

SIMULATORUNTERSTÜTZTE ERPROBUNG UND TRAINING AUTOMATISCHER FLÜGE MIT EINEM UNBEMANNTEN TRAGSCHRAUBER

I. Pruter, S. Benders, H. Duda, S. Lorenz, F. Sachs
DLR Institut für Flugsystemtechnik, 38108 Braunschweig, Deutschland

Zusammenfassung

Gegenstand des vorliegenden Beitrages ist die Erprobung eines Flugreglers für automatische Flüge mit einem modifizierten Tragschrauber auf Basis eines MTOfree. Tragschrauber unterscheiden sich im Steuerverhalten sowohl von Flächenflugzeugen als auch von Hubschraubern signifikant, was die Entwicklung eines eigenständigen Regelungskonzepts notwendig macht. Um eine größtmögliche Sicherheit im Flugversuch zu erreichen, wurde ein stufenweises Erprobungskonzept entwickelt, das auf die einzelnen Entwicklungsschritte abgestimmt ist und somit optimal auf den Flugversuch vorbereitet. Dieses Konzept umfasst sowohl die Ausbildung eines Sicherheitspiloten, der bei Bedarf das Fluggerät vom Boden über eine Fernsteuerung steuert, als auch den Einsatz eines Simulators für die ersten Erprobungsschritte des Flugreglers unter simulierten Flugbedingungen sowie Hardwaretests direkt am Fluggerät. Dabei stellt gerade die Ausbildung des Sicherheitspiloten aufgrund der speziellen dynamischen Eigenschaften des Tragschraubers mit etwa 400 kg Abflugmasse und 8,4 m Rotordurchmesser und der geringen Erfahrung mit ferngesteuerten Tragschraubern dieser Größe eine große Herausforderung dar.

1. EINLEITUNG

Im Rahmen des DLR Projekts „ALAADy¹ Demonstrator“ wird ein Tragschrauber der Firma AutoGyro vom Typ MTOfree modifiziert und automatisiert mit dem Ziel unbemannten Lufttransport durchzuführen (siehe BILD 1).



BILD 1. Tragschrauber Versuchsträger, modifiziert auf der Basis eines AutoGyro MTOfree

Die Entwicklung von Frachtdrohnen gewinnt gegenwärtig an Bedeutung, um den Transport von Waren zu revolutionieren. Die Vorteile sind kürzere Lieferzeiten, reduzierte Verkehrsbelastungen, geringere Luftverschmutzungen aufgrund der direkten Flugwege sowie eine bessere Erreichbarkeit für schwer zugängliche Gegenden. Im Bereich einer Nutzlast

¹ Automated Low Altitude Air Delivery

von wenigen Kilogramm sind bereits einige Drohnen im Einsatz wie der DHL Parcelcopter [1], Amazon Prime Air und Googles Project Wing. Konzepte mit einer höheren Nutzlast befinden sich noch alle in der Testphase. Boeing oder auch Giff Aviation erforschen aktuell Frachtdrohne mit einer Nutzlast um die 200 kg. Ambitionierte Pläne verfolgt das Start-up Nautilus [2], das einen autonomen Lufttransport mit bis zu 91 t Nutzlast umsetzen will. Der Lockheed K-Max [3] ist eine Entwicklung einer Frachtdrohne aus einem bestehenden Hubschrauber, die in ihrer Entwicklung bereits sehr weit fortgeschritten ist.

Mit dem Demonstrator sollen verschiedene Aspekte des automatischen Frachttransportes demonstriert werden. Der Fokus liegt auf dem Transport einer Fracht von bis zu 200 kg inklusive der Einbindung in eine einfache Logistikkette, einer operationszentrischen Risikobewertung, das automatische Überwachen des Systemzustandes gegenüber der Betriebsannahmen sowie auf dem sicheren Missionsabbruch bei Verlassen des zulässigen Flugbereichs [1].

Als geeignetes Fluggerät wurde der Tragschrauber gewählt, da er im Vergleich zu Flächenflugzeugen nur sehr kurze Start- und Landerollstrecken benötigt. Weitere Vorteile sind geringe technische Komplexität im Vergleich zum Hubschrauber und den damit verbundenen günstigen Anschaffungs- und Wartungskosten sowie seine ausgeprägte Langsamflugfähigkeit und Fähigkeit zur senkrechten Autorotation. Im Zuge der neuen SORA-Richtlinien (Specific Operations Risk Assessment [4]) zeigte sich zudem, dass der Tragschrauber inhärente Sicherheitsmerkmale mit

sich bringt, die für einen Lasttransport im unteren Luftraum von Vorteil sein könnten: z.B. Bei Auftreten einer Fehlfunktion ermöglicht der frei drehende Rotor eine sanfte Landung wie an einem Fallschirm.

1.1. Tragschraubertechnik

Bei dem eingesetzten Tragschrauber handelt es sich um eine modifizierte Variante eines AutoGyro MTO-free, bei dem das Cockpit entfernt und die zwei Sitzplätze gegen eine Aufnahme für Nutzlast, den Flugsteuerungsrechner, Aktuatoren und Batterien ausgetauscht wurden.

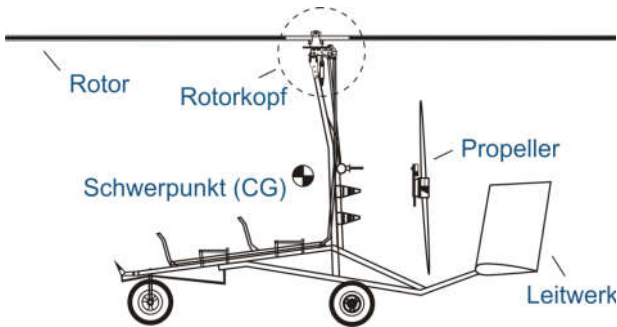


BILD 2. Seitenansicht des AutoGyro MTOfree [5]

Anders als beim Hubschrauber wird beim Tragschrauber der Auftrieb (schon im Nominalfall) in einem Autorotationszustand erzeugt. Bei der Autorotation wird der Rotor durch Fahrtwind in Drehbewegungen versetzt, indem er von unten nach oben durchströmt wird und so den nötigen Auftrieb erzeugt. Der benötigte Vortrieb wird von einem Rotax Triebwerk mit einem Druckpropeller geliefert. Die gesamte Rotorebene lässt sich um die Nick- und Rollachse neigen, indem die Steuerausschläge des Piloten über Steuerstangen an den Rotor übertragen werden (über den Pitch Pivot Bolt in der Nickachse bzw. den Roll Pivot Bolt in der Rollachse, vgl. BILD 3) die eine Steuerung des Tragschraubers in der Längs- und Seitenbewegung realisiert [6]. Die Rotorblätter sind gelenkig über ein zentrales Schlaggelenk (Teeter Bolt, vgl. BILD 3) an der Rotornabe befestigt, so dass sie auf die an den Rotorblättern vorherrschenden Luftkräften mit einer freien Schlagbewegung reagieren [7]. Diese Art von Rotor wird als Seesaw-Rotor bezeichnet [8].

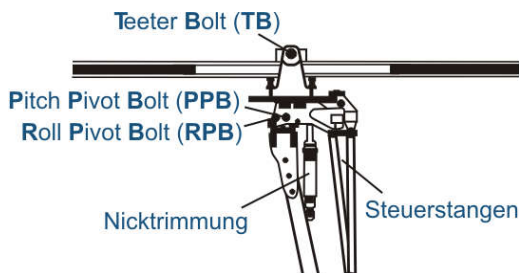


BILD 3. Detailansicht des Rotorkopfes des AutoGyro MTOfree [5]

Eine pneumatische Nicktrimmung erlaubt kräftefreies, stationäres Fliegen für den Piloten. Zusätzlich verfügt der Tragschrauber über einen mechanischen Vorrotationsmechanismus, der den Rotor vor dem Start auf die Startdrehzahl (ca. 200 U/min) beschleunigt.

