

Schlussbericht

MASTER 360

Konzept für eine automatisierte Flugführung im ersten und letzten Flugsegment von Hubschraubern

Förderkennzeichen 20D1905F

Gefördert durch:



Bundesministerium
für Wirtschaft
und Energie

aufgrund eines Beschlusses
des Deutschen Bundestages

AIRBUS HELICOPTERS DEUTSCHLAND GmbH

Übersicht

Zweck

Das vorliegende Dokument enthält für die AIRBUS HELICOPTERS DEUTSCHLAND GmbH den offiziellen Schlussbericht des Fördervorhabens MASTER 360. Er enthält die Berichterstattung über die im Rahmen des Projekts durchgeführten Aktivitäten und deren Ergebnisse.

Das Vorhaben Master 360 wurde aufgrund eines Beschlusses des Deutschen Bundestages durch das Bundesministerium für Wirtschaft und Energie gefördert.

Inhalt

Übersicht	2
A Aufgabenstellung.....	5
A.1 Voraussetzungen, unter denen das Vorhaben durchgeführt wurde.....	6
A.2 Planung und Ablauf des Vorhabens	7
A.3 Wissenschaftlicher und technischer Stand an dem angeknüpft wurde.....	9
A.4 Darstellung der wissenschaftlichen-technischen Ergebnisse	10
HAP1 Optimierung UAV Luftraumnutzung.....	10
AP1.1 Modellierung neuer Verkehrsteilnehmer.....	10
AP1.2 Definition Verkehrsszenarien	10
AP1.6 Anforderungen Systemkomponenten.....	10
HAP2 Virtuelle Entwicklungs- und Testumgebung.....	10
AP2.1 Anforderungen und Systemkonzept	10
HAP3 Rundumsicht-Radar.....	11
AP3.1 Anforderungen und Systemdesign	11
AP3.2 Untersuchung koexistente UAV RF Systeme.....	11
HAP4 ATOL - Multisensor-Datenfusion	11
AP4.1 Anforderungen ATOL Position und Objekte	11
AP4.2 Systemdesign Kamerasystem (VIS+IR)	12
AP4.4 Systemdesign Datenfusion Radar-Optik	12
AP4.6 Design und Implementierung Landepunkt-Identifizierung	12
AP4.7 Design und Implementierung Hinderniserkennung und Position.....	13
AP4.8 AI-Algorithmen und Datenbank	13
HAP5 ATOL - Flugpfad, Flugsteuerung und HMI.....	14
AP5.1 Anforderungen und Design Gesamtfunktion ATOL.....	14
AP5.2 Design Flugpfadplanung und Datenfusion	14
AP5.3 Implementierung Flugpfadplanung	14
AP5.4 Implementierung ATOL Flugsteuerung	14
AP5.5 Design und Implementierung HMI für ATOL	15
AP5.6 Test ATOL in flight simulation	16
HAP7 Funktions- und Integrationsnachweis	16
AP7.2 Testrig und Integrationskonzept Helikopter.....	16
AP7.4 Einrüstung Gesamtsystem in Helikopter	17
AP7.6 Flugversuche für ATOL mit Helikopter	17
1. Flugkampagne: Datenerhebungsflüge	17
2. Flugkampagne: Demonstratorflug	17

AP7.7 Auswertung und Dokumentation Testergebnisse	18
A.5 Wichtige Positionen des zahlenmäßigen Nachweises	19
A.6 Notwendigkeit und Angemessenheit der geleisteten Arbeit	19
A.7 Voraussichtlicher Nutzen und Verwertbarkeit der Ergebnisse	20
A.8 Fortschritt auf dem Gebiet des Vorhabens bei anderen Stellen	20
A.9 Veröffentlichungen	21
Abkürzungsverzeichnis / Glossar	22

A Aufgabenstellung

Airbus Helicopters konzentrierte sich in seinem Anteil des Vorhabens auf den automatischen Start und das Landen (ATOL) eines Hubschraubers. Dazu wurde das erste bzw. das letzte Segment des Flugs von bzw. zu einem offiziellen Hubschrauberlandeplatz automatisiert. Im operationellen Betrieb werden diese Segmente in der Regel nach Sichtflugregeln geflogen. Für das Landesegment erfolgte die Automatisierung vom Übergabepunkt aus dem Instrumentenflug bis hin zum Bodenkontakt, beim Start vom Boden bis zur Übergabe an den Piloten im Vorwärtsflug. Das Konzept beinhaltete das Erkennen des Landepunktes, die Bildung eines Sicherheitskorridors zwischen den detektierten Hindernissen, die Berechnung eines optimierten Flugpfads und das automatische Abfliegen durch das automatische Flugsteuerungssystem (Autopilot). Für die Erkennung von Hindernissen wurde ein Kamerasystem verwendet, das Video-/ Bilddaten durch Computer Vision Algorithmen, die auf Deep Learning mit Convolutional Neural Networks basierten, auswertete, um Objekte zu klassifizieren. Zudem wurde ein Simultaneous Localisation and Mapping (SLAM) Algorithmus angewandt, der gleichzeitig die Position lieferte und Flugbereichszonen, die Hindernisse enthielten und somit im Flug vermieden werden mussten. In die anschließende Datenfusion dieser Daten wurde eine hochauflösende Gelände- und Hindernisdatenbank mit einbezogen, was eine Erhöhung der Integrität der Positionsbestimmung gegenüber reiner Satellitennavigation erlaubte. Diese Positions-, Hindernis- und Objektdaten wurden unter Verwendung weiterer KI-Algorithmen in die Flugpfadberechnung einbezogen und unter Berücksichtigung operationeller Randbedingungen vom Autopiloten des Hubschraubers vollautomatisch abgeflogen. Über eine HMI Schnittstelle wurde der Pilot im Cockpit zu jedem Zeitpunkt über den Verlauf im Flugsegment informiert. Im Rahmen des Projektes wurde ebenfalls ein Terrain Radar im Hubschrauber zur Datengewinnung integriert.

A.1 Voraussetzungen, unter denen das Vorhaben durchgeführt wurde

Airbus Helicopters ist der führende Hersteller von Hubschraubern in Europa mit weltweitem Einsatz der Hubschrauber. Airbus Helicopters hat umfangreiche Erfahrungen in der Integration von Systemen an Bord von Hubschraubern mit dem Ziel, den Piloten in der Flugführung zu unterstützen, um damit die Sicherheit beim operationellen Einsatz unter teils schwierigen Bedingungen zu erhöhen. Die im Rahmen der verschiedenen Forschungsprojekte gewonnenen Erfahrungen über die Komplexität und teilweise schwierigen Randbedingungen für den Einsatz von neuartigen Sicherheitssystemen an Bord von Hubschraubern sind gute Voraussetzung, Anforderungen unter der Berücksichtigung verschiedenster Aspekte zu definieren oder auch zu adjustieren. Durch den direkten Kontakt zum Hubschrauberendkunden können außerdem Kundenanforderungen direkt in das Projekt mit einfließen. Schlüsselkompetenzen im Bereich der Hubschrauber-Gesamtavionik, der Zulassung und der Durchführung von Flugtests haben entscheidend dazu beigetragen, das Projekt erfolgreich umzusetzen.

