

REALISIERUNG EINER PLATTFORM FÜR DIE ENTWICKLUNG UNBEMANNTER VTOL-LUFTFAHRZEUGE

G. Strickert, J. Dittrich, DLR, Institut für Flugsystemtechnik,
Lilienthalplatz 7, 38108 Braunschweig, Deutschland

Zusammenfassung

Die Erforschung und Entwicklung von Technologien und Verfahren für unbemannte Luftfahrzeuge erfordert eine umfassende Infrastruktur. Ausgehend von den Anforderungen aus Sicht der Forscher und Luftfahrzeugbetreiber wird eine Plattform für die Entwicklung unbemannter VTOL (Vertical Take-off and Landing) Luftfahrzeuge definiert und realisiert. Die resultierenden wesentlichen Komponenten und Konzepte der Plattform werden erläutert und den jeweiligen Anforderungen gegenübergestellt. Nach diesem Hauptteil schließen sich Abschnitte mit ersten Betriebserfahrungen und geplanten Anwendungen an.

1. EINLEITUNG

Die Auslegung eines unbemannten Luftfahrzeuges für Forschung und Entwicklung unterscheidet sich erheblich von dem Entwurf in Hinblick auf einen bestimmten Einsatzzweck, wie z.B. der Verwendung einer Sensornutzlast in einem bestimmten Szenario. Ist die Forschung angewiesen auf Modularität, zugängliche Schnittstellen, Möglichkeit zu tiefgreifenden Systemeingriffen und flankierender Simulationsinfrastruktur, so kann beim operationellen System nicht verzichtet werden auf beispielsweise Reichweite, einfache Nutzerinterfaces oder Allwetterfähigkeit.

Das Institut für Flugsystemtechnik des DLR Braunschweig beschäftigt sich mit der Entwicklung von Verfahren und Technologien für das unbemannte Fliegen. Aufgrund der Forschungsthemen Flugregelungstechnik, Umweltwahrnehmung für den Eingriff in die Flugsteuerung und On-Board-Pfadplanung entstanden hier verallgemeinerbare Anforderungen an eine Forschungsplattform, welche für die Entwicklung und nicht zuletzt Demonstration genutzt werden kann.

Aufgrund des Kernthemas „Umweltwahrnehmung“ wurde bereits eine wesentliche Konfigurationsentscheidung im Vorfeld getroffen: Die auszulegende Plattform soll die Fähigkeit zu Senkrechtstart und -landung (VTOL) sowie Schwebefähigkeit aufweisen, um sich auch in einer Hinderniskulisse, in Bodennähe oder urbanen Szenarien sicher bewegen zu können. Die reduzierten Anforderungen derartiger Fluggeräte an Infrastruktur, Fluggelände, Mindestflughöhe und -geschwindigkeit begünstigen die Forschung zusätzlich.

Mit diesen Randbedingungen wurde im Jahr 2011 begonnen, Anforderungen an eine zukünftige VTOL-UAS (UAS: Unmanned Aerial System) Forschungsplattform zu erheben, eine Systemarchitektur zu erstellen, Komponenten zu beschaffen und zu integrieren. Daneben wurden auch Betriebskonzepte analog der Forschung mit bemannten Luftfahrzeugen abgeleitet. Wesentliche Ergebnisse dieser Arbeiten sind in den folgenden Abschnitten zusammengefasst. Abschließend erfolgen eine Darstellung bereits laufender Forschungen und möglicher zukünftiger Anwendungen.

2. ANFORDERUNGEN

In der bemannten Luftfahrt hat sich bei der Bearbeitung von Forschungsaufgaben eine interne Aufgabentrennung in Flugbetrieb (Dienstleister) und Forschung (Kunde) bewährt, damit es nicht zu einer Vermischung von Verantwortlichkeiten und Funktionen kommt. Analog werden im Folgenden die Anforderungen aus den unterschiedlichen Perspektiven geschildert. Die grundsätzlichen Bestandteile des zu schaffenden Gesamtsystems sind in BILD 1 gezeigt.

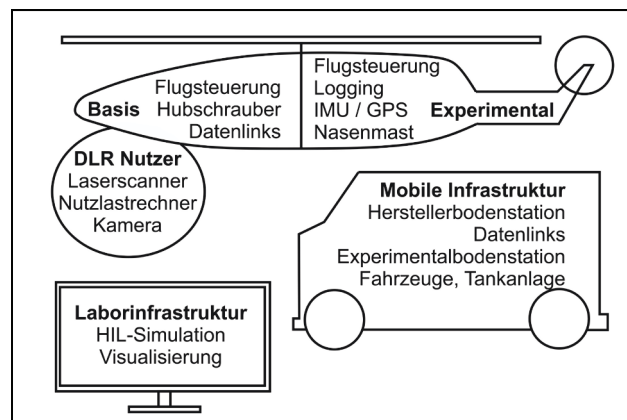


BILD 1: Bestandteile der Forschungsplattform. HIL: Hardware-in-the-loop, IMU: Inertial Measurement Unit, GPS: Global Positioning System