Der Tragschrauber verfügt über ein Höhenleitwerk zur Steigerung der Nickstabilität. Ein Seitenleitwerk mit steuerbarem Seitenruder verbessert die Richtungsstabilität und ermöglicht eine Steuerung in der Gierachse. Das Dreibeinfahrwerk verfügt über ein lenkbares Bugrad und bremsbare Räder des Hauptfahrwerkes.

1.2. Modifizierungen

Für die angestrebte Automatisierung wird der Tragschrauber mit geeigneten Avionikkomponenten wie Flugsteuerrechner, Sensoren und Aktuatoren ausgestattet [9]. Über die Aktuatoren können Bugrad, Radbremse, Gashebel, Roll- und Nickwinkel des Rotorkopfes, Seitenruder und Choke angesteuert werden. Neben den Aktuatoren können die Funktionen des Instrumentenpilzes des bemannten Tragschraubers elektronisch über die Fernsteuerung oder die automatische Flugsteuerung gesteuert werden [10].

Die zur Regelung notwendigen Flugmessdaten werden über ein inertiales Navigationssystem zur Verfügung gestellt (betrifft u.a. Drehraten, Lagewinkel, geodätische Geschwindigkeiten, Position, Höhe gegenüber dem WGS-84² System [11]). Zusätzlich ist der Tragschrauber mit einem Luftdatensystem (einer 5-Loch-Sonde sowie zusätzliche Sensoren) am Nasenmast ausgestattet. Mit diesem werden die Fluggeschwindigkeit, Anstell- und Schiebewinkel, die Außenlufttemperatur und der barometrische Druck bestimmt. Ein Radaraltimeter liefert die Höhe über Grund. Darüber hinaus werden die Drehzahlen von Motor und Rotor sowie verschiedene Temperatur- und elektrische Spannungsmessungen erfasst.

1.3. Versuchsaufbau

Während der Reglererprobung im Flug wird der Tragschrauber vom Sicherheitspiloten kontrolliert, der den Tragschrauber über eine Fernsteuerung steuern kann. Unterstützt wird der Sicherheitspilot von einem überwachenden Piloten (detaillierte Beschreibung siehe Abschnitt 3.1). Als weitere Absicherung wird der gesamte Flugbetrieb über die Bodenstation von Versuchsingenieuren überwacht, die bei Bedarf Warnungen an Sicherheitspilot und überwachenden Piloten aussprechen oder bei Überschreiten des zulässigen Flugbereichs das Fluggerät terminieren können. Zusätzlich wird während des

² World Geodetic System 1984

gesamten Flugversuchs der Luftraum beobachtet, um zu vermeiden, dass unbefugter Luftverkehr in das Fluggebiet eindringt. Der Aufbau ist in BILD 4 illustriert.



BILD 4. Versuchsaufbau bei den unbemannten Flügen

2. REGELUNGSKONZEPT

Das Regelungskonzept beinhaltet einen stufenweisen Aufbau, um im ersten Schritt den Funktionsumfang zu minimieren und damit Sicherheit durch Einfachheit zu schaffen. Der Fokus wird dabei auf eine Demonstrationsmission gelegt. Erst im zweiten Schritt wird eine individuelle Bahnplanung und optimierte Reglerperformance angestrebt.

Das Konzept sieht die Regelung der Schubhebelstellung, des Nick- und Rollsteuerwinkels am Rotorkopf, des Bugradwinkels, des Seitenruderausschlags, der Radbremse und der Vorrotation vor.

2.1. Bahnplaner

Der bestehende Bahnplaner generiert alle für die Streckenführung wichtigen Bahnparameter, so dass die in BILD 5 dargestellte Demonstrationsplatzrunde erfolgen wird.

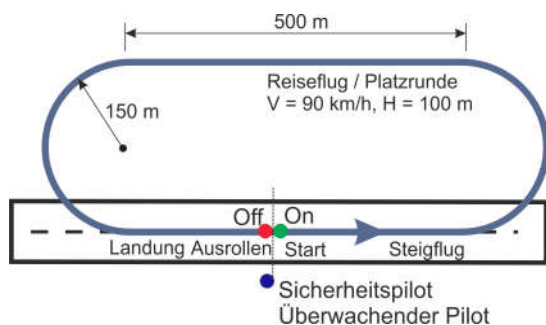


BILD 5. Demonstrationsmission: automatische Platzrunde³

Dies umfasst neben der Kursvorgabe, Streckenangaben und der seitlichen Ablage, Parameter zum Kurvenflug und Höhensteuerung sowie das Einleiten des Sinkfluges und Abfangbogens zur Landung.

³ SP: Sicherheitspilot, V: Fluggeschwindigkeit, H: Höhe

Das Bahnplanungskonzept sieht vor, dass bei Einschalten des Reglers zunächst die GPS-Höhe als neue Referenzhöhe definiert wird sowie die Anfangswerte der Lagekoordinaten, des Kurswinkels und des Bahnazimuts festgehalten werden. Dieses Vorgehen ermöglicht eine einfache Bahnplanung um den Ausgangszustand herum.

2.2. Regler Modi

Der Regler für die Demonstrationsmission umfasst 8 verschiedene Modi, die optimal auf die jeweilige Flugphase abgestimmt sind. Im Einzelnen werden während einer Mission die in TAB 1 angegebenen Modi durchlaufen:

TAB 1. Regler Modi für die automatische Platzrunde

Mode	Beschreibung
0 Initialisierung	Anfangswerte werden initialisiert und Aktuatoren gehalten
1 Vorrotation	Rotor wird auf Startdrehzahl beschleunigt
2 Start	Beschleunigen in Startrichtung und Abheben
3 Steigflug	Steigflug mit Vollgas in Startrichtung
4 Reiseflug	Halten von Höhe und Geschwindigkeit, Rechts-/Linksplatzrunde, Sinkflug
5 Landung	Abfangbogen und Aufsetzen
6 Ausrollen	Bugrad wird aufgesetzt und verzögert
7 Anhalten	Hält an

Beim Einschalten des Flugregelungssystems werden in Mode 0 die Anfangswerte des Ausgangsflugzustandes initialisiert (vgl. Abschnitt 2.1). Der aktuelle Zustand der Aktuatoren wird gehalten.

Nach ca. fünf Simulationsschritten wird auf Mode 1 (Vorrotation) umgeschaltet. Dafür wird die Motordrehzahl zunächst auf 2100 U/min erhöht, anschließend wird der Rotor vorrotiert. Ab einer Rotordrehzahl von ca. 100 U/min wird die Motordrehzahl langsam gesteigert, bis eine Rotordrehzahl von 200 U/min erreicht wird.

Dies ist die Voraussetzung für das Umschalten auf Mode 2, den Start. Die Bremse wird gelöst, der Rotorkopf in die hinterste Position gebracht, Vollgas gegeben und der Tragschrauber beschleunigt. Die Regelung der Rotorkopfneigung erfolgt in Abhängigkeit von der Rotordrehzahl, dem Nickwinkel und der Nickgeschwindigkeit. Kurs und Querposition werden über den Rollsteuerwinkel geregelt, der Gierwinkel über das Bugrad und Seitenruder.