Im bereits abgeschlossenen LuFo V-3 Vorhaben HELIPAS-OW wurde an innovativen Pilotenassistentenfunktionen mit modernen Head-up Displaysystemen und Missionsplanungsfunktionen zur Erweiterung des Situationsbewusstseins für die Mission Offshore Wind geforscht. Master 360 konnte hier an die Grundlagenergebnissen eines solchen Systemkonzeptes anknüpfen, um die Schnittstelle zum Piloten hinsichtlich automatisierter Start- und Landevorgängen (ATOL) entsprechend zu erweitern. Des Weiteren entstand eine enge Verzahnung zum LuFo V-3 Vorhaben SESYMM, wo für den automatisierten Start- und Landevorgang die Teilsegmente „Lift Off“ & „Touch Down“ ergänzend erforscht wurden.

A.2 Planung und Ablauf des Vorhabens

In HAP1 unterstützte AHD die Partner bei der Modellierung der spezifischen Eigenschaften von Hubschraubern als Teilnehmer in den verschiedenen Verkehrsszenarien sowie bei den High-Level-Anforderungen an die Systemkomponenten. In HAP2 trug AHD zur Anforderungsbeschreibung an die virtuelle Testumgebung bei und brachte die hubschrauber-spezifischen Eigenschaften ein. In HAP3 definierte AHD die Anforderungen für die Integration des Radars und dessen Leistung. In HAP4 wurde die Erkennung von Hindernissen und Objekten auf einer rein kamerabasierten Lösung unter Nutzung künstlicher Intelligenz-Algorithmen untersucht. AHD entwickelte das Systemdesign und die Implementierung der Anteile Landepunkt-Identifizierung und Hinderniserkennung, beides unter Nutzung von Computer Vision Algorithmen, die auf neuronalen Netzen basierten. Die KI-Algorithmen wurden mit simulierten und erlogenen Trainingsdaten trainiert und validiert. Eine hochaufgelöste Datenbank lieferte Gelände- und Hindernisdaten und wurde zudem zur georeferenzierten Positionsbestimmung eingesetzt. HAP5 umfasste die Systementwicklung für die gesamte ATOL Funktion, inkl. der Erstellung der operationellen Konzepte, der Anforderungen, der Safety-Analyse und die Systemarchitektur. Es wurden die Anteile für die Flugpfadplanung inkl. Datenfusion, das Flugsteuerungssystem und das HMI-Konzept spezifiziert, entworfen, und auf flugfähiger Hardware implementiert. In HAP7 wurde die Integration vorgenommen und der Funktionsnachweis erbracht, zunächst in einer Rig-Integration, folgend mit einer experimentellen Integration auf dem Forschungshubschrauber Pioneer Lab. Anschließend wurden Flugversuche durchgeführt, um die ATOL Funktion im Flug zu demonstrieren. Zum Abschluss wurden die Testergebnisse analysiert und dokumentiert.

Im Projektverlauf ist es durch verschiedene Gründe zu einer allgemeinen Verschiebung im zeitlichen Verlauf der Arbeitsplanung gekommen. Neben zeitlichen Verzögerungen, die aufgrund der Komplexität und den damit verbundenen zusätzlichen Iterationsschritten entstanden sind, ist es auch zu zeitlichen Verzögerungen bedingt durch Lieferproblemen in der Lieferkette bei verschiedenen Kaufteilen gekommen.