2.1. Flugbetrieb

Der Flugbetrieb verantwortet Einrüstung von Nutzlasten, Durchführung der Flugversuche, Einhaltung gesetzlicher Vorschriften usw.. Daher stellt er auch den Luftfahrzeugführer und ggf. einen Flugversuchingenieur für die Koordinierung mit dem Forschungs- und Entwicklungsteam. Aus Sicht des Flugbetriebes sind folgende Anforderungen an einen neuen Flugversuchsträger für Forschungszwecke zu erfüllen:

2.1.1. Geringe Abhängigkeiten

Geringe Abhängigkeiten von (externen) Ressourcen ermöglichen einerseits kurze Reaktionszeiten auf Nutzerwünsche und erhöhen andererseits die mögliche Nutzungsanzahl und -dauer der Plattform. Diese Ressourcen können Personal sein, aber auch Infrastruktur für den Flug, Start und Landung oder die Wartung. Als personelle Mindestbesetzung des Flugbetriebsteams sind ein Systemoperator und ein Sicherheitspilot vorzusehen, damit das Fluggerät lückenlos instrumentell und visuell überwacht bzw. auf verschiedenen Ebenen kontrolliert werden kann. Abhängigkeiten von externer Infrastruktur, z.B. Hangar, Startbahn, Navigationshilfen oder Tankanlagen sollen nach Möglichkeit nicht bestehen. Soweit erforderlich ist diese Infrastruktur selbst zu beschaffen und zu transportieren, so dass ein autarker Betrieb an beliebigen Orten und Zeitpunkten ermöglicht wird.

2.1.2. Sicherheit

Von besonderem Interesse für den Flugbetrieb ist die Sicherheit. Anhand einer Risikoanalyse werden nach Möglichkeit alle Fehlerfälle erfasst und in ihren Auswirkungen bewertet. Daraus lassen sich dann Anforderungen zur Verringerung der jeweiligen Risiken ableiten. Durch die beabsichtigte Nutzung als Forschungsplattform sind folgende Faktoren besonders bei der Risikoanalyse zu berücksichtigen:

- Das Experimentalsystem soll in die Flugsteuerung eingreifen können.
- In unterschiedlichen Flugphasen kann der verantwortliche Luftfahrzeugführer wechseln.
- Versuche haben teilweise einmaligen Charakter und können weder geprobt noch wiederholt werden.

Die hieraus entstehenden zusätzlichen Risiken müssen zwingend prozedural oder technisch bei der Realisierung beseitigt oder gemildert werden.

2.1.3. Reproduzierbarkeit

Für bemannte Flugversuchsträger existiert normalerweise eine ausführliche Dokumentation, ein Konfigurationsmanagement, Lebenslaufakten und ein Änderungs- und Entwicklungsprozess. Dies alles dient in erster Linie der Sicherheit, aber auch der Dokumentation der Bedingungen, unter denen Forschungsergebnisse erbracht wurden und der Möglichkeit zur Wiederholung wichtiger Experimente. Gerade bei kleinen unbemannten Luftfahrzeugen sind diese Methoden noch nicht allgemein verbreitet oder vorhanden. Begleitend zum Aufbau der Systemhardware sind daher ggf. auch die oben genannten Prozesse und Dokumente einzuführen.

2.1.4. Begrenzter Integrations- und Wartungsaufwand

Im Rahmen von Forschungsaufgaben sind häufig wechselnde Einbauten und Nutzlastkonfigurationen zu erwarten. Zur Begrenzung der für Einrüstung und Integration nötigen Ressourcen auf ein Mindestmaß bietet sich eine räumliche Trennung von Nutzlast und Basissystem an. Komponenten des Basissystems sollten für Arbeiten am Experimentalsystem nicht oder so wenig wie möglich

angetastet werden müssen. Dies kommt auch der Sicherheit zu Gute. Ebenso sollten sich reguläre Wartungen am Basissystem durchführen lassen, ohne dass die Nutzlast ganz oder teilweise zu demontieren ist. Dadurch lassen sich aufwändige Neukalibrierungen vermeiden und die notwendigen Standzeiten zwischen Versuchen können reduziert werden.

2.2. Forschung & Entwicklung

Die Gruppe der Forscher und Entwickler stellen für Flugversuche Verfahren, Algorithmen, aber auch Umweltsensoren und sonstige Experimentalhardware zur Verfügung. Außerdem entwerfen sie den Inhalt der Flugversuche und stimmen diese mit dem Flugbetrieb ab. Aus Forschungssicht sollte die zu schaffende Plattform über folgende Funktionen verfügen:

2.2.1. Basisexperiment

Unabhängig von projektabhängigen Ausstattungen wird von den Nutzern der unbemannten Hubschrauber für Forschungszwecke eine Ausstattung für Basisexperimente erwartet. Diese beinhaltet:

2.2.1.1. Messdatenaufzeichnung

Die Messdatenaufzeichnung hat Zugriff auf alle relevanten Zustandsdaten des Basissystems, der Navigation und der Forschungsnutzlast. Alle Daten sind zu synchronisieren oder mit einem Zeitstempel zu versehen und für die spätere Auswertung abzuspeichern.