Sobald die Kriterien für den Steigflug erreicht sind, wird Mode 3 (Steigflug) aktiviert. Während des Steig-

fluges fliegt der Tragschrauber in Bahnrichtung mit Vollgas. Über den Nicksteuerwinkel wird die Fluggeschwindigkeit (90 km/h) geregelt. Kurs und Querposition werden weiterhin über den Rollsteuerwinkel geregelt, durch eine Rückführung der Giergeschwindigkeit auf das Seitenruder erfolgt eine Gierdämpfung.

Beträgt der Höhenunterschied zur vorgegebenen Platzrundenhöhe weniger als 20 m wird Mode 4 aktiviert und der Tragschrauber geht in den Reiseflug über. Im Reiseflug wird die Fluggeschwindigkeit (90 km/h) über den Schub und die Höhe über den Nicksteuerwinkel geregelt. Die Regelung von Kurs und Querposition erfolgt weiterhin über den Rollsteuerwinkel, zusätzlich wird der Kurvenflug über eine Vorsteuerung eingeleitet. Die Gierbewegung wird über das Seitenruder gedämpft. Der Sinkflug wird abhängig vom Wind so eingeleitet, dass der anvisierte Landepunkt bestmöglich getroffen wird. Das Einleiten erfolgt durch ein Nicksteuerkommando.

In 15 m Höhe über Grund wird Mode 5, die Landung, aktiviert. In dieser Flugphase wird der Schub langsam auf Leerlauf gestellt. Die Höhenregelung erfolgt über den Nicksteuerwinkel unter Vorgabe des im Bahnplaner generierten Abfangbogens. Über den Rollsteuerwinkel erfolgen die Regelung von Kurs und Querposition, der Gierwinkel wird über das Seitenruder gesteuert. Über das Seitenruder erfolgt eine Dämpfung der Gierbewegung.

Ist das Kriterium für den Bodenkontakt erfüllt, wird in Mode 6 (Ausrollen) übergegangen. Der Schub steht weiterhin auf Leerlauf, der Nicksteuerwinkel wird über Nickgeschwindigkeit und Nickwinkel geregelt, beim Aufsetzen wird der Nicksteuerwinkel langsam durchgezogen. Kurs und Querposition werden über den Rollsteuerwinkel, der Gierwinkel über das Bugrad und das Seitenruder gesteuert.

Sobald die Geschwindigkeit über Grund einen Grenzwert unterschreitet wird Mode 7 (Anhalten) aktiviert. In dieser Phase wird die Bremse aktiviert und der Rotorkopf in die vorderste Position gebracht.

3. VORGEHEN BEI DER ERPOBUNG DES FLUGREGLERS

Um das Risiko für die Erprobung des Reglers im Flug zu minimieren wurde ein stufenweises Erprobungskonzept entwickelt, das darauf abzielt, größtmögliche Sicherheit für den Flugbetrieb zu erreichen und die Effizienz der Flugversuche zu steigern. Die Vorgehensweise bei der Erprobung des Flugreglers ist BILD 6 zu entnehmen.

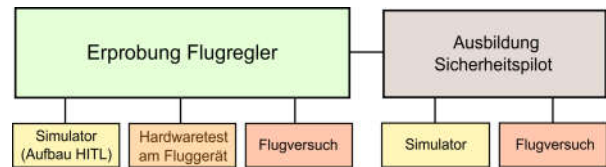


BILD 6. Vorgehensweise bei der Erprobung des Flugreglers

Das Flugregelungssystem wird im ersten Schritt im Simulator erprobt. Durch die Erprobung kompletter Flugabläufe unter simulierten Flugbedingungen sollen die meisten potentiellen Fehlfunktionen des Reglers schon im Vorfeld detektiert und behoben werden. Zusätzlich sind bis zur Gesamtintegration des Reglers in die Flugsteuerungssoftware weitere Software und Hardwaretests vorgesehen. Mithilfe dieser Tests soll ein optimaler Ausgangszustand für die Reglererprobung geschaffen werden, um Zeit und Kosten im Flugversuch zu reduzieren. Einen ähnlichen Ansatz untersuchten bereits Johnson und Fontaine 2001 [12]. Sie kamen zu dem Schluss, dass bereits für ein sehr kostengünstiges UAV⁴ der Aufbau einer sehr einfachen HITL⁵ Simulation geeignet ist, um die Flugerprobung effizienter durchzuführen. Cai et al. [13] verfolgen einen ähnlichen Ansatz zur Erprobung ihrer UAVs mit großem Erfolg. Obwohl es sich in beiden Fällen um erheblich günstigere UAVs mit geringerer Nutzlast handelte, waren auch dort schon signifikante Vorteile festzustellen.

Trotz des eigentlichen Ziels ein vollautomatisches Fluggerät zu demonstrieren, das geeignet ist Frachttransport durchzuführen, ist ein Sicherheitspilot während der Erprobungsflüge vorgesehen. Mit Hilfe des Sicherheitspiloten können alle Sicherheitsmaßnahmen im praktischen Flug erprobt, alle Systemkomponenten getestet und die Flugtüchtigkeit der neu entwickelten Transportdrohne nachgewiesen werden. Die Aufgabe des Sicherheitspiloten in der Flugerprobung des Fluggerätes und des Flugreglers im Speziellen ist es, das Fluggerät bei der Reglererprobung in den gewünschten Flugzustand über eine Fernsteuerung zu fliegen, aber auch in kritischen Situationen einzugreifen und den Tragschrauber zu stabilisieren. Die ersten manuellen Flüge zeigten jedoch, dass die Ausbildung eines Sicherheitspiloten eine größere Herausforderung darstellt als angenommen. So entsprachen Start und Landung des ersten Flugversuches nicht den gewünschten Anforderungen eines sicheren Fluges: der Pilot konnte zwar erfolgreich und ohne Schaden wieder landen, die Manöver wurden aber unpräzise geflogen und es konnte beobachtet werden, dass der Trainingsstand des Piloten unzureichend war. Neben dem Training des Nominalverhaltens zielt das Training im Simulator zusätzlich darauf ab, unter nicht optimalen Versuchsbedingungen einen sicheren und souveränen Umgang mit dem Luftfahrzeug zu erlangen. Studien

⁴ Unmanned Aerial Vehicle

⁵ Hardware-in-the-Loop Simulation

zu simulatorunterstütztem Training von UAV-Sicherheitspiloten, so wie hier definiert, sind den Autoren nicht bekannt.

3.1. Erprobungshilfsmittel

Tragschraubersimulator

Für die Erprobung des Flugreglers und das Training des Sicherheitspiloten wird ein im DLR entwickelter Flugsimulator verwendet [17], der an die Flugeigenschaften des modifizierten MTOfree angepasst wurde. Der Simulator verfügt über einen mit einem 2 m Radius gebogenen Sichtbereich (horizontal 180°, vertikal 60°). Das Sichtsystem ist eine Eigenentwicklung des DLRs, das auf Satellitenbilder der Firma GeoContent GmbH zurückgreift und ein auf SRTM⁶ Daten basierendes Höhenmodell umfasst. Zusätzlich wurde der Flughafenbereich detailliert modelliert (Gebäude, Bäume, etc.), so dass ein 3-D Eindruck entsteht, der die Höhenabschätzung gerade in Bodennähe verbessert.