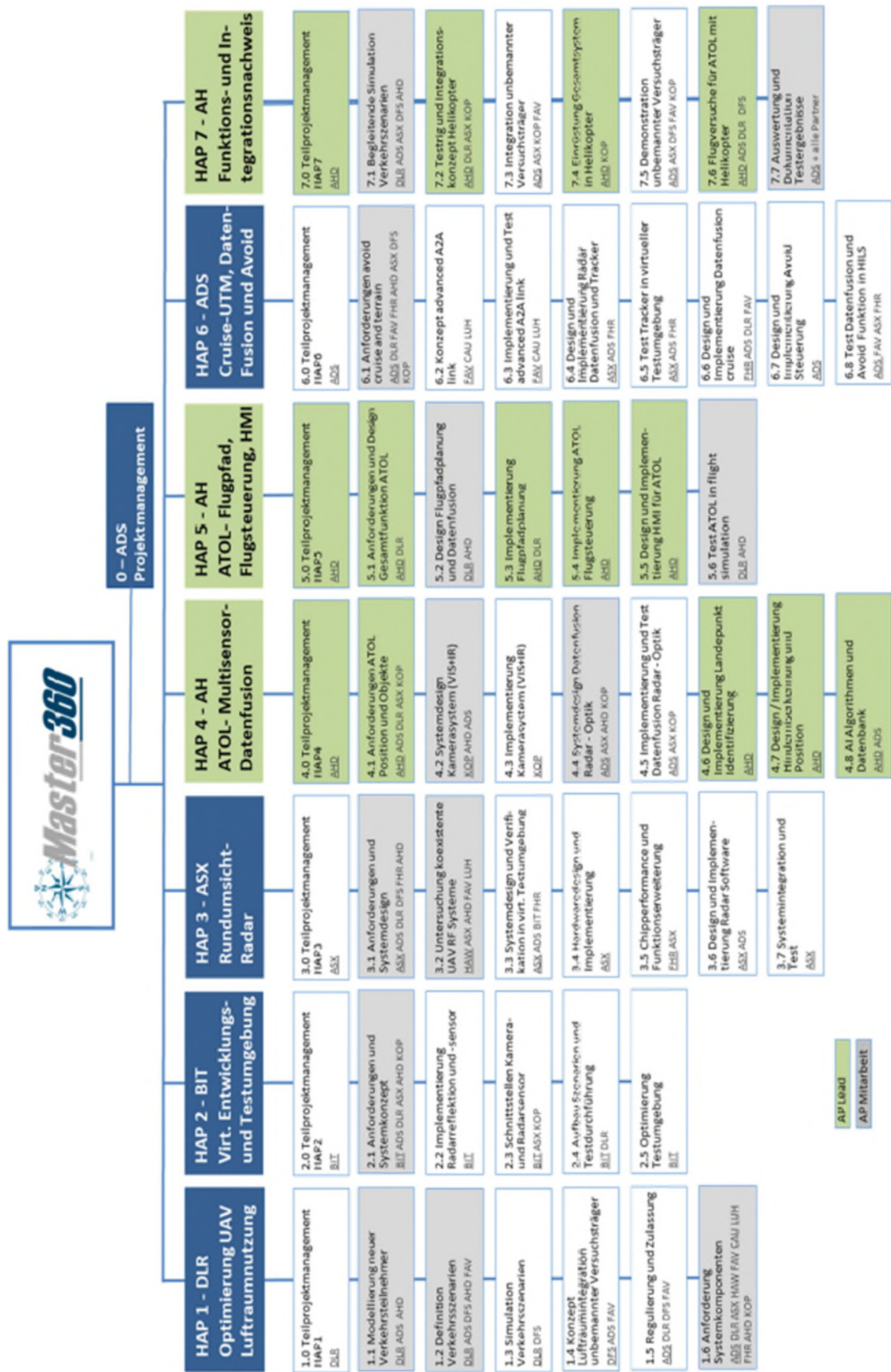


Abbildung 1: Projektstrukturplan

A.3 Wissenschaftlicher und technischer Stand an dem angeknüpft wurde

Bei den zivilen Baumustern der AH Flotte bildet momentan die hochintegrierte HELIONIX® Avionik-Suite den Stand der Technik ab. Dieses digitale Avionik-System bietet der Besatzung alle essentiellen Informationen und Funktionen für die Flugführung und für das Management eines Hubschraubers auf den Anzeigen im Cockpit. Im Bereich Situational Awareness und Missionsmanagement integriert das System moderne Assistenzfunktionen für die Gelände- und Hindernisdarstellung/-Vermeidung (z.B. Synthetic Vision System und Helicopter Terrain Awareness and Warning System) sowie für die Unterstützung der Missionsplanung (Digital Map). Zudem bietet das System eine integrierte Anzeige zur Darstellung einer Vielzahl an Sensorinformationen, wie z.B. Wetterradar, Traffic Collision and Avoidance System. Damit bietet das HELIONIX System dem Piloten zwar eine einzigartige Unterstützung in der Bereitstellung der verschiedenen Informationen an, wobei die Ableitung und Ausführung von entsprechenden Maßnahmen aufgrund des vorherrschenden Lagebildes immer noch beim Piloten liegt, da bisher automatisierte Abläufe nur in Teilbereichen realisiert sind. Die Verknüpfung der Missionsplanung mit dem Autopiloten zur Automatisierung der Flugführung (z.B. Reiseflug) sei hier als Beispiel genannt.

Die zunehmende Automatisierung verlagert den Piloten aus seiner zentralen Rolle. Daher müssen die Systeme und die Sensorik verstärkt dazu dienen, Daten und Informationen für die weitere automatisierte und autonome Entscheidungsfindung bereitzustellen. Die eingesetzte Sensorik (Kameras, Radar) ist im Wesentlichen identisch, jedoch für diesen speziellen Anwendungszweck optimiert. Bisher erfolgte die Auswertung, beispielsweise von Kamerabildern, überwiegend durch den Piloten oder mithilfe herkömmlicher, deterministischer Algorithmen. Letztere dienen zur Bilderkennung oder zur Auswertung von Radardaten (Wetter, Hindernisse etc.), deren Ergebnisse dem Piloten präsentiert wurden.

Im Bereich autonomes Fahren und in ersten Forschungsarbeiten im Luftfahrt Bereich wird die Nutzung Künstlicher Intelligenz stark vorangetrieben. Die Rechenleistung auch von Embedded-Rechnerarchitekturen ist soweit gestiegen, dass ein effizienter Einsatz möglich ist. Es werden Computer Vision- und allgemeiner Machine Learning bzw. Deep Learning-Algorithmen und Neuronale Netze zur Auswertung von Sensordaten eingesetzt. Kognitive Systeme sollen den Piloten bei der Entscheidungsfindung unterstützen bzw. autonom agieren. Parallel laufen viele Untersuchungen („Transparente KI“, „Erklärbare KI“), wie diese Technologie zulassbar und von der Allgemeinheit akzeptierbar gemacht werden kann, da sie inhärent nicht-deterministisch sind, was die klassischen Wege der Zulassung nicht erlauben. Airbus Helicopters hat in der Vergangenheit bereits Projekte zum autonomen Flug und automatischem Start und Landung durchgeführt (Helicopter Tout Temps (HTT), AFLIGHT), die die generelle Machbarkeit demonstrieren, aber unter starken Einschränkungen stattgefunden haben. Einige Firmen, weltweit angesiedelt, arbeiten derzeit an eigenen Konzepten zur urbanen Mobilität (UAM). Die meisten erfordern autonomes Fliegen. Andere Hubschrauberhersteller arbeiten ebenfalls an Lösungen zu autonomen Helikoptern, wie z.B. Sikorsky, die im „Matrix“-Programm bereits automatischen Start und Landung, Steuerung per Tablet und OPV-Flüge demonstriert haben.

A.4 Darstellung der wissenschaftlichen-technischen Ergebnisse

HAP1 Optimierung UAV Luftraumnutzung

AP1.1 Modellierung neuer Verkehrsteilnehmer

Im AP1.1 wurde der Partner DLR mit Daten zu Hubschrauber-Performance-Modellen und Radar Cross Section (RCS) Werten verschiedener Verkehrsteilnehmer unterstützt.

AP1.2 Definition Verkehrsszenarien

AHD unterstützte den Partner DLR mit Air Taxi Szenarien, basierend auf dem Hubschrauber Automatic Takeoff and Landing (ATOL) Konzept.

AP1.6 Anforderungen Systemkomponenten

In Zusammenarbeit mit dem Partner DLR wurden die notwendigen Schnittstellen festgelegt, um einen Informationsaustausch zwischen dem MASTER 360 Missions Computer und der On-Board Avionik des Helikopters sicherzustellen. Diese Schnittstellen ermöglichen den Austausch der notwendigen Zustandsbeschreibungen des Helikopters sowie der Wegpunkte für die automatische Flugführung.

HAP2 Virtuelle Entwicklungs- und Testumgebung

AP2.1 Anforderungen und Systemkonzept

Im Rahmen regelmäßiger technischer Abstimmungen wurden zentrale Schnittstellen für den Datenaustausch in der virtuellen Entwicklungs- und Testumgebung zwischen AHD, BIT und DLR festgelegt. Als wichtigste Schnittstellen wurden das Austauschformat für 3D-Objekte, das Trajektorienformat, die Signalrepräsentation und die Kompatibilität der Koordinatensysteme identifiziert.

