviewer.

Des Weiteren wurde ein gemeinsam von Garrecth Avionik und der Universität Stuttgart verfasster Artikel zur Taskanalyse (siehe Abschnitt 2) in der Fachzeitschrift *Technical Soaring* veröffentlicht. Auch dieses Manuskript durchlief ein „double blind peer review“ durch zwei unabhängige Reviewer. [36]

Literaturverzeichnis 6

[1] EASA. Decision 2013/012/R of the Executive Director of the European Aviation Safety Agency of 12th July 2013 adopting amendment 8 of Decision No 2003/10/RM of the Executive Director of the Agency of 24 October 2003 on Certification Specifications, including Airworthiness Codes and Acceptable Means of Compliance, for European Technical Standard Orders (CS-ETSO), 2013.

[2] EASA. Decision 2013/015/R of the Executive Director of the Agency of 29th July 2013 adopting Amendment 1 of the Certification Specifications for Light Sport Aeroplanes (CS-LSA), 2013.

[3] EASA. Executive Director Decision 2021/013/R of 15 September 2021 issuing Amendment 3 to the Certification Specifications for Sailplanes and Powered Sailplanes 'CS-22 Amendment 3', 2021.

[4] EASA. Executive Director Decision 2023/002/R of 27 February 2023 issuing the following: Amendment 6 to the Certification Specifications for Normal, Utility, Aerobatic and Commuter Category Aeroplanes (CS-23) 'CS-23 — Amendment 6' and Issue 4 of the Acceptable Means of Compliance and Guidance Material to the Certification Specifications for Normal, Utility, Aerobatic and Commuter Category Aeroplanes (AMC and GM to CS-23) 'AMC and GM to CS-23 — Issue 4', 2023.

[5] LBA. Bekanntmachung von Lufttüchtigkeitsforderungen für motorgetriebene, aerodynamisch gesteuerte Ultraleichtflugzeuge* LTF-UL. Nachrichten für Luftfahrer 2-547-20, DFS, 2020.

[6] J. Annett and K. D. Duncan. Task analysis and training design. Report ED 019 566, U.S. Department of Health, Education & Welfare: Office of Education, Washington, DC, 1967.

[7] Karl-Heinz Apel. *Segelflug Praxis: Ausbildung, Weiterbildung, Inübunghaltung*. Deutscher Aero Club Wirtschaftsdienst, 2 edition, 1996.

[8] Approved Training Organization DE.ATO.NWDU.150. *Organisationshandbuch für die Ausbildung zur Privatpilotenlizenz, Ballonpilotenlizenz, Segelflugpilotenlizenz und den dazugehörigen Berechtigungen*. Aeroclub NRW, 2020. Revision 2.1.

[9] Approved Training Organization DE.ATO.NWDU.150. *Trainings-Manual Segelflug (inkl. Grundausbildung TMG): nach den Richtlinien für die Ausbildung zum Segelflugzeugführer den Vorschriften gemäß VO (EU) Nr. 2018/1976 Anhang III („Teil-SFCL" und gültiger „AMC")*. Aeroclub NRW, 2021.

[10] Approved Training Organization DE.BW.ATO.101. *Berechtigung zum Schleppen von Segelflugzeugen und Bannern [Ausbildungsnachweis]*. Aeroclub Baden-Württemberg, 2015. Version 1.3.

[11] Approved Training Organization DE.BW.ATO.101. *Trainingshandbuch 2.0 zum Ausbildungslehrgang Segelflugzeug-Schlepp (TMG), Banner-Schlepp (TMG)*. Aeroclub Baden-Württemberg, 2020.

[12] Bundeskommission Segelflug. Methodik der Segelflugausbildung: Praktische Ausbildung, 2017.

[13] Bundeskommission Segelflug. Segelflugsport-Betriebs-Ordnung, 2017.

[14] Dirk Corporaal. *Segelfliegen Grundausbildung*. Referent Ausbildung/Lizenzen der Bundeskommission Segelflug im Deutschen Aero Club, 2 edition, 2020.

[15] Michael T. Curtis, Florian Jentsch, and John A. Wise. *Human Factors in Aviation*, chapter Aviation Displays, pages 439–478. Elsevier, 2010.

[16] Anton Dilcher. Development of a flying qualities assessment program to determine the suitability of light aircraft for the glider towing role. Studienarbeit, Technische Universität Braunschweig, 2024.