2.2.1.2. Positions- und Lagedaten (Referenz)

Sowohl für die automatische Flugsteuerung als auch für die Interpretation der an Bord erhobenen Daten der Umweltsensorik (Georeferenzierung) werden genaue Positions- und Lagedaten benötigt. Zur Erhöhung der Genauigkeit und für Vergleichszwecke soll hier ein eigenständiger Navigationssensor zum Einsatz kommen und nicht die Daten genutzt werden, welche auch die automatische Flugsteuerung des Basissystems verwendet.

2.2.1.3. Luftdaten

Zumindest zeitweise ist das Luftfahrzeug mit einem Messsystem zur Aufnahme von Luftdaten, also Anstell- und Schiebewinkel, Temperatur, Gesamt- und Staudruck auszustatten. Dies ermöglicht erst die Ableitung eines mathematischen Modells der Regelstrecke über das Verfahren der Systemidentifizierung. Zur Messung in möglichst ungestörter Luft sollte ein Nasenmast vorgesehen werden.

2.2.2. Experimentelle Flugsteuerung

Die Forschungsthemen On-Board-Pfadplanung und Flugregelungstechnik erfordern die Möglichkeit für tiefgreifende Eingriffe in die Flugsteuerung und direkten Durchgriff auf einzelne Stellglieder. Praktisch lässt sich das verwirklichen durch eine Aufteilung in den Flugregler, wie er standardmäßig auf dem Basishubschrauber verwendet wird, und eine zusätzliche, experimentelle Flugsteuerung. Diese erhält ebenfalls volle Steuerautorität und kann daher sogar zur Erweiterung des Flugbereiches, der Kommandierung spezieller Manöver für die Systemidentifizierung usw. verwendet werden. Eine zuverlässige Umschaltung zwischen den beiden automatischen Flugsteuerungen versetzt den Operator oder Sicherheitspiloten in die Lage, den experimentellen Teil jederzeit abbrechen zu können.

2.2.3. Datenschnittstellen zum Basissystem

Neben dem Durchgriff auf die Flugsteuerung werden zwischen Basissystem und Experimentalsystem noch weitere Schnittstellen benötigt.

- Die tatsächlichen Ausschläge der Stellglieder (Aktuatoren) fließen insb. in die Systemidentifizierung ein.
- Die gegebenen Kommandos müssen zwischen Basissystem und Experimentalsystem ausgetauscht werden, um weiche Umschaltvorgänge zu ermöglichen.
- Die experimentelle Flugsteuerung benötigt auch Informationen zu Position und Lage, Flughöhe, Drehzahlen, Triebwerks- und Leistungsdaten, Health Monitoring usw., solange diese Daten nicht durch das Experimentalsystem selbst zur Verfügung gestellt werden.

2.2.4. Nutzlastkapazität

Wesentliche Anforderung an die Flugleistungen ist die Erhöhung der Nutzlast gegenüber bestehenden Systemen. Neben der bereits erwähnten Basisexperimentalausstattung soll eine umfangreiche Sensorausstattung für die Umwelterkennung in das VTOL-UAS eingerüstet werden.

Überschlägig ergibt sich ein Bedarf von:

Messdatenaufzeichnung und experimentelle Flugsteuerung	1kg
Referenz GPS/ IMU	3kg
1x Laserscanner 360°	2kg
2x Laserscanner	2kg
1x Stereokamera	1,5kg
Bildverarbeitungsrechner	1kg
Halterungen und Kabel	4kg
Gesamt	14,5kg

TAB 1: Massenabschätzung DLR-Nutzlast

2.2.5. HIL-Fähigkeit

Die Fähigkeit zur sog. Hardware-in-the-Loop (HIL) Simulation, also der Einbindung der originalen Flugsteuerungshardware in eine Laborsimulation, soll bei einer Plattform zur Entwicklung unbemannter VTOL-Luftfahrzeuge auf jeden Fall vorgesehen werden. Dafür sind weitere Datenschnittstellen zu schaffen, einerseits zum Einspeisen

simulierter Sensorinformationen, andererseits für den Abgriff der resultierenden Steuerkommandos. Die HIL-Simulation ermöglicht Funktions- und Schnittstellentests, erleichtert die Fehlersuche, dient dem Reglertuning und kann auch für Versuchsvorbereitung, Training und Übung eingesetzt werden. Nicht zuletzt werden die Möglichkeiten der gesamten Forschungsplattform durch die HIL-Simulation erweitert, da sich Flugversuchsergebnisse durch die Simulation gut ergänzen lassen, insbesondere bei risikoreichen Szenarien oder real schwer herstellbaren Umgebungsbedingungen (z.B. Turbulenzen, Sichtbeschränkungen, Geländebedingungen).