Das für die Entwicklung des Reglers und Training des Sicherheitspiloten verwendete Simulationsmodell wurde in Matlab[®]/Simulink[®] aufgebaut. Es umfasst Module zur Berechnung der Erdgravitation, Standardatmosphäre, Wind, Massen und Trägheitsmomente, Aerodynamik, Fahrwerk, Antrieb und Flugdynamik von Rumpf und Rotor. Rumpf und Rotor werden als zwei getrennte Körper mit Masse und Trägheit betrachtet, die über Drehgelenke, den Pitch Pivot Bolt in der Nickachse und den Roll Pivot Bolt in der Rollachse, miteinander gekoppelt sind [16]. Aufgrund der Annahme, dass die Masse des Rotors klein gegenüber der Masse des Rumpfes ist, kann die Translationsbewegung des Rotorkopfes direkt von der des Rumpfes abgeleitet werden [16]. Die Bewegungsgleichungen des Rotors reduzieren sich somit auf die der Drehbewegung aus der Steuerung. Zusätzlich wird die Schlagbewegung des Rotors (vgl. Abschnitt 1.1) berücksichtigt.

Das flugdynamische Modell ist eine Abwandlung des MTOsport Modells, das in [17] vorgestellt und mittels Systemidentifizierung angepasst und validiert wurde [18]. BILD 7 stellte die Simulationsgüte hinsichtlich einzelner Effekte dieses Simulationsmodells dar. Da nur kleine Abwandlungen vorgenommen werden mussten, wird davon ausgegangen, dass das modifizierte Simulationsmodell eine ähnliche Simulationsgüte aufweist.



BILD 7. Subjektive Einschätzung der Simulationsgüte nach [17]

Bis auf die Modellierung von Lastwechseln kann mit dem Simulationsmodell eine gute bis sehr gute Abbildung der realen Effekte erreicht werden. Die meisten Manöver (Start, Steigflug, Geradeausflug, Kurvenflug, Landung) werden gut abgebildet, so dass davon ausgegangen werden kann, dass ein realistisches Flugverhalten vorliegt und somit der Simulator sowohl zum Training des Sicherheitspiloten als auch zur Erprobung des Flugreglers geeignet ist [17]. Das Simulationsmodell wird im Verlauf der ersten Flugversuche entsprechend der aufgezeichneten Flugdaten an das Flugverhalten des Flugversuchsträgers angepasst.

Landungen im Simulator sind aufgrund des fehlenden räumlichen Sehens und der damit verbundenen schwierigen Höhenabschätzung etwas anspruchsvoller durchzuführen, als dies im echten Flugversuch der Fall wäre.

Versuchspiloten

Die Versuchspiloten bestehen aus einem Sicherheitspiloten und einem überwachenden Piloten, die beide ins Simulatortraining eingebunden werden. Der Sicherheitspilot ist der verantwortliche Flugzeugführer und kann den Tragschrauber während der Flugversuche über eine Fernsteuerung bedienen. Dem überwachenden Piloten stehen während der Versuche verschiedene Hilfsmittel zur Verfügung, so dass er den Sicherheitspiloten unterstützen und bei Bedarf Hilfestellungen während der einzelnen Flugphasen geben kann. Dazu werden über ein Tablet mit der Bodenkontrollstationssoftware relevante Informationen über den Flugzustand (Fluggeschwindigkeit, Höhe, Motordrehzahl, Rotordrehzahl, Öldruck, Öltemperatur, Rolllage) dem überwachenden Piloten zur Verfügung gestellt (vgl. BILD 8). Zusätzlich wird die Bewegung des Tragschraubers im zulässigen Flugbereich angezeigt. Diese Anzeigen sollen dazu dienen das Situationsbewusstsein der Versuchspiloten zu verbessern.

⁶ Shuttle Radar Topography Mission [15]

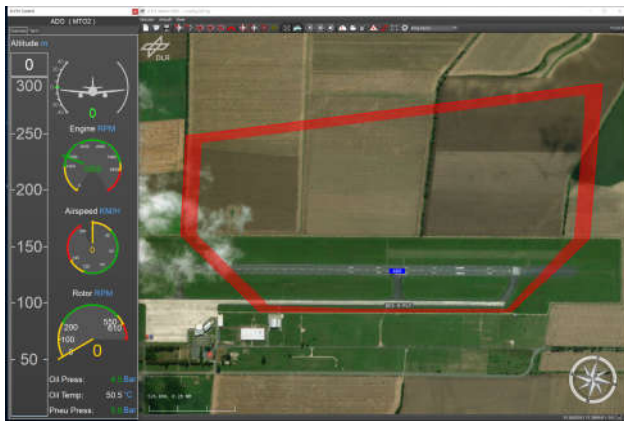


BILD 8. Tabletanzeige: Flugbereichsanzeige und Flugzustandsdarstellung

Zulässig sind Flüge nur innerhalb des roten Grenzbereichs (ca. 1000 x 2000 m). Nähert sich der Tragschrauber dieser Grenze an wird der Sicherheitspilot gewarnt, so dass er entsprechende Steuerkommandos einleiten kann. Verlässt der Tragschrauber den vorgegebenen Bereich, wird ein Flugabbruch ausgelöst (Flugterminierung). Die zulässige Höhe beträgt 100 m (nördlicher Flugplatzbereich) bis max. 200 m (südlicher Flugplatzbereich). Durch den Flugabbruch beim Verlassen des Flugbereiches, wird sichergestellt, dass der Tragschrauber den zulässigen Sicherheitsbereich nicht verlässt [19].

Der eingesetzte Versuchspilot verfügt über einen Ultraleicht-Flugschein (aerodynamisch gesteuerte UL) sowie langjährige Erfahrung im Modellflug mit diversen Modellen (u.a. Fläche bis 150 kg und Hubschrauber bis 90 kg sowie Modelltragschrauber). Zusätzlich absolviert er eine Ausbildung für Tragschrauber.

Der überwachende Pilot hat langjährige Flugerfahrung in diversen Bereichen (Tragschrauber, Fläche, Hubschrauber) und verfügt über Lizenzen als Fluglehrer (insgesamt ca. 6000 Flugstunden auf diversen Fluggeräten).

Anpassung für das Training der Versuchspiloten

Für das Training der Versuchspiloten wird, wie in BILD 9 zu erkennen, der Blickwinkel des Sicherheitspiloten als feste Position relativ zur Landebahn im Sichtsystem konfiguriert. Als Trainingsflughafen steht Braunschweig zur Verfügung. Die Flugversuche werden am Flughafen Cochstedt durchgeführt. Da für die Flugversuche nur die Position an der Piste relevant ist, spielt die unterschiedliche Beschaffenheit der beiden Flughäfen keine große Rolle, so dass keine Verschlechterung der Trainingseffektivität zu erwarten ist.



BILD 9. Simulatortrainingsumgebung

Wie später bei den Erprobungsflügen erfolgt die Steuerung über eine Fernsteuerung. Über den rechten Stick wird in der Längsachse das Gas, in der Querachse das Rollsteuer gesteuert. Über den linken Stick wird in der Längsachse das Nicksteuer, in der Querachse das Seitenruder kommandiert. Zusätzlich lassen sich über die Fernsteuerung der Motor starten (Magnetschalter, Motor Startklappe, Spannungsversorgung und Motorstart) sowie der Vorrotationstaster, die Rotorbremse, Radbremse und der Kompressor der Druckluftanlage für die Trimmung bedienen. Der Sicherheitspilot hat zudem jederzeit die Möglichkeit den Regler ein- und auszuschalten.

Während der Pilot im manuell gesteuerten Tragschrauber seine Eingaben entsprechend der fühlbaren Steuerkräfte anpasst, ist dies bei der hier gewählten ferngesteuerten Konfiguration nicht möglich. Dies wird erreicht, indem das dynamische Modell derart modifiziert wird, dass nun direkt die Steuerausschläge statt der Kräfte in die Bewegungsgleichungen einfließen.