Beim Austausch von 3D-Modellen wurde das Format GLTF (Graphics Language Transmission Format) gewählt. Dies ist notwendig, um neben der Modellstruktur auch Texturen zu transportieren, die für die realistische Abbildung der Reflexionseigenschaften bei unterschiedlichen Sensoren (Kamera, Radar) essentiell sind. Für AHD sind dabei primär die sichtbaren Texturen relevant. Beim Trajektorienformat einigten sich die Partner auf ein bestehendes Format, welches im Rahmen des Forschungsvorhaben HeliPas-OW bereits zur Anwendung kam.

Zur Sicherstellung der Konsistenz der Koordinatensysteme wurde der AHD-Simulator, als Basis festgelegt. Zusätzlich wurde die Relevanz des Montagepunktes und des Sichtfeldes des Sensors für repräsentative Simulationsergebnisse betont.

Des Weiteren wurden die Anforderungen für die 3D-Gelände- und Hindernisdaten in Form einer Spezifikation definiert, insbesondere für die On-Board-Informationen-Fusionsfunktion des DLR und die Simulationsumgebung von BIT. Des Weiteren konnten ein Umgebungsmodell (Heliport Donauwörth) und das GPS-Modell für die Testumgebung bereitgestellt werden.

HAP3 Rundumsicht-Radar

AP3.1 Anforderungen und Systemdesign

Die definierten technischen Systemanforderungen an das Radar Detection System (RDS) aus Helikoptersicht wurden im Rahmen des Vorhabens erstellt und an den Partner FHR übermittelt. Das Hauptziel des RDS, welches aus einem aktiven Radarsensor und einer Verarbeitungseinheit besteht, ist die Echtzeit-Erkennung von Gelände und bodengebundenen Hindernissen vor dem Hubschrauber während der kritischen Flugphase des Landeanflugs. Für die Abdeckung des Landeanflugs ist ein weites Sichtfeld (FoV) in Vorwärtsrichtung und eine ausreichende Vorwarnzeit gefordert.

AP3.2 Untersuchung koexistente UAV RF Systeme

Aus den technischen Anforderungen wurden die Systembedingungen für eine erfolgreiche Integration auf der Helikopterplattform sowie für den Erhalt der Flugfreigabe abgeleitet. Ein Integrationskonzept für die Anbringung des Radarmoduls an der Nase des Hubschraubers wurde ebenfalls erarbeitet.

HAP4 ATOL - Multisensor-Datenfusion

AP4.1 Anforderungen ATOL Position und Objekte

Im Zuge dieses Arbeitspakets wurden die Anforderungen an das visuelle SLAM-System einschließlich der Sensorsuite und die damit verbundenen Risiken analysiert. Es konnten mehrere grundlegende und funktionale Anforderungen in Bezug auf die Leistungsfähigkeit diskutiert und definiert werden. Diese bezogen sich auf die maximale Reichweite des Hinderniserkennungssystems und die Vibration des Hubschraubers.

Die Reichweite der Hindernisrekonstruktion ist durch sichtbare visuelle Merkmale (Mindestanzahl von Pixeln) begrenzt und die Objektsichtbarkeit nimmt linear mit der Entfernung ab.

Fehlerfälle für das SLAM-System können sich aus der Vibration des Hubschraubers ergeben:

- Auch bei konstanter relativer Kameraposition werden Vibrationen abgebildet.
- Bei Änderung der relativen Kameraposition treten Fehler in der Stereotiefenschätzung auf.
- Starke Bewegungsunschärfe führt zum Funktionsausfall.

Schlussfolgerungen und Lösungsansätze:

- Das Stereo-Setup ist vorteilhaft, solange die relative Translation zwischen den Kameras als konstant angenommen werden kann (unbeeinflusst von Vibrationen).
- Der SLAM-Algorithmus wurde so konzipiert, dass er normalverteilte Verzerrungen toleriert, aber eine konstante relative Translation annimmt, um hohe Genauigkeit zu gewährleisten.

AP4.2 Systemdesign Kamerasystem (VIS+IR)

Die Spezifikation für das Kamerasystem umfasst alle relevanten Anforderungsarten (Funktional, Performance, Interfaces, Umwelt, Safety und Reliability). In enger Zusammenarbeit mit Kappa Optronics konnte ein Kamerasystem definiert werden, das die Anforderungen aus Sicht des Vorhabens erfüllt.

Design und Konfiguration

Das System besteht aus drei Kameraboxen, zwei nach vorne gerichtete Kameraboxen und einer nach unten gerichtete Kamerabox.

Die Charakteristiken und Schnittstellen des Kamerasystems bestehen aus einem Kompromiss aus großem Sichtfeld, großer Blende und der Reichweite sowie einem Interface zur Übertragung des Videosignals und einem einfachen Design zur Montage der Frontkameras mit einer hohen Genauigkeit in der Ausrichtung.

AP4.4 Systemdesign Datenfusion Radar-Optik

Teil des Systemdesigns ist die Übertragung der Radartracks an die Funktionseinheit "ATOL Computing Unit", auf der die Datenspeicherung in Form von Ros-Bags durchgeführt wurde. Die Daten wurden nach jedem Testflug gesichert.

AP4.6 Design und Implementierung Landepunkt-Identifizierung

Die Spezifikation zur Landepunkt-Identifizierung umfasste alle relevanten Schritte von der Softwareerstellung und -konfiguration über die Subsystemintegration mit synthetischen Tests bis zur finalen Integration im Hubschrauber.

Softwarekomponenten

Die Software zur präzisen Helipadbestimmung nutzt Bildverarbeitungsalgorithmen zur zuverlässigen Detektion und Geometrieerfassung unter variierenden Bedingungen. Die ermittelten Parameter werden transformiert und über einen Datenbus an den Autopiloten übermittelt.

Hardware Integration

Die Software wurde in einem Flugsimulator auf einem Computer implementiert und getestet. Dies umfasste die Videoauswertung und Kommunikationstests mit dem Autopiloten. Die Hardware wurde anschließend für den Flugtest in den Versuchshubschrauber integriert.

Flugversuch

Das System wurde in der finalen Flugkampagne 2025 getestet. Die aktive Steuerung erfolgt über die MFD4 Misc Page, welche auch das FOV der Kamera anzeigt. Die Helipaderkennung wird auf dem Videobild der vorderen Kamera dargestellt.

Ergebnisse zur Helipaddetektion und -lokalisierung:

- Der Landeplatz wurde erfolgreich detektiert und lokalisiert.
- Die finale Hubschrauberposition zeigte eine deutliche Verbesserung, selbst bei falsch spezifizierten Zielkoordinaten.
- Die Detektionsreichweite ist ausreichend könnte aber vergrößert werden.