2.2.6. Relevanz für potentielle Kunden

Ein weiteres wichtiges Kriterium bei der Auswahl eines geeigneten Basissystems ist dessen Relevanz für potentielle Kunden. Mit dem System sollen Forschungsthemen an VTOL-Luftfahrzeugen in der Größenordnung zwischen Multikoptersystemen und mantragenden Hubschraubern bedient werden. Es soll die Möglichkeit zur Integration zusätzlicher Anwendernutzlasten bestehen, Flugzeiten und Flugradius sollen sich an den Wünschen von Endanwendern orientieren. Das verwendete Luftfahrzeug soll gegenüber dem Serienzustand möglichst wenig modifiziert werden, so dass eine Übertragung der Forschungsergebnisse mit geringem Aufwand möglich ist.

3. REALISIERTE KOMPONENTEN UND VERFAHREN

Zur Erfüllung der in Abschnitt 2 genannten Anforderungen wurden eine Reihe von Einzelmaßnahmen getroffen:

- Erstellung eines Lastenheftes für das Hubschrauber-UAS-Basissystem
- Beschaffung zweier Basissysteme
- Anpassung der Basissysteme für den Forschungszweck
- Beschaffung einer Navigationsplattform
- Aufbau eines Rechners für die experimentelle Flugsteuerung und die Messdatenaufzeichnung
- Aufbau von Bildverarbeitungs- und Nutzlastrechnern
- Konstruktion und Bau eines Nasenmastes mit Luftdatenmesstechnik
- Beschaffung einer Echtzeitsimulationsumgebung und Anpassung der Sensor- und Aktuatordatenschnittstellen
- Beschaffung von Transportfahrzeug und Tankstation
- Erarbeitung eines Betriebskonzeptes

Die resultierende Forschungsanlage „superARTIS“ des DLR Braunschweig ist Anfang des Jahres 2014 in Betrieb gegangen. Die folgenden Abschnitte stellen die Komponenten und Verfahren detaillierter vor.

3.1. Hubschrauber

Als Basissystem der Forschungsplattform kommen zwei unbemannte Hubschrauber des Typs R350 der Firma UMS zum Einsatz (BILD 2). Die Hubschrauber werden durch eine Wellenleistungsturbine angetrieben und als Komplettsystem mit elektronischer Flugsteuerung und Bodenkontrollstation ausgeliefert.

Größe (L x B x H)	4,2 x 1,0 x 0,95m
Rotordurchmesser	3,5 m
Maximales Abfluggewicht	150 kg
Turbinenleistung	22 KW
Nutzlast	30 kg
Fluggeschwindigkeit	120 km/h
Flugdauer	120 min
Operationsradius	10 km
Verfügbare elektrische Leistung	400 W

TAB 2: Technische Daten Hubschrauber R350

Der Drehflügler mit Haupt- und Heckrotor-Konfiguration ist sehr leistungsfähig, sowohl was seine Nutzlastkapazität angeht, als auch bezüglich der Fluggeschwindigkeit und Wendigkeit (vergl. TAB 2). Die Fähigkeit zum Schweben und extrem langsamen Flug ermöglicht die Sensorerprobung und die Befliegung hindernisreicher Gelände im Tiefflug oder in begrenzten Fluggebieten. Die Ähnlichkeit zum Aufbau bemannter Hubschrauber erlaubt eine Übertragung der Erkenntnisse zu Flugeigenschaften und –leistungen. Die Toolkette der ebenfalls im Institut für Flugsystemtechnik forschenden Abteilung Hubschrauber kann so nahtlos verwendet werden.



BILD 2: Basishubschrauber R350 mit Bodenkontrollstation

Die Nutzlastkapazität von 30 kg sowie der zur Verfügung stehende Einbauraum, aufgeteilt in zwei Payloadbays in der unteren Hälfte des Hubschraubers, ermöglichen die Ausstattung mit umfangreicher Sensorik, Rechnern, Telekommunikationseinrichtungen oder auch sonstigen Geräten. Ein Generator versorgt die Nutzlasten mit Strom, gepuffert durch einen Akku. Damit bietet sich superARTIS insbesondere für die Erprobung von Geräten an, welche momentan für viele unbemannte Luftfahrzeuge noch zu groß oder schwer sind bzw. eine zu große Leistungsaufnahme aufweisen.

Für die Integration nutzerspezifischer Hardware stehen diverse Schnittstellen für die mechanische und elektrische Integration sowie für den Datenaustausch zur Verfügung. Am Kufenlandegestell befinden sich vier Hardpoints für die Montage von Außenlasten. Der Heckausleger und eine Plattform oberhalb der Rotorebene bieten sich als Träger für Antennen oder Sensoren an. Auf Wunsch kann auch ein Nasenmast montiert werden, um weitgehend ungestörte Messungen von Luftdaten vornehmen zu können. Zur Ansteuerung der Nutzlast oder zur Interpretation der erhobenen Daten kann in Echtzeit on-board, über Datenlink oder im Postprocessing auf die Flugzustandsdaten des Hubschraubers zugegriffen werden (Position, Lage, Zeitbasis, Kurs, Geschwindigkeit etc.). Über das DLR-Experimentalsystem können darüber hinaus Kommandos bis hinunter auf Aktuatorlevel an den Hubschrauber übergeben werden.