3.2. Training der Versuchspiloten

Während der Ausbildung von Piloten zum Führen eines Tragschraubers wird der Umgang mit den speziellen Eigenschaften des Luftfahrzeugs geschult. Dafür benötigt ein Flugschüler i.d.R. mehr als 30 Flugstunden und trainiert einige hundert Landungen unter Aufsicht eines erfahrenen Fluglehrers.

Durch die Krafterückmeldung des Tragschraubers erhält der Pilot ein wichtiges haptisches Feedback über den Steuerknüppel. Bei der eingesetzten Fernsteuerung entfällt diese Wahrnehmung. Aufgrund der hohen Agilität des Fluggerätes muss er abhängig vom Flugzustand antizipieren, wie sich eine Steuerbewegung auf die Entwicklung der Fluglage auswirkt. Feedback, das zu Korrekturen seiner Steuereingaben führt, kann nur optisch über eine Änderung der Fluglage oder der Bahn (bei größeren Entfernungen) erhalten werden. Der Verlust der körpereigenen Bewegungswahrnehmung (Beschleunigung, Drehung, usw.) ist äußerst benachteiligend. Auch ein visuelles Feedback geht verloren, da der Pilot permanent das Luftfahrzeug beobachten muss und die Steuerhebel der Fernsteuerung primär „blind“ be-

dient. Eine Krafrückmeldung am Stick wäre zwar hilfreich, aufgrund der nur schwierigen Realisierbarkeit aber nicht effizient umsetzbar.

Nach ersten Erfahrungen im Flugversuch wurden die Ausschlagsbereiche, Trimmwerte und der Zusammenhang zwischen Amplitude des Steuerknüppels zum Aktuatorausschlag optimiert. Zusätzlich wurde die Steuerung so erweitert, dass Kopplungseffekte aufgrund von Schubänderungen minimiert werden. Das durch eine Veränderung des Schubes verursachte Ungleichgewicht wird durch Steuerausschläge in Roll-, Nick- und Gierachse kompensiert. Damit wurde die Fliegbarkeit deutlich verbessert.

Für das Training im Simulator werden dieselben Bedingungen wie im Flugversuch geschaffen. Die Position des Sicherheitspiloten in der Simulation ist mittig am Rand der Piste. Von dort aus steuert er den Tragschrauber mithilfe der Fernsteuerung. Es können je nach Windbedingungen Links- und Rechtsplatzrunden geflogen werden.

3.2.1. Ergebnisse des Simulatortrainings

Da das Simulatortraining dem Flugversuch vorausgeht, hat das Team aus Sicherheitspilot und überwachendem Piloten die Möglichkeit sich aufeinander abzustimmen und geeignete Strategien zu entwickeln den Sicherheitspiloten bestmöglich zu unterstützen. Das Training umfasst den gesamten Flugablauf. Dazu gehören die Startprozedur, das Crew Ressource Management (CRM) im Flug sowie die Landeprozedur. Die korrekte Ausführung der Startprozedur konnte bereits während der ersten Trainingseinheiten wesentlich verbessert werden. Das Hauptaugenmerk lag dabei auf der richtigen Abfolge der Nicksteuerbewegungen, die entscheidend für einen sicheren Start ist. So muss der Knüppel während der Vorrotation in vorderster Position gehalten werden, anschließend zum Beschleunigen in die hinterste gebracht und erst mit Abheben des Bugrades leicht nachgegeben werden. Mithilfe des überwachenden Piloten konnte dieser Vorgang präzise trainiert werden und zeigte schnell Trainingserfolge, so dass von einem sicheren Start im Flugversuch auszugehen ist.

Das Crew Ressource Management ließ sich ebenfalls bereits während der ersten Trainingseinheiten deutlich verbessern. Es zeigte sich sehr schnell, dass der Sicherheitspilot in den meisten Flugphasen nur sehr wenige Informationen zu den Flugzustandsgrößen benötigt und sich so viel besser auf die wesentlichen Aufgaben konzentrieren kann. Dies stabilisiert den Flug, zudem reagiert der Sicherheitspilot schneller auf Ansagen des überwachenden Piloten. Abgesehen vom Vorrotationsprozess, in dem eine klare Ansage von Motor- und Rotordrehzahl wichtig ist, benötigt der Sicherheitspilot nur Ansagen, sobald größere Abweichungen vom ge-

wünschten Flugpfad oder Flugzustand auftreten. Dies betrifft in erster Linie die Fluggeschwindigkeit und Höhe. Ansonsten sind im nahen Sichtbereich während des Fluges von Seiten des überwachenden Piloten kaum Hilfestellungen notwendig.

Ist der Tragschrauber etwas weiter entfernt und schlechter sichtbar, spielt auch die Lage im Raum eine Rolle. Ab einer Distanz von ca. 700 m nimmt die Sichtbarkeit derart ab, dass kaum zu unterscheiden ist, ob sich der Tragschrauber auf den Betrachter zu bewegt oder sich von ihm entfernt. Auch im Kurvenflug ist bereits bei dieser Distanz nur noch schwer zu erkennen, in welche Richtung geflogen wird. Auch hier hat der Überwachungspilot eine unterstützende und überwachende Aufgabe. Mithilfe seiner Tabletanzeige soll er dem Sicherheitspiloten Hilfestellungen bei der Navigation geben bzw. auf mögliche kritische Situationen hinweisen (z.B. bei Annäherung an die zulässige Flugbereichsgrenze oder Fehleinschätzungen der Flugzeuglage im Raum).

Aufgrund des eingeschränkten Sichtbereiches des Simulators war das Training weiter entfernter Flüge nur bedingt möglich. Es wird aber erwartet, dass durch die Tabletanzeige mit der Flugposition des Tragschraubers im zulässigen Bereich das Situationsbewusstsein derart verbessert wird, dass ein sicherer Flugbetrieb immer gewährleistet ist.

Die größte Herausforderung beim Training stellte die Landeprozedur dar. Hier besteht Kippgefahr, wenn der Tragschrauber schief aufsetzt. Dabei zeigte sich, dass bereits der Endanflug entscheidend für eine sichere Landung ist. Für den Endanflug wird der Tragschrauber in Richtung der Bahnachse ausgerichtet. Sobald die Bahn im Gleitflug zu erreichen ist, wird das Gas langsam auf Leerlauf gestellt, die Anfluggeschwindigkeit beträgt ca. 90 km/h. Der Abfangbogen wird derart erflogen, dass das Hauptfahrwerk sanft aufsetzt. Beginnt das Bugrad nach dem Aufsetzen des Hauptfahrwerks zum Boden zu sinken, wird der Knüppel langsam nach hinten bewegt, so dass sich das Bugrad langsam auf den Boden setzt.

Wird bereits der Endanflug nicht sauber erflogen, muss der Sicherheitspilot noch bis zum Abfangen viele Korrekturen in der Knüppelstellung aber evtl. auch beim Gas vornehmen, was die Arbeitsbelastung enorm erhöht und einen sehr unruhigen Flug verursacht. Ein Aufsetzen unter diesen Bedingungen wird als sicherheitskritisch eingeschätzt und ein Durchstarten empfohlen. Als Konsequenz hieraus wurde festgelegt, dass bei unruhigen Endanflügen immer ein Durchstartmanöver vollzogen wird, das entweder der überwachende Pilot oder der Sicherheitspilot ansagt.

Bei der Landung zeigt sich wieder der große Nutzen des überwachenden Piloten, der den Sicherheitspilo-

ten aufgrund seines großen Erfahrungsschatzes präzise durch den Endanflug führt sowie genaue Ansagen, ähnlich wie bei einem Flugschüler, zum Abfangen und Aufsetzen macht. Gerade bei den Landungen kann eine beachtliche Lernkurve beobachtet werden (vgl. BILD 10). Zur Beurteilung der Trainingsgüte wurden die Landungen anhand einer Bewertungsskala subjektiv beurteilt und kategorisiert.