AP4.7 Design und Implementierung Hinderniserkennung und Position

Für die Hinderniserkennung wurden Schnittstellentests und eine Aktualisierung der Kamerakalibrierungsdaten durchgeführt. Auf Basis der durch die ersten Flugversuche gewonnenen Videodaten wurde die Software optimiert. Dazu gehörte auch eine intrinsische und extrinsische Kalibrierung, deren Korrekturwerte ebenfalls in die Zielhardware implementiert wurden. Während der finalen Flugkampagne konnten weitere SW-Anpassungen durchgeführt werden, mit dem Ziel die Anzahl der Fehldetektionen zu reduzieren.

Ergebnisse der SLAM-Implementierung:

- Erfolgreiche Implementierung eines SLAM-Systems auf einem Hubschrauber.
- Gute Leistung in Eigenlokalisierung und Mapping mit ausreichender Reichweite.
- Erfolgreiche Fusion mit den Eigenbewegungen des Versuchsträgers.
- Erste Erfolge bei der Minimierung von Fehldetektionen konnten dargestellt werden.

AP4.8 AI-Algorithmen und Datenbank

Auf Basis des Videomaterials der ersten Flugkampagne wurden die KI-Algorithmen trainiert. Diese Trainings-Applikation wurde mit weiterem Material aus der Flugkampagne getestet. Des Weiteren wurde eine Terrain- und Hindernisbanken bereitgestellt dem ein hochauflösendes Oberflächenmodell für die automatischen Anflüge überlagert wurde.

Ergebnisse der KI-Algorithmen

- Hindernisse wurden erfolgreich detektiert und die richtungsbasierte Lage (Azimuth/Elevation) des Hindernisses bestimmt.
- Georeferenzierte Lokalisierung ist eine mögliche Erweiterung, die zur weiteren Nutzung im Kontext der Hindernisvermeidung unvermeidlich ist.

Ergebnisse der Datenbankerzeugung

- Es wurde eine hohe Genauigkeit der Geländebeschreibung erreicht.
- Für große Hindernisse wurde eine vollständige Positionsliste zur Verfügung gestellt
- Während der Entwicklung des HMI und der Pathplanning-Software wurde die Auflösung des Geländes reduziert, um eine bessere Performance der Algorithmen zu erreichen und um die Renderkapazitäten nicht zu überschreiten. Für weitere Anwendungen der Datenbank werden in Zukunft die Use Cases entsprechend betrachtet.
- Zu den Positionsdaten der Hindernisse wurden im Projekt händisch noch Höhenangaben aus öffentlichen Datenbanken ergänzt. Für nachfolgende Projekte wird diese Angabe mitgeliefert.

HAP5 ATOL - Flugfad, Flugsteuerung und HMI

AP5.1 Anforderungen und Design Gesamtfunktion ATOL

Über den gesamten Projektverlauf wurde die Funktions- und die Systemarchitektur permanent an sich veränderte Anforderungen angepasst. Damit wurde sichergestellt, dass die Änderungen der Systemarchitektur keine Auswirkungen auf die Funktionsarchitektur haben. Die Systemarchitektur beinhaltet die Hardware Komponenten und die elektrischen Verbindungen.

AP5.2 Design Flugfadplanung und Datenfusion

In Übereinstimmung mit der AHD Systems Engineering Methodologie wurde eine Anforderungsspezifikation für das Flugfadplanungssystem erstellt. Diese Anforderungen spezifizieren die Fähigkeiten, Leistungsparameter, Schnittstellen, sicherheitsspezifische Aspekte, die vom Flugfadplanungssystem berücksichtigt werden sollen. Ebenfalls wurde das Format für den Datenaustausch zwischen der Pfadplanungsfunktion, der Kernavionik, dem SLAM System und des Radars gemeinsam mit den entsprechenden Projektpartnern auf Basis der Erstdefinition definiert.

AP5.3 Implementierung Flugfadplanung

Die Flugfadplanung wurde zusammen mit dem Tool „Flatlander“ zur Datenfusion vom DLR bereitgestellt und entsprechend in der Testumgebung im Flugsimulator zusammen mit dem HMI-Software-Prototypen und der Avioniksschnittstelle zum AFCS getestet. Die korrekte Funktion wurde während des Helikopter-Lay-Ups sowie in der zweiten und dritten Flugkampagne validiert.

AP5.4 Implementierung ATOL Flugsteuerung

Im Rahmen dieses Arbeitspakets wurde ein Konzept für das automatische Abfliegen berechneter Flugbahnen (Take-off, Abflug, Landeanflug, Landung) entwickelt. Die Flugbahn

besteht aus Geraden und Kreisbogensegmenten, was eine präzise Übertragung vom Planungsalgorithmus zum Autopiloten ermöglicht. Die Übergabe des Flugpfades erfolgt als Wegpunktliste zur vereinfachten Anbindung an bestehende Avioniksysteme. Anforderungen an die Bahnplanung wurden abgeleitet und mit dem DLR abgestimmt:

- Für den Reiseflug wird der NAV-Mode des Autopiloten in Verbindung mit einem FMS genutzt. Zur ganzheitlichen Demonstration wurde die Master 360-Systemarchitektur um Komponenten des Forschungsprojekts SESYMM (automatisiertes Liftoff/Touchdown, Ground Force Sensorik) erweitert.
- Funktion zur Berücksichtigung kamerabasierter Korrekturen aus AP4.6 für den Endanflug auf das Helipad wurde an den AFCS angebunden.
- Die Schnittstellendefinition zwischen dem Missionscomputer (DLR-Flugpfadplanung) und dem AMC (Flight Guidance/Autopilot) erfolgte über einen Datenbus, wobei Datenpakete und Protokolle definiert wurden.
- Die Prototypen für die automatische Flugsteuerung wurden in die Helionix Autopilotenumgebung eingebettet. Der Flugfad wird vom Missionscomputer (DLR) berechnet und an den AFCS übertragen.

Ergebnisse aus der Implementierung der Flugsteuerung:

- Eine erste 4D Flugsteuerung konnte erfolversprechend umgesetzt werden.
- Die Flugführung ist im Terrain- und Hinderniskulissen stabil, sicher und verlässlich.
- Die automatische Aktivierung und Deaktivierung an Georeferenzpunkten wurde erfolgreich realisiert.
- Es konnten geschwindigkeitsabhängige Bahnablagen umgesetzt werden.
- Die Flugleistung und der Flugkomfort im Zusammenspiel mit der Bahnplanung könnten noch angepasst werden.