3.2. Experimentalsystem



BILD 3: Modulares Experimentalsystem

Das DLR-Experimentalsystem erweitert die seriennahen Fluggeräte zur Forschungsplattform. Als Kern kommt ein vielseitig verwendbarer, PC-basierter Rechner mit dem Echtzeitbetriebssystem QNX zum Einsatz. Dieser kann Daten unterschiedlichster Formate entgegennehmen, aufzeichnen, synchronisieren, weiterverarbeiten und über angeschlossene Datenlinks an eine Bodenstation weiterleiten. Die Sensorfusion und Filterung für die Navigationsschätzung wird hier ebenfalls durchgeführt. Darauf setzt bei Bedarf ein experimentelles, weitgehend modifizierbares Flugsteuerungssystem auf, welches die Standardregelung des Fluggerätes ersetzen kann. An dieser Stelle lassen sich unterschiedliche Steuerungskonzepte bzw. Autonomiegrade für das Vehikel realisieren.



BILD 4: GPS-gestützte Kreiselplattform

Für den Fall, dass die GPS- und MEMS-IMU-basierte Navigationslösung des Basissystems für die Forschungsaufgaben nicht genau genug ist, kann das Experimentalsystem um eine faseroptische Kreiselplattform ergänzt werden. Die IMU iTraceRT-F400 der Firma IMAR (BILD 4) ist mit nordsuchenden Kreiseln ausgestattet, kann über getrennte GPS-Empfänger auch Headinginformationen bestimmen und ist bei vorhandenen Referenzdaten einer Bodenstation zu D-GPS-Betrieb fähig.



BILD 5: Optionaler Nasenmast

Als weitere optionale Ausstattung, insbesondere für die Systemidentifizierung und Flugbereichserweiterung, wurde ein Nasenmast für die Messung von Luftdaten vorgesehen. Dieser kann mit geringem Aufwand in einer Aufnahme der vorderen Payloadbay verschraubt werden. Der Aufbau des Luftdatensystems erfolgt standardmäßig mit Pitot-Rohr sowie Windfahnen für Anstell- und Schiebewinkel. In einer im Nasenmast selbst verbauten Elektronikunit sitzen die Drucksensoren sowie die Wandler für eine serielle Kommunikation mit dem Experimentalrechner.

3.3. Infrastruktur

3.3.1. HIL-Simulation

Gemäß den Anforderungen des DLR wurden die Hubschraubersysteme durch den Hersteller mit Schnittstellen für extern simulierte Sensordaten und den Abgriff der Aktuatorendaten ausgestattet. Über diese kommuniziert der Hubschrauber mit einem Echtzeitsimulationssystem der Firma dspace. Hier werden mittels flugmechanischer Modelle und simulierter Umgebungsbedingungen die Zusammenhänge von Steuerinputs und Zustandsdaten, insb. Position und Lage, abgebildet. Durch nachgelagerte Emulatoren werden die Zustandsdaten in künstliche Sensordaten übersetzt. Diese weisen ähnliche Eigenschaften (Genauigkeiten, Updateraten, Rauschen, Protokolle) auf, wie die im Hubschrauber eingebauten Sensoren und können diese steckerkompatibel ersetzen. Der Nutzer kann in den Kreis aus Simulation und automatischer Flugsteuerung des Hubschraubers ganz normal über die Hubschrauberbodenstation eingreifen oder die Simulationsbedingungen über das dspace-Interface verändern (BILD 6). Die Positions- und Lagedaten werden darüber hinaus genutzt, um den Hubschrauber in einer virtuellen Welt zu visualisieren. Durch die Visualisierung werden sowohl reale Fluggelände als auch künstliche Welten mit besonderen Eigenschaften, z.B. Hindernissen, dargestellt. Diese Visualisierung kann darüber hinaus genutzt werden, um die Rohdaten für Umgebungssensoren wie Kameras und Laserscanner ebenfalls zu simulieren und in die HIL-Simulation einzubringen.



BILD 6: Aufbau HIL-Simulation und Visualisierung

Durch die Vermessung der Flugeigenschaften sowie der mathematischen Beschreibung des Verhaltens von Fluggerät, Sensoren und Aktuatoren steht dem Nutzer eine

umfangreiche und präzise Simulationsumgebung für eigenständige Laborversuche oder die Vorbereitung von Flugversuchen zur Verfügung. Effekte der Umwelt (Verwirbelungen, Windfelder) können in der Simulation genauso berücksichtigt werden wie Störungen oder Ausfälle von Sensoren. Nicht zuletzt lassen sich sicherheitskritische Situationen und Prozeduren gefahrlos in der Simulation analysieren.

3.3.2. Mobile Versuchsausstattung



BILD 7: Bodenstations- und Transportfahrzeug

Boden- und Flugversuche mit den Hubschraubern können vollständig autark stattfinden. Der Transport beider Hubschrauber erfolgt durch einen 3,5 t-LKW mit Ladebordwand und angepassten Befestigungsschienen. Außerdem werden im LKW 200 l Treibstoff samt Zapfanlage mitgeführt. Ein weiteres Fahrzeug mit drei Arbeitsplätzen ist vorbereitet zur Aufnahme der Bodenkontrollstation und Datenlinks. Ein Generator sorgt für Unabhängigkeit von Stromnetzen. Am Fahrzeug befestigt werden kann bei Bedarf ein 6 m hoher, pneumatisch ausfahrbarer Antennenmast zur Erhöhung der Verbindungsqualität oder Reichweite.