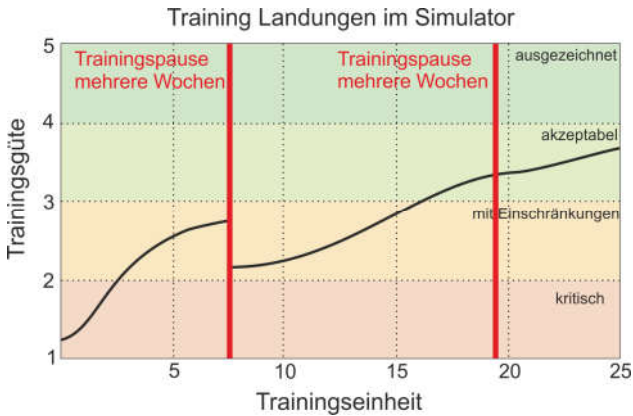


BILD 10. Training von Landungen im Simulator

Zu Beginn des Trainings konnte die Güte der Landungen nur mit Einschränkungen bewertet werden. Trainiert der Sicherheitspilot kontinuierlich über einen längeren Zeitraum im Simulator, ist er in der Lage den Tragschrauber zuverlässig punktgenau zu landen. Die Landungen liegen durchweg im akzeptablen Bereich. Nach längeren Trainingspausen wird deutlich, dass ein erneutes Training notwendig ist, um den vorherigen Trainingsstand zu erreichen. Allerdings zeigt sich mit steigender Anzahl der Trainingseinheiten ein immer besser gefestigtes Repertoire an Fähigkeiten. Innerhalb der 25 Trainingseinheiten wurden insgesamt 384 Landungen im Simulator durchgeführt. Bereits vergangene Studien zur Trainingseffizienz des Tragschraubersimulators haben gezeigt, dass gerade Landungen im Simulator eine besondere Herausforderung darstellen, da aufgrund der fehlenden räumlichen Sicht ein Abschätzen der Höhe im Endanflug erschwert wird. Ein akustisches Signale zur Höhenangabe ist nicht vorhanden.

3.2.2. Flugversuche

Der erste Flugversuch verlief ohne Zwischenfälle, dennoch schien das vertiefte Training einzelner Abläufe ratsam. Anfangs führten unpassende Steuereingaben zu kritischen Situationen, die allerdings vom Sicherheitspiloten entschärft werden konnten. Durch vertieftes Training im Simulator konnte die Sicherheit beim Start deutlich verbessert werden, so dass bei nachfolgenden Flugversuchen keine kritischen Flugzustände in dieser Flugphase mehr auftraten.

Start

BILD 11 zeigt die Messdaten eines Starts (Flugversuch 3, Start 4). Bei dem dargestellten Start ist der Prozess der Vorrotation bereits abgeschlossen, der Rotorkopf wird in die hinterste Position gesteuert (Nicksteuerwinkel ca. 17 Grad) und es wird Vollgas gegeben (Motordrehzahl ca. 5400 U/min). Der Tragschrauber beschleunigt, bis bei ca. 50 km/h das Bugrad abhebt. Der Stick wird leicht nachgelassen, der Tragschrauber weiter beschleunigt, bis auch das Hauptfahrwerk abhebt und der Tragschrauber zu steigen beginnt.

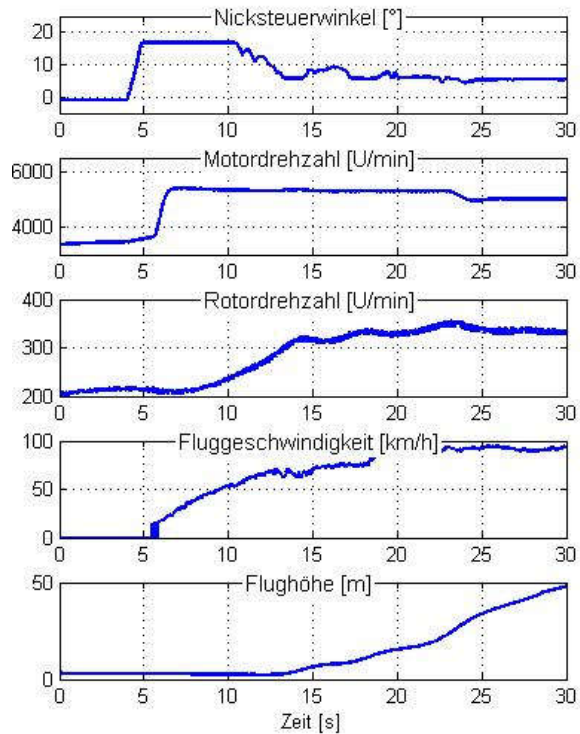


BILD 11. Messdaten eines Starts des Tragschraubers

Der eigentliche Flug mit dem Tragschrauber stellte keine große Herausforderung dar. Deswegen konnten abgesehen vom kontinuierlich verbesserten CRM keine großen Unterschiede zum ersten Flugversuch festgestellt werden. Allgemein war zu beobachten, dass aufgrund des nur sehr kleinen zulässigen Flugbereichs die Gebietseinteilung während des Fluges Schwierigkeiten bereitete sowie die Sichtbarkeit bei Entfernungen größer 700 m deutlich stärker abnahm, als erwartet. Hier zeigte sich der große Nutzen einer Positionsanzeige des Tragschraubers im zulässigen Flugbereich, wodurch das Situationsbewusstsein verbessert und eine sicherere Gebietseinteilung gewährleistet wird.

Anflug und Landung

Im Endanflug ist wiederum ein deutlich positiver Effekt des Simulatortrainings bemerkbar. Der Endanflug wird nach den Trainingseinheiten viel ruhiger

und präziser gesteuert, zudem funktioniert das Zusammenspiel von Sicherheitspilot und überwachenden Piloten optimal. Es zeigt sich sehr deutlich, wie wichtig in dieser Flugphase die Unterstützung durch den überwachenden Piloten ist, um den Tragschrauber punktgenau zu landen. Auch die Landungen können nun viel sicherer durchgeführt werden. BILD 12 zeigt die Messdaten einer Landung (Flugversuch 3, Landung 4).

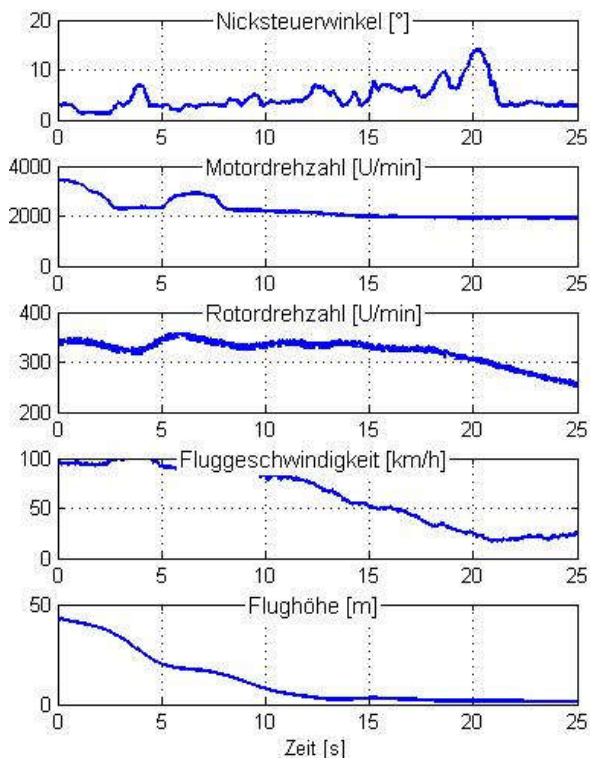


BILD 12. Messdaten für eine Landung des Tragschraubers

Die dargestellte Landung beginnt in einer Höhe von ca. 50 m. Bis zu einer Höhe von ca. 15 m sinkt der Tragschrauber mit einer konstanten Fluggeschwindigkeit von ca. 90 km/h. Nach ca. 12 s wird durch ein leichtes Ziehen am Steuerknüppel der Abfangbogen eingeleitet, die Geschwindigkeit wird abgebaut. Der Tragschrauber setzt mit ca. 50 km/h auf dem Hauptfahrwerk auf. Sobald das Bugrad Richtung Boden sinkt wird der Knüppel langsam nach hinten bewegt, bis das Bugrad aufsetzt.