AP5.5 Design und Implementierung HMI für ATOL

HMI-Aspekte wurden unter Berücksichtigung aller Schnittstellendefinition mit der Flugpfadplanung, dem Autopiloten, dem Flight Management System und allen weiteren relevanten Systemen implementiert. Die HMI-Funktion, analysiert Aufgabenverteilung und leitet daraus Informationsanforderungen ab. Zur Head-Down-Integration wurde der Video-Stream-Input des mittleren MFD der H145 gewählt, um die primären Flugdisplays unberührt zu lassen. Basierend auf dem Konzept wurde ein funktionaler Prototyp entworfen und sowohl im Simulator als auch in den Flugversuchen mit einem vollen ATOL-Szenario, mit Abflug von sowie Anflug nach Donauwörth getestet. Virtuelle Hindernisse wurden im Versuchsaufbau hinterlegt, und kontextgerecht abhängig von dem Sensorblickwinkel und der Sensorreichweite aufgedeckt. Somit konnte auch die Neuplanung im Kontext evaluiert werden und wertvolles Feedback zum Systemverhalten und der Mensch-Maschine-Schnittstelle gesammelt werden.

Zusammenfassende Ergebnisse der HMI Implementierung

- Es konnte ein Beitrag zu einem verständlichen und vorhersehbaren Systemverhalten erzielt werden.
- Flugtests zeigten den Bedarf für erweiterte Eingabemöglichkeiten der Besatzung auf.
- Die Ergebnisse der Bahnplanung müssen noch stärker zum Verständnis der Crew beitragen.
- Die Hindernisdarstellung in der Vertikalanzeige muss ausgeweitet werden.

AP5.6 Test ATOL in flight simulation

Zur Unterstützung erster Integrationstests im AVES Simulator des DLR, wurden von Seiten AHD eine Vorabversion der in AP5.5 implementierten Mensch-Maschinen-Schnittstelle bereitgestellt und die korrekte Kommunikation mit der Bahnplanungssoftware aus AP5.3 getestet. Basierend auf den Simulationsergebnissen wurden die Algorithmen verfeinert, angepasst sowie erste Leistungsdaten abgeleitet. Dies und die weiteren Ergebnisse sind in die finale Implementierung sowie Unterstützung in Form einer Evaluierung durch den Piloten und den Flugversuchingenieur als AHD Endnutzer eingeflossen.

HAP7 Funktions- und Integrationsnachweis

AP7.2 Testrig und Integrationskonzept Helikopter

Die in den vorangegangenen Arbeitspaketen entwickelte Hardware ist auf einer BK117 D-2 (H145) zum Einsatz gekommen. Für die beiden nach vorne gerichteten Kameras wurde der Hubschrauber speziell mit Multifunktionstritten ausgerüstet. Im vorderen Bereich der Tritte befindet sich ein Adapter, an dem unterschiedliche Ausrüstungen fixiert werden können. Es wird ein Adapter aus der laufenden Serie verwendet und so angepasst, dass er die in AP4.2 entwickelte Kamera aufnehmen kann. Um den nach unten definierten Winkel zu gewährleisten, wurde nochmals eine gefräste Adapterplatte zwischengeschaltet. Die nach unten gerichtete Kamera wurde mittig an das vordere Biegerohr des Landewerks montiert. Auch hier wurden Bestandteile von Anbauten aus der laufenden Serie wiederverwendet. Die Kameraanbauten wurden in AP7.4 innerhalb eines längeren LayUps der Maschine umgesetzt. In einem nachgelagerten Schritt ist die Radar-Integration erfolgt. Der Integrationsplan sieht vor, im Nasenbereich des Hubschraubers eine existierende Struktur aufzusetzen. Eine Blechkonstruktion bildet die Schnittstelle zwischen dem Radar und der Struktur.

Das für AP 7.4 gefertigte Rack mit den für die erste Testphase notwendigen Komponenten wurde am Flugsimulator als Testumgebung integriert. Dieser Simulator besteht aus einem Testcockpit mit einem sehr hohen Anteil an realer Flughardware. Hier kann das System in einer sogenannten Hardware-in-the-Loop (HIL) Simulation getestet werden, ohne den Versuchsträger zu blockieren. Damit wurde sichergestellt, dass alle Schnittstellen, nicht nur zwischen den Komponenten des entwickelten Master 360 Systems, sondern auch zwischen dem System und der Kernavionik des Hubschraubers, korrekt implementiert wurden und alle Funktionen das erwartete Verhalten zeigen.

Als Teil der Integrationstests wurde das HMI auf Funktionsebene und auch aus Sicht des Benutzers evaluiert. Hier wurden noch vor dem Flugtest einige Verbesserungspunkte durch den Piloten und den Flugversuchingenieur als Endnutzer identifiziert und implementiert. Die finale Evaluierung fand im Kontext des AP 7.6 statt.

AP7.4 Einrüstung Gesamtsystem in Helikopter

Nach der Integration im Testrig und der Tests der Sensorik über Laboraufbauten wurde das Gesamtsystem im Helikopter eingerüstet. Das Rack wurde innerhalb der Kabine auf den Sitzschienen montiert. Nach dem Abschluss der Integration wurde das Master 360 in Betrieb gesetzt und mit der Hubschrauberavionik getestet. Dazu gehörte auch ein EMV Test und ein mechanischer Impulstest.

AP7.6 Flugversuche für ATOL mit Helikopter

Nach der Integration der (Teil-)Systeme wurden insgesamt zwei Flugkampagnen durchgeführt. Die erste Flugkampagne 2024 zielte auf eine Datenerhebung ohne funktionale Demonstration des Systems ab. Die zweite Flugkampagne im Jahr 2025 diente der Bewertung des Gesamtsystems. Im Fokus stand dabei die erfolgreiche Erfassung von Hindernissen sowie die Durchführung des erforderlichen Ausweichmanövers.

1. Flugkampagne: Datenerhebungsflüge

Es wurden insgesamt fünf Flüge durchgeführt: zwei vorbereitende und drei zur Datenerhebung. Die vorbereitenden Flüge dienten der Überprüfung der Flugsicherheit, des Vibrationsverhaltens und der Dauerfestigkeit der neuen Anbauten. Spezifische Flugmanöver erzeugten dabei hohe Vibrationsfrequenzen zur Messung der Schwingungsantwort. Im zweiten vorbereitenden Flug wurde die exakte Sichtlinie der Kameras experimentell bestimmt, um die für die Hinderniserkennung notwendige hohe Präzision trotz Fertigungstoleranzen zu gewährleisten. Für die Datenerhebung selbst wurde ein Referenzflugprofil definiert. In diesem wurde auf eine hohe Varianz der überflogenen Geländearten sowie Gebäude geachtet. Dieses Flugprofil wurde für die drei Flüge zur Datenerhebung bei verschiedenen Sicht- und Wetterbedingungen von Sonnenschein bis Schlechtwetter in Form von Regen durchgeführt, um die Variation der gesammelten Daten zu erhöhen. Die Daten wurden den Partnern zur weiteren Analyse und zukünftigen Verbesserungen der Systeme zur Verfügung gestellt. Auf Basis der ersten Kampagne konnten auch verschiedene Maßnahmen umgesetzt werden, um z.B. Kompressionsartefakte in den Videoaufzeichnung zu reduzieren.