3.4. Prozesse und Betriebskonzepte

Begleitend zum Aufbau der Forschungsanlage und Infrastruktur wurden ebenfalls maßgeschneiderte Verfahren für die professionelle Erzeugung von Forschungsergebnissen mit Hilfe dieser Toolkette entwickelt. Eingeflossen sind hier die Erfahrungen aus dem 10-jährigen Betrieb kleinerer unbemannter Forschungsplattformen (0,5 bis 30 kg) sowie die Prozesse, die für den Betrieb des bemannten Forschungshubschraubers ACT-FHS (EC-135) angewendet werden. Außerdem wurden darin Erkenntnisse aus dem Großmodellbau sowie der Analyse von über 20 Zwischenfällen mit ähnlichen Fluggeräten verwertet.

Es wurde ein Qualifizierungskonzept für Mitarbeiter erarbeitet, welches hauptsächlich auf gerätespezifischer Ersteinweisung sowie wiederkehrenden Auffrischungen bzw. Updates basiert. Weitergehende Schulungsmöglichkeiten für spezielle Rollen, z.B. Großmodellschulungen, Schulungen der bemannten Fliegerei (PPL, Flugfunk), Hersteller-einweisungen oder Ausbildung als Flugversuchsingenieur werden hier ergänzend genannt und bewertet.

Es folgen einzelne Verfahren und Prozesse zur Durchführung der Versuchsvorbereitung, Versuchsdurchführung und Versuchsnachbereitung. Dabei werden zunächst die einzelnen Rollen der Mitarbeiter im Flugversuch definiert, also Sicherheitspilot, Sicherheitsoperator, Experimental-

operator, ggf. auch Flugabbruchverantwortlicher, Luft- raumbeobachter und Dokumentationsverantwortlicher. Entsprechend den Verantwortlichkeiten verteilen sich dann Aufgaben wie das Erstellen von Flugtestkarten, Einholen von Informationen über Wetter und Fluggelände, Durchführung von Briefings, die Durchführung von Kontrollen anhand von Checklisten, die Koordination der Flugversuche sowie der abschließenden Dokumentation.

Ergänzend werden durch das Betriebskonzept Vorschläge gemacht, welche Checklisten, Protokolle und Berichte für die Versuchsvorbereitung und Ergebnissicherung sowie die Erhaltung der Einsatzfähigkeit der Luftfahrzeuge sinnvoll sind. Abschließend findet sich im Betriebskonzept noch eine wachsende Anzahl von Einzelmaßnahmen zur Beachtung im Experimentalbetrieb.

Die oben genannten Verfahren fließen zur Zeit ein in ein für das gesamte DLR gültige „Flight Test and Operations Manual for Unmanned Aerial Systems“, welches als eine freiwillige, der Gesetzgebung vorgreifende Maßnahme zur Erhöhung der Qualität und Sicherheit von Flugversuchen durch die DLR-Flugbetriebe geschaffen wird.

4. BETRIEBSERFAHRUNGEN / LAUFENDE ARBEITEN

4.1. Flugversuche



BILD 8: Schweb- und Lebensdauertests R350

Flugversuche mit den beschafften Systemen fanden bisher im Rahmen der Abnahme und anschließender Lebensdauer- und Reifetests statt. Die hierbei gemeinsam mit dem Hersteller festgestellten Einschränkungen für den Forschungsflugbetrieb erforderten Systemänderungen an Rotorkopf, Aufnahme des Hauptgetriebes, der Nutzlaststromversorgung und den Aktuatoren.

4.2. Reichweitentests

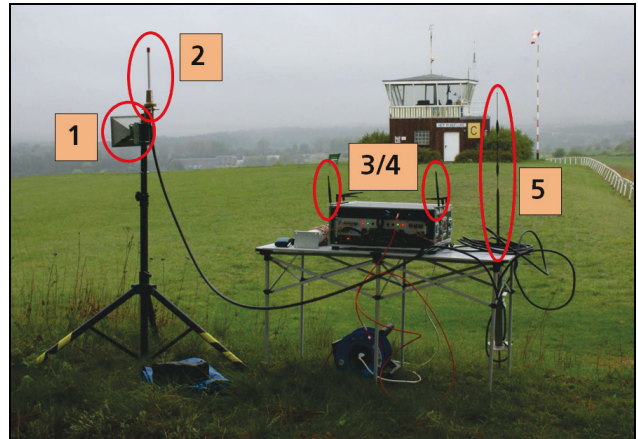


BILD 9: Bodenstationsaufbau mit Hornantenne 2,4 GHz (1), Omniantenne High Gain 2,4 GHz (2), Low Gain Omniantennen 2,4 Ghz / 900 MHz (3,4) und High Gain 900 MHz (5)

Vorbereitend für die Verwendung in anspruchsvollen Szenarien außerhalb der Sichtweite wurden mit der beschafften Hardware sowie ergänzenden Antennen unterschiedlicher Charakteristik Reichweitentests unter Realbedingungen durchgeführt. Dabei wurde das Szenario hinsichtlich der Wellenausbreitungsbedingungen nachgestellt und exemplarische Daten zwischen Hubschrauber und Bodenstation übertragen. Die Leistungsfähigkeit der redundanten Datenlinks im 2,4 GHz- und 900 MHz- Band wurde verglichen. Die vom Hersteller angegebenen Reichweiten wurden durch die Experimente bestätigt.