Seitenwindlandung

Es zeigte sich, dass eine Seitenwindkomponente von mehr als 6 kt die Landung derart erschwert, dass sie als kritisch eingeschätzt wird. Das Problem ist auf die Blickrichtung des Sicherheitspiloten zurückzuführen. Die Flugversuche werden so durchgeführt, dass der Tragschrauber auf Höhe der Versuchspiloten wieder aufsetzen soll, um den Abfangbogen optimal abschätzen zu können. Dadurch ist der Sicherheitspilot gezwungen den Tragschrauber auszurichten, während er auf ihn zufliegt. Bei Sei-

tenwind muss ebenfalls die Abdrift über einen Schiebewinkel kompensiert werden. Diesen von der Position des Sicherheitspiloten korrekt einzustellen, ist sehr herausfordernd. Dies führt zu schieferm Aufsetzen und damit zu einer erhöhten Umkippgefahr. Auch spezielles Training im Simulator brachte nicht den erhofften Erfolg. Daher wird aktuell die Betriebsgrenze für die Seitenwindkomponente im manuellen Betrieb mit Sicherheitspiloten erheblich stärker limitiert, als es für das Basissystem erforderlich wäre.

Der manuell gesteuerte Flug ist nur ein Zwischenschritt. Mit dem Flugregler wird das Ziel verfolgt, auch bei stärkerem Seitenwind zu landen.

3.3. Regler Erprobung

Vor der Flugerprobung wird der Regler ausgiebig im Flugsimulator erprobt und damit seine Robustheit bewertet. Außerdem wird damit das Zusammenspiel zwischen Piloten und den automatisierten Flugphasen trainiert.

Zur Maximierung der Sicherheit werden vor dem Flug Hardware- und Funktionstests am Boden durchgeführt. Für die ersten Tests im Flug wird der Regler schrittweise in Betrieb genommen, indem die Regelung jeder Achse im Geradeausflug (ein sicherer Flugzustand mit ausreichender Höhe über Grund und Geschwindigkeit vorausgesetzt) einzeln erprobt wird. Durch diese Vorgehensweise sollen mögliche Fehlerfälle schneller detektiert und isoliert sowie kritische Zustände vermieden werden.

3.3.1. Test im Simulator

Im Simulator werden die gleichen Bedingungen wie im Flugversuch geschaffen, der Sicherheitspilot steuert den Tragschrauber über die Fernsteuerung, der Versuchsleiter bereitet die verschiedenen Tests vor.

Die Tests umfassen die Bewertung des Flugverhaltens, die Steuerbarkeit der einzelnen Achsen sowie das Zusammenspiel zwischen Piloten, Bodenstation und Versuchsleitung.



BILD 13. Teamtraining im Simulator

Im Simulator wurde eine Zeitverzögerung von 100 ms berücksichtigt und damit die Regelung vorläufig optimiert. Die finale Optimierung wird mit den Ergebnissen aus den Flugversuchen durchgeführt.

3.3.2. Hardware und Funktionstests

Hardwaretests am unbemannten Tragschrauber bilden den nächsten Schritt in der Integrationskette nach der Erprobung im Simulator. Der Regler wird hierfür in die Flugsteuerungssoftware eingebunden und getestet. Funktionstests mit der Hardware im Loop werden direkt am Fluggerät durchgeführt. Es werden alle Einschaltvorgänge am Boden nach Checkliste getestet, um zu untersuchen, ob die erwarteten Reaktionen auch am Fluggerät hervorgerufen werden. Dem System werden dabei dem Testfall entsprechende Flugzustandsgrößen vorgegeben. Beispielsweise wird per Software eine Flugeschwindigkeit von 90 km/h vorgegeben, um damit das Einschaltverhalten des Schubreglers zu bewerten. Durch das ausführliche Testen vorab und die schrittweise Integration sollen Fehlerfälle im Flugversuch ausgeschlossen werden. Im Flugversuch kann anschließend der Fokus auf die Regleroptimierung gelegt werden.

3.3.3. Flugversuch

Die bei den Vortests erprobte Vorgehensweise wird im Flugversuch fortgeführt. Beispielhaft wird hierfür in BILD 14 eine automatische Vorrotation gezeigt.

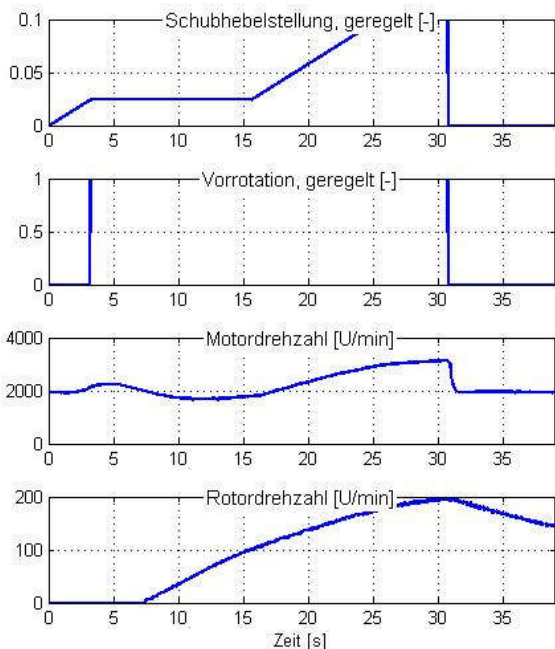


BILD 14. Messdaten einer automatische Vorrotation

Bei 0 s wird der Regler aktiviert. Der Rotorkopf wird in die vorderste Position bewegt, gleichzeitig wird die Motordrehzahl langsam gesteigert. Bei 2100 U/min wird die Vorrotation aktiviert, der Rotor kuppelt ein

und die Vorrotation beginnt. Dieser Vorgang hat zur Folge, dass die Motordrehzahl leicht abfällt. Ab einer Rotordrehzahl von ca. 100 U/min wird die Motordrehzahl langsam gesteigert, bis eine Rotordrehzahl von 200 U/min erreicht ist. Der Test wird anschließend beendet.

Das im Flugversuch erprobte Verhalten des Schubreglers ist BILD 15 zu entnehmen.