2. Flugkampagne: Demonstratorflug

Die Flugversuchskampagne diente der umfassenden Validierung und Funktionsprüfung des Automatic Take-off and Landing (ATOL) Systems, insbesondere unter Berücksichtigung der integrierten Hinderniserkennungsfunktionen. Die Versuche gliedern sich in mehrere Schwerpunkte, die sowohl die Wiederholung bekannter Szenarien zur Sicherstellung der Konsistenz als auch die Erprobung neuer, komplexer Funktionen umfassen.

Hierzu zählten die folgenden Versuchspunkte:

- Die Nachbildung der Flugprofile und Umgebungsbedingungen der ersten Kampagne, um eine direkte Vergleichbarkeit der Daten zu gewährleisten und die Robustheit des Systems unter wechselnden Lichtverhältnissen zu belegen.
- Die dedizierte Erfassung von Roh- und Prozessdaten des Radars (FHR) zur detaillierten Analyse und weiteren Systemoptimierung.
- Durchführung verschiedener Flugmanöver und Betriebsmodi, um das dynamische Verhalten des Hubschraubers zu bewerten und das Tuning des FCS für optimale Performance und Stabilität im ATOL-Modus abzuschließen.
- Die detaillierte Überprüfung der Einzelfunktionen des ATOL-Systems, wie die Landepunktidentifizierung, die Bahnplanung, die Fusion von Sensordaten und Datenbankinformationen (Sensor/Database Fusion)
- Demonstration der Gesamtsystemfunktion ATOL mit Hinderniserkennung

AP7.7 Auswertung und Dokumentation Testergebnisse

Mit Abschluss der ersten und zweiten Flugkampagne konnten umfangreiche Ergebnisse gesammelt werden, die teilweise noch während der Flugversuche von AHD und den Partnern umgesetzt wurden und einen Ausblick auf weitere Aktivitäten liefern. Dazu zählen die folgenden Punkte:

- Der SLAM-System wurde erfolgreich auf einem Hubschrauber implementiert. Die Funktion zeigte eine gute Leistung in den Kernfunktionen der Eigenlokalisierung (Odometrie) und der Kartenerstellung (Mapping). Bei der Minimierung von Fehldetektionen ergibt sich noch ein Potential zur Verbesserung.
- Die Sichtbarkeit und Darstellung der Flugführungsanzeigen weist an der ein oder anderen Stelle noch Verbesserungspotentiale auf, beispielsweise bei der Farbgebung und der Symbolik. Außerdem sollte das ATOL-HMI-Konzept tiefer in die bestehende HMI der HELIONIX Plattform integriert werden.
- Im Bereich AFCS und Flugführung sollten die Handlungsabläufe optimiert, bzw. automatisiert werden. Der Autopilot sollte mittels einer Systemaktionsanzeige klar darstellen, was er gerade tut und was die nächste Aktion ist (z. B. HDG-Änderungen). Die automatische Anzeige von Landealternative sowie eine Go-Around-Route sollte ebenfalls vom System bereitgestellt werden.
- In Bezug auf das Kamerasystem konnten einige Punkte ermittelt werden, welche durch den Kamerahersteller analysiert wurden.

Insgesamt konnte eine vollständige Automatisierung von Start und Landung (ATOL) entwickelt werden und für das Start- und Lande-Flugsegmentes auf einem Hubschrauberlandeplatz erfolgreich demonstriert werden. Damit wurde erfolgreich ein Beitrag zur Luftsicherheit geleistet. Dieser Fähigkeitsaufwuchs trägt dazu bei, die Sicherheit im Luftverkehr durch die Reduzierung der Arbeitsbelastung der Piloten zu verbessern.

A.5 Wichtige Positionen des zahlenmäßigen Nachweises

Die ursprünglich für das Vorhaben eingeplanten und bewilligten Mittel wurden im Projektverlauf effizient, zielgerichtet und im Einklang mit den Projektzielen eingesetzt.

Im Rahmen der Projektdurchführung kam es in einzelnen Bereichen zu geringfügigen Überschreitungen des geplanten Budgets. Diese Mehrkosten sind primär auf die Personalkosten zurückzuführen. Die Ursache hierfür liegt in der bewussten Entscheidung, mehrere zusätzliche Iterationsschleifen im Design- und Entwicklungsprozess durchzuführen. Diese Schleifen waren notwendig, um die gewonnenen Erkenntnisse und Verbesserungen, die sich direkt aus den umfangreichen Versuchskampagnen ergaben, unmittelbar in das Vorhaben zu implementieren.

Die direkte und unverzügliche Einarbeitung dieser Optimierungen gewährleistete eine höhere Qualität des Endergebnisses, führte aber zwangsläufig zu einem erweiterten Arbeitsumfang für das Entwicklungsteam. Dieser erhöhte Gesamtaufwand resultierte folgerichtig in einer Erhöhung der insgesamt verbuchten Personalkosten im Vergleich zur ursprünglichen Planung. Es ist festzuhalten, dass diese Budgetanpassung ein direktes Resultat der agilen und qualitätsorientierten Projektsteuerung war und die Gesamtziele des Vorhabens nachhaltig gestärkt hat.

A.6 Notwendigkeit und Angemessenheit der geleisteten Arbeit

Die Konzeption und der vollständige Ablauf des Vorhabens „MASTER 360“ spiegeln die bewährte und typische Vorgehensweise bei der Erforschung und Entwicklung neuer, komplexer Systemkonzepte im hochspezialisierten Bereich der Luftfahrt wider. Im Zentrum stand dabei die Erprobung der Autonomous Take-Off and Landing (ATOL)-Fähigkeit unter realitätsnahen und anspruchsvollen Bedingungen.

Ein entscheidender Meilenstein des Projekts war die erfolgreiche Integration des MASTER 360 Systems auf einem dedizierten Forschungshubschrauber. Durch diese Implementierung konnte unter realen Flug- und Testbedingungen ein detailliertes und umfangreiches Arbeitsergebnis generiert werden. Die dabei gewonnenen Daten und Erkenntnisse sind von essenzieller Bedeutung für die Validierung und Weiterentwicklung der ATOL-Funktionalitäten.

Ein besonders effizienzsteigernder und methodisch notwendiger Zwischenschritt war die anfängliche Erprobung einzelner Systemfunktionalitäten in einer simulierten Umgebung. Der Einsatz eines Flugsimulators vor den eigentlichen Flugversuchen ermöglichte es dem Entwicklungsteam, frühzeitig Systemlogiken zu überprüfen, potenzielle Schwachstellen zu identifizieren und notwendige Verbesserungen im Gesamtsystem effizient und kostensparend umzusetzen, bevor das System dem Risiko eines realen Flugtests ausgesetzt wurde.