4.3. EMV-Test

Ebenfalls im Hinblick auf die zukünftige Nutzung der Experimentplattform wurde das Gesamtsystem mit allen Datenlinks in ein EMV-TestszENARIO mit einem bemannten Fluggerät des DLR (Do-228 CODE) eingebracht. Hier wurde ermittelt, ob Elektronik und Datenlinks andere Systeme stören oder von diesen gestört werden (BILD 10). Trotz teilweise erheblicher Sendeleistungen und breitbandiger Datenströme, beispielsweise aus Videofunkanwendungen, konnte keine gegenseitige Beeinflussung festgestellt werden.



BILD 10: EMV-Test mit Do 228 und Bodenstationen

4.4. Nutzlastintegration

Nachdem die Hubschraubersysteme fertig definiert und deren genaue Abmaße verfügbar waren, konnte die Anpassung der DLR-seitig erforderlichen Umweltsensorik erfolgen. Die verfügbaren oder geplanten Sensoren, insb. Laserscanner unterschiedlicher Reichweite und Öffnungswinkel, aber auch Kamerasysteme wurden in einer Studie in ihren Einbaupositionen und -orientierungen variiert, um für die unterschiedlichen Aufgaben die bestmögliche Sensorkonfiguration zu finden. Dabei sollten die Sensorsichtfelder möglichst wenig durch Kufen, Rumpfteile oder Rotoren eingeschränkt werden (BILD 11). Begrenzend auf mögliche Einbaupositionen wirkten sich aber auch Schwerpunkt-betrachtungen, strukturelle Randbedingungen und vorhandene Einbauräume aus.

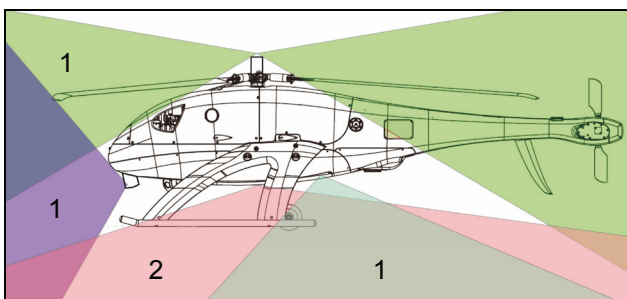


BILD 11: Sensororientierungen und Sichtbereiche DLR-Nutzlast (1: Laserscanner, 2: Kamera)

Vorläufiges Ergebnis der Konzeptionierung ist ein weitgehend modulares und hinsichtlich der Einbauwinkel verstellbares Grundgerüst, welches mit unterschiedlichen Sensoren bestückt und an verschiedenen Einbaupositionen montiert werden kann (BILD 12).

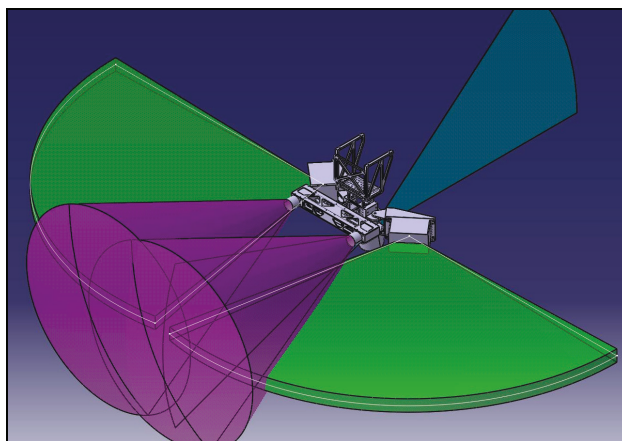


BILD 12: Montage Stereokamera und 2x Laserscanner mit Öffnungswinkeln

Im Zuge der Auslegung und Einrüstung eigener Sensorik wurde der Nutzlastzugang auch für zukünftige Nutzer dokumentiert, ergänzend vermessen und, wo nötig, getestet. Gemeinsam mit dem Hersteller sind hier insbesondere noch Abhängigkeiten zwischen Nutzlast und zulässigen Schwerpunkt-lagen zu erarbeiten, da es infolge des Kraftstoffverbrauchs während eines Versuches zu signifikanten Schwerpunkt-wanderungen kommt. Durch Stresstests werden zudem die Komponenten der Stromversorgung (Generator, Stromwandler und Pufferakku) auf Zuverlässigkeit und thermische Belastungsfähigkeit geprüft.