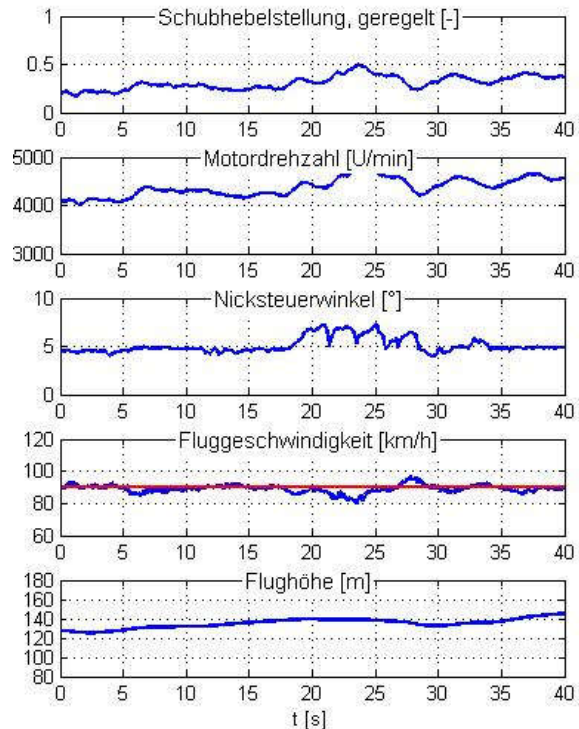


BILD 15. Erprobung des Geschwindigkeitsreglers

Der Schub wird jetzt vom Regler so gesteuert, dass eine Flugeschwindigkeit von 90 km/h eingehalten wird. Es wird gezeigt, dass die vorgegebene Sollgeschwindigkeit gut geregelt wird.

Im Bereich 18-28 s sind etwas größere Abweichungen festzustellen, die auf die Steuereingaben des Sicherheitspiloten in der Nickachse und damit Änderungen des Flugzustandes zurückzuführen sind. Hier kann eine Verbesserung durch eine Störgrößenaufschaltung oder durch eine Vorsteuerung erreicht werden. Im vollständigen Regler sind diese Anteile enthalten, sie werden zur Erprobung bewusst nicht aktiviert, um das reine Regelverhalten bewerten zu können.

Erprobt wurde auch der Roll- und Kursregler, die ebenfalls gute Ergebnisse aufwiesen. Die gewählte stufenweise Erprobung erwies sich somit für die bereits erprobten Manöver und Reglermodi als nützlich.

4. ZUSAMMENFASSUNG UND AUSBLICK

In diesem Beitrag wird die Vorgehensweise bei der Erprobung eines Flugreglers für einen unbemannten Tragschrauber vorgestellt. Dieses Konzept umfasst sowohl die Ausbildung eines Sicherheitspiloten, der bei Bedarf das Fluggerät vom Boden über eine Fernsteuerung steuert, als auch den Einsatz eines Simulators für die ersten Erprobungsschritte des Flugreglers unter simulierten Flugbedingungen sowie Hardwaretests direkt am Fluggerät.

Es konnte gezeigt werden, dass durch das Simulatortraining die Fertigkeiten des Sicherheitspiloten im Flugversuch deutlich verbessert wurden. Zudem konnte das Zusammenspiel von Sicherheitspilot und überwachenden Piloten im Simulator optimiert werden, was ebenfalls zu einem sichereren Flugbetrieb führt.

Durch die Erprobung im Flugversuch konnte gezeigt werden, dass die Simulation die Reglerauslegung deutlich vereinfacht. Das gewählte Konzept der stufenweisen Erprobung einzelner Achsen hat sich bewährt. Damit liegt eine vielversprechende Ausgangsbasis vor, mithilfe der Ergebnisse aus dem Flugversuch den Regler weiter zu optimieren.

5. LITERATUR

- [1] Holsten, J., Hartmann, P., Schütt, M., Moormann, D.: *Automatische unbemannte Flüge außerhalb der Sichtweite zwischen zwei Packstationen mit einem Tiltwingfluggerät*, Deutscher Luft und Raumfahrtkongress, Braunschweig, Deutschland, 2016.
- [2] Hsu, J.: *Cargo industry tests seaplane drones*, IEEE Spectrum, Vol. 55, Issue: 1, DOI: [10.1109/MSPEC.2018.8241696](https://doi.org/10.1109/MSPEC.2018.8241696), 2018.
- [3] McGonagle, J. G.: *The design, test, and development challenges of converting the K-MAX[®] helicopter to a heavy lift rotary wing UAV*, American Helicopter Society 57th Annual Forum, Washington, D.C., USA, 2001.
- [4] JARUS: *JARUS guidelines on Specific Operations Risk Assessment (SORA)*, Joint Authorities for Rulemaking of Unmanned Systems, JAR-DEL-WG6-D.04, 2017.
- [5] Kiggen, T.: *Flughandbuch für den Tragschrauber MT03*, Hildesheim, Germany, 2003
- [6] Duda, H., Seewald, J.: *Flugphysik der Tragschrauber – Verstehen und Berechnen*, ISBN 978-3-662-52833-4, Springer Vieweg, Deutschland, 2016.
- [7] Bittner, W.: *Flugmechanik der Hubschrauber*, ISBN 978-3-642-54286-2, Springer-Verlag Berlin Heidelberg New York, Deutschland, 2002.
- [8] Bramwell, A. R. S., Done, G., Balmford, D.: *Bramwell's Helicopter Dynamics*, ISBN 978-0080528304, 2. Auflage, Butterworth-Heinemann, Oxford, Großbritannien 2001.
- [9] Benders, S., Goormann, L., Lorenz, S., Dauer, S. C.: *Softwarearchitektur für einen unbemannten Luftfrachttransportdemonstrator*, Deutscher Luft und Raumfahrtkongress, Friedrichshafen, Deutschland, 2018.
- [10] Bierig, A., Lorenz, S., Rahm, M., Gallun, P.: *Design Considerations and Test of the Flight Control Actuators for a Demonstrator for an Unmanned Freight Transportation Aircraft*, Recent Advances in Aerospace Actuation Systems and Components, Toulouse, Frankreich, 2018
- [11] NGA: *World Geodetic System 1984*, NGA Standardization Document, NGA.STND.0036_1.0.0_WGS84, Department of Defense, 2014
- [12] Johnson, E. N., Fontaine, S.: *Use of Flight Simulation to Complement Flight Testing of Low-Cost UAVs*, AIAA 2001-4059, Atlanta, GA, USA, 2001.
- [13] Cai, G., Chen, B., Lee, T. Dong, M.: *Design and implementation of a hardware-in-the-loop simulation system for small-scale UAV helicopters*, IEEE International Conference on Automation and Logistics, Qingdao, China, 2008.
- [14] Lorenz, S.: *ALAADy-Demonstrator – Automated Low Altitude Air Delivery*, Projektplan, DLR Braunschweig, Deutschland, 2016.
- [15] Farr, T. G., et al.: *The Shuttle Radar Topography Mission*, Rev. Geophys., 45, RG2004, DOI: [10.1029/2005RG000183](https://doi.org/10.1029/2005RG000183), 2007.
- [16] Pruter, I., Duda, H.: *Modellierung und Simulation der Flugdynamik eines Tragschraubers*, Deutscher Luft- und Raumfahrtkongress, Aachen, Deutschland, 2009.
- [17] Pruter, I.: *Untersuchung der Trainingseffizienz von Simulatoren für Tragschrauber*, Dissertation, TU Braunschweig, ISSN: 1434-8454, ISRN: DLR-FB--2019-16, Braunschweig, Deutschland, 2016.
- [18] Pruter, I., Duda, H.: *Flugversuche zur Systemidentifizierung eines MTOsports im Projekt GyroTrain*, Institutsbericht IB 111-2010/57, DLR Institut für Flugsystemtechnik, Braunschweig, Deutschland, 2010.
- [19] Dauer, J. C., Lorenz, S., Dittrich, J. S.: *Automated Low Altitude Air Delivery*, Deutscher Luft- und Raumfahrtkongress, Braunschweig, Deutschland, 2016.