Mit Bezug auf die ursprünglich definierte Problem- bzw. Aufgabenstellung und den im Vorhaben strategisch gewählten Lösungsansatz ist der erbrachte finanzielle und personelle Aufwand als angemessen und vollständig konsistent zu den substanziellen Arbeits-

ergebnissen zu bewerten. Die erfolgreiche Demonstration der Systemfähigkeit unter realen Bedingungen bestätigt die Validität des gewählten Forschungsansatzes.

A.7 Voraussichtlicher Nutzen und Verwertbarkeit der Ergebnisse

Insgesamt konnten im Rahmen des Forschungsvorhabens umfassende, validierte und verifizierte Aussagen zur Thematik der automatisierten Flugführung im ersten und letzten Flugsegment von einem Hubschrauber erzielt werden. Die gewonnenen Arbeitsergebnisse stellen eine signifikante Verbesserung des Verständnisses hinsichtlich der Anforderungen, notwendigen Bedingungen und potenziellen Einschränkungen für eine erfolgreiche Systemintegration dieser fortschrittlichen Technologien in die Hubschrauberplattform dar. Dies hat zur Folge, dass zukünftige Lösungsansätze und die Weiterführung der im Projekt entwickelten Technologien nun wesentlich schneller, effizienter und mit einer optimierten Ergebnisqualität bezüglich der Leistungsfähigkeit und Zuverlässigkeit der Systeme umgesetzt werden können. Diese positiven Effekte werden nachdrücklich durch die Ergebnisse aus den durchgeführten Flugversuchskampagnen gestützt und belegt. Die erfolgreiche Durchführung dieser Kampagnen hat die praktische Anwendbarkeit der entwickelten Algorithmen und Systemarchitekturen demonstriert.

Insgesamt hat das Forschungsvorhaben die Firma Airbus Helicopters in einem global agierenden, anspruchsvollen und stark wettbewerbsorientierten Umfeld maßgeblich dabei unterstützt, ihre Position als führender Entwickler und Integrator neuartiger Technologien im zukunftsweisenden Bereich der automatisierten Flugführung nachhaltig zu festigen und weiter auszubauen. Die Resultate tragen direkt zur Stärkung der Innovationskraft und Technologieführerschaft des Unternehmens bei und sichern langfristig die Wettbewerbsfähigkeit in der Luftfahrtindustrie. Die im Projekt geschaffenen Grundlagen ermöglichen Airbus Helicopters, zukünftige Anforderungen der automatisierten und autonomen Luftmobilität proaktiv zu gestalten und zu bedienen.

A.8 Fortschritt auf dem Gebiet des Vorhabens bei anderen Stellen

Autonomie-Systeme sind im Wesentlichen darauf ausgelegt, die Arbeitslast der Piloten zu reduzieren (virtueller Co-Pilot) oder den Hubschrauber vollständig ohne menschlichen Piloten zu steuern. Die automatische Landung bzw. der automatische Start ist ein kritischer Teil dieser Fähigkeiten, bei dem Sensordatenfusion, präzise Navigation und Flugsteuerungssysteme integriert werden müssen, um eine sichere Landung zu gewährleisten. Aktuell liegt der Fokus dieser Entwicklungen bei einer Militarisierung und Automatisierung der Logistikkette.

Beispielsweise wurde durch Sikorsky das "Matrix-System" entwickelt, welches auf einer UH-60 Black Hawk erfolgreiche vollständige autonome Missionen, einschließlich präziser Außenlastabwürfe und Steuerung durch ungeschulte Einsatzsoldaten per Tablet demonstrierte.

Testflüge des fliegenden Technologie-Labors "ALFA" (Aircraft Laboratory for Future Autonomy) zur schnellen Entwicklung und Evaluierung neuer Flugsteuerungstechnologien für autonomes Fliegen werden derzeit auch von Bell Textron auf einer Bell 429 durchgeführt. Leonardo Helicopters arbeitet ebenfalls an automatischen Landefunktionen, welche für eine AW169 entwickelt wurden. Militärischen und zivilen Piloten soll dieses System dabei unterstützen, sicher durch Brownouts und andere Situationen mit eingeschränkter Sicht zu navigieren.

A.9 Veröffentlichungen

Im Rahmen des Vorhabens ist es zu keinen Veröffentlichungen gekommen.

Abkürzungsverzeichnis / Glossar

ADC	Air Data Computer
AFCS	Automatic Flight and Control System (Autopilot)
AGL	Above Ground Level
AHD	Airbus Helicopters Deutschland
AMC	Aircraft Management Computer
AMSL	Above Mean Sea Level
AP	Arbeitspaket
ATOL	Automatic Take-Off and Landing
ConOps	Concept of Operation / Operationelles Konzept
DAL	Design Assurance Level
DEM	Digital Elevation Model
DoF	Degree of Freedom
DSM	Digital Surface Model
DTM	Digital Terrain Model
EASA	European Aviation Agency
EDPR	Kürzel für Heliport Airbus Helicopters Donauwörth
ETO	Estimated Time Overhead
FMS	Flight Management System
GPS	Global Positioning System
HC/HS	Helicopter/ Hubschrauber
HDD	Head Down Display
HLL	Helideck Limitation List
HMI	Human Machine Interface
HOGE OEI	Hover Out of Ground Effect - One Engine Inoperative (Minimum performance for HHO)
HHO	Helicopter Hoist Operations
HHOP	Helicopter Hoist Operations Passenger
HMD	Helmsichtsystem (Helmet Mounted Display)
HTAWS	Helicopter Terrain Avoidance System
ICD	Interface Control Document
IFR	Instrument Flight Rules (Instrumentenflugregeln)
INS	Inertial Navigation System
IR	Infrarotspektralbereich, Infrared
LBA	Luftfahrtbundesamt
LWIR	Long-Wave Infrared, Thermal Infrared (Wellenlängen 8-12µm) Uncooled IR
LOS	Line Of Sight
MAPt	Missed Approach Point
MFD	Multi-Functional Display
MSL	Mean Sea Level
NIR	Near Infrared (Wellenlänge 0.7-1µm), Verstärktes Licht (intensified light)
NOHD	Nominal Ocular Hazardous Distance
NVG	Night Vision Goggle (Nachtsichtbrille)
NVIS	Night Vision Imaging System
PinS	Point in Space (IFR Verfahren)
PSA	Persönliche Schutzausrüstung
PU	Processing Unit, Rechneinheit
RDS	Radar detection system
SWIR	Short-Wave Infrared (Wellenlänge 1-2 µm)
VFR	Visual Flight Rules (Sichtflugregeln)
VIS	Sichtbarer (Visible) Spektralbereich
VMC	Visual Meteorological Conditions
VR	Virtual Reality