5. ANWENDUNGEN

Die Forschungsplattform superARTIS ist bereits Bestandteil unterschiedlicher Projekte und Studien.

In der durch das Bundesamt für Ausrüstung, Informationstechnik und Nutzung der Bundeswehr (BAAINBw) beauftragten Studie Fast Rotorcraft UAS wurde analysiert, welche Maßnahmen zur Geschwindigkeitssteigerung heutiger VTOL-UAS beitragen können. Dafür wurde auf Basis des R350 ein detailliertes Flugleistungsmodell erstellt. Dieses konnte anschließend variiert und durch analytische Abschätzungen und Simulationen die Auswirkungen auf die Fluggeschwindigkeit bestimmt werden. Betrachtet wurden unter anderem die Steigerung der Motorleistung bzw. Änderung der Antriebscharakteristik, Änderung der Größe und des Abfluggewichtes, Änderungen des Rotorsystems sowie Variationen der Konfiguration mit zusätzlichen vortriebs- und auftriebsentlastenden Komponenten.

In der Doppelstudie Stabile Navigation / Geländevorerkundung, welche ebenfalls für das BAAINBw erstellt wird, werden die unbemannten Hubschrauber mit umfangreicher Umweltsensorik ausgestattet. Die Daten werden allerdings nicht einem Operator zur Verfügung gestellt, sondern fließen direkt in die Navigation bzw. Flugsteuerung ein. Dies ermöglicht das Fliegen in GPS-abgeschatteter oder gestörter Umgebung sowie in Szenarien, in denen die Hindernispositionen nicht im Vorhinein bekannt sind. Für diese Experimente kommt ein Großteil der geschaffenen Forschungsumgebung und Infrastruktur zum Einsatz.

Im DLR-internen Projekt ATON wird die Forschungsplattform zur Demonstration von Technologien für die Naviga-

tion und Landeplatzbewertung auf anderen Himmelskörpern (Mars, Mond, Asteroiden) verwendet. Mittels Laserhöhenmesser und Navigationskamera soll der Endanflug einer Sonde gesteuert werden. Durch die Verwendung der unbemannten Hubschrauber lässt sich das Verfahren mit realistischen Trajektorien bereits auf der Erde testen.

6. FAZIT

In den letzten drei Jahren wurde, basierend auf den Erfahrungen des DLR mit bemannten und unbemannten Forschungsflugzeugen, eine Plattform für die Entwicklung und Erforschung unbemannter VTOL UAS mit einer Abflugmasse von 150 kg geschaffen. Neben den Basissystemen wurden ein maßgeschneidertes Experimentalsystem, eine Simulationsinfrastruktur sowie eine Flugtestinfrastruktur aufgebaut. Eine HIL-Simulation sowie die Möglichkeit zum Eingriff in die Flugsteuerung machen die Plattform zu einem deutschlandweit einmaligen Forschungsinstrument, welches bereits im ersten Betriebsjahr in diverse Vorhaben und Studien eingebunden wurde.

SCHRIFTTUM

- [1] Krause, Stefan (2011) Multi-purpose environment awareness approach for single line laser scanner in a small rotorcraft UA. In: Journal of Intelligent and Robotic Systems. Springer. ICUAS 2011, 24.-27. Mai 2011, Denver, USA. ISBN (DOI) 10.1007/s10846-011-9572-6.
- [2] Adolf, Florian-Michael und Andert, Franz und Lorenz, Sven und Goormann, Lukas und Dittrich, Jörg (2009) An Unmanned Helicopter for Autonomous Flights in Urban Terrain. Springer. German Workshop on Robotics, 09.-10. Jun. 2009, Braunschweig, Deutschland. ISBN 978-3-642-01212-9.
- [3] Dauer, Johann C. und Lorenz, Sven (2013) Modular Simulation Framework for Unmanned Aircraft Systems. AIAA Modeling and Simulation Technologies Conference, 19.-22. Aug. 2013, Boston, USA.
- [4] Andert, Franz und Bähge, Florian und Frehse, Stefan und Dittrich, Jörg (2013) Vision-based navigation and exploration strategies for unmanned helicopters in disaster scenarios. AHS International Specialists' Meeting on Unmanned Rotorcraft, 22.-24. Jan. 2013, Scottsdale, AZ, USA.
- [5] Mitscher, Georg, Brieger, Oliver (2013) Flight Test and Operations Manual for Unmanned Aerial Systems (UAS), internes Dokument, DLR Flugbetrieb
- [6] Andert, Franz und Bähge, Florian und Dittrich, Jörg (2012) Stereoskopische Bewegungsschätzung zur optisch gestützten Navigation von unbemannten Luftfahrzeugen. Deutscher Luft- und Raumfahrtkongress 2012, 10.-12. Sept. 2012, Berlin.
- [7] Lorenz, Sven (2010) Adaptive Regelung zur Flugbereichserweiterung des Technologiedemonstrators ARTIS. Dissertation. DLR-Forschungsbericht. DLR FB 2010-25, 201 S. Deutsches Zentrum für Luft- und Raumfahrt e.V..