[17] Martin Dinges. *Die Entwicklung der Thermik im Gebirge: und weitere Aufsätze zum Alpensegelflug*. 2010.

[18] European Aviation Safety Agency. Easy access rules for flight crew licencing (Part-FCL), August 2020.

[19] European Aviation Safety Agency. Easy access rules for sailplanes, 2020.

[20] Federal Aviation Administration. Glider flying handbook, 2013.

[21] Fränkische Fliegerschule Feuerstein. *Ausbildungshandbuch TM-B: Anlage Syllabus Schleppberechtigung Segelflug*. Selbstverlag, 2014.

[22] Garrecht Avionik. AIR Traffic Displays: Installation Manual. MAN0020A0003, 2024. Version 5.0.

[23] Kilem L. Gwet. Testing the difference of correlated agreement coefficients for statistical significance. *Educational and Psychological Measurement*, 76:609–637, 2016.

http://dx.doi.org/10.1177/0013164415596420.

[24] Winfried Kassera. *Flug ohne Motor: Das Lehrbuch für Segelflieger*. Motorbuch, 23 edition, 2020.

[25] Ralph D. Kimberlin. *Flight Testing of Fixed-Wing Aircraft*. AIAA Education Series. American Institute of Aeronautics and Astronautics, 2003.

[26] Thomas L. Knauff. *After Solo*. Selbstverlag, 3 edition, 1995.

[27] Dieter Maier. *Segelfliegen: Theorie und Praxis*. Herbig, 3 edition, 1993.

[28] Alistair Mavin and Philip Wilkinson. Big ears (the return of ëasy approach to requirements engineering"). In *18th IEEE International Requirements Engineering Conference*, pages 277–282, 2010. http://dx.doi.org/10.1109/RE.2010.39.

[29] Alistair Mavin, Philip Wilkinson, Adrian Harwood, and Mark Novak. Easy Approach to Requirements Syntax (EARS). In *17th IEEE International Requirements Engineering Conference*, pages 317–322, 2009. http://dx.doi.org/10.1109/RE.2009.9.

[30] Derek Piggott. *Understanding Gliding*. A&C Black, 3 edition, 1996.

[31] S-18. Guidelines and methods for conductingthe safety assessment process on civil airborne systems and equipment. ARP4761, SAE International, 1996.

[32] S-18. Guidelines for development of civil aircraft and systems. ARP4754A, SAE International, 2010.

[33] S-18. Guidelines for development of civil aircraft and systems. ARP4754B, SAE International, 2023.

[34] S-18. Guidelines and methods for conductingthe safety assessment process on civil airborne systems and equipment. ARP4761A, SAE International, 2023.

[35] Christoph G. Santel. Confronting aerotowing experts with a new phase-of-flight taxonomy for towplanes. *Aviation Psychology and Applied Human Factors*, 13(1):39–46, 2023. http://dx.doi.org/10.1027/2192-0923/a000241.

[36] Christoph G. Santel, Andreas Bender, and Andreas Strohmayer. Working both ends of the tow rope: A hierarchical task analysis of glider aerotow operations. *Technical Soaring*, 46(3):15–27, 2022. Tatsächliches Publikationsdatum lag im Juni 2024.

[37] SC-205. Software considerations in airborne systems and equipment certification. DO-178C, RTCA, 2011.

[38] SC-220. Minimum operational performance standards (MOPS) for automatic flight guidance and control systems and equipment. DO-325, RTCA, 2010.

[39] Siemens AG. Elektromotor stellt zweifachen Geschwindigkeitsrekord auf. Pressemitteilung PR2017040256CODE, April 2017. URL https://press.siemens.com/global/de/pressemitteilung/elektromotor-stellt-zweifachen-geschwindigkeitsrekord-auf.

[40] Soaring Safety Foundation. American soaring signals, 2007.

[41] Soaring Society of America. *Soaring Flight Manual: Private/commercial*. Jeppesen Sanderson, 1998.

[42] Neville Stanton. Hierarchical task analysis: Developments, applications, and extensions. *Applied Ergonomics*, 37(1):55–79, 2006. http://dx.doi.org/10.1016/j.apergo.2005.06.003.

[43] Fred W. Weinholtz, Dieter Franzen, and Peter Prybylski. *Der Segelflugzeugführer: Aus- und Weiterbildung*. Schiffmann, 8 edition, 1997.