## Kursleiter

Prof. Dr. Robert Luckner, Technische Universität Berlin
Prof. Dr. Alexander Köthe, AlphaLink Engineering GmbH

## Kursdauer:

3 Tage (26.02. – 28.02.2024)

## Abschluss

Jeder Teilnehmer erhält ein Zertifikat zum Kurs sowie ein umfangreiches Begleitmaterial zu den Grundlagen der Regelungstechnik, dass das Erlernte an vielen Beispielen demonstriert und Ansätze für ein weiterführendes Selbststudium bietet.

## Veranstaltungsort

Charlottenburger Innovations-Centrum (CHIC)
Bismarckstraße 10-12
10625 Berlin

## Teilnahmegebühr

1.450,– EUR
1.350,– EUR für DGLR-Mitglieder

## Anmeldung unter: www.weiterbildung.dglr.de

## Anmeldung/Kontakt:


**Deutsche Gesellschaft für Luft- und Raumfahrt Lilienthal-Oberth e.V. (DGLR)**

DGLR-Weiterbildung

Godesberger Allee 70
D-53175 Bonn

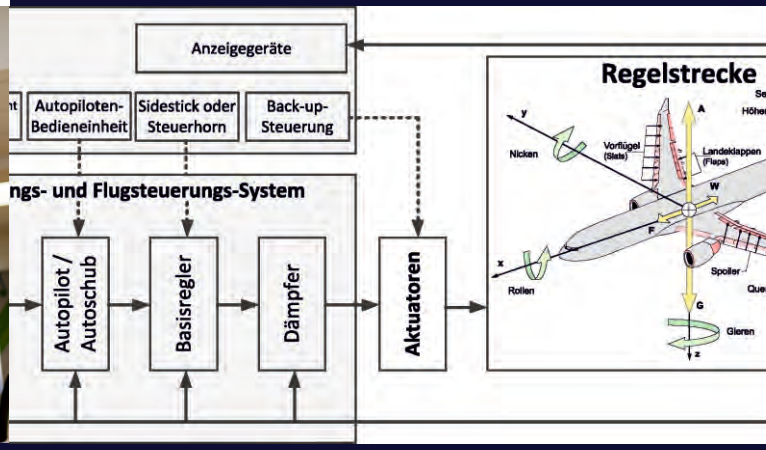
Telefon: (0228) 30 80 5-0
Telefax: (0228) 30 80 5-24
E-Mail: weiterbildung@dglr.de
Web: weiterbildung.dglr.de

**Deutsche Gesellschaft für Luft- und Raumfahrt**
Lilienthal-Oberth e.V.

# Flugregelung für unbemannte und bemannte Luftfahrzeuge

**26.02. - 28.02.2024, Berlin**

Leitung:
**Prof. Dr. Robert Luckner**, Technische Universität Berlin
**Dr. Alexander Köthe**, AlphaLink Engineering GmbH




Anmeldung unter www.weiterbildung.dglr.de

DGLR WEITERBILDUNG

# FLUGREGELUNGEN FÜR BEMANNTE UND UNBEMANNTE FLUGZEUGE

DGLR WEITERBILDUNG

## Kursbeschreibung

Flugregelung ist eine Disziplin, die Methoden der Regelungstechnik auf Luftfahrzeuge anwendet mit dem Ziel, den Piloten bei der Führung seines Flugzeugs und beim Erfüllen der Flugmission zu entlasten oder – im Fall von unbemannten Flugzeugen – ihn völlig zu ersetzen. Dazu werden Flugregelungsfunktionen in Flugregelungssysteme eingebettet.

**Im Einzelnen umfasst die Flugregelung:**

- die Beschreibung und Analyse der Regelungsstrecke (Flugmechanik),
- die Definition der Anforderungen an das Flugregelungssystem),
- die Entwicklung des Flugregelungssystems bestehend aus Sensoren, Rechnern, Stellgliedern sowie der Mensch-Maschine-Schnittstelle (Anzeigen und Bedienung),
- Untersuchung des Ausfallverhaltens bei Fehlern und das Bestimmen der erforderlichen minimalen Ausfallwahrscheinlichkeit der sicherheitskritischen Funktionen,
- Entwurf von Flugregelungsfunktionen und Betriebsartenlogik,
- das Umsetzen der Funktionen in echtzeitfähige Algorithmen und Software,
- das Implementieren der Flugregelungs-Software auf digitalen Flugsteuerungsrechnern
- das Testen und Validieren der entworfenen Funktionen und des Regelungssystems,
- ein strukturierter, systematischer Entwicklungsprozess.

Ziel des dreitägigen Kurses ist es, den Teilnehmenden einen Überblick über die oben genannten Punkte zu geben. Aus der Vielzahl der möglichen Anwendungen (zivile Verkehrsflugzeuge, mil. Hochleistungsflugzeuge, Hubschrauber, Flugzeuge der allg. Luftfahrt, Arbeitsflugzeuge sowie unbemannte Luftfahrzeuge der Kategorien open, specific und certified) wird hier der Reglerentwurf und seine praktische Umsetzung am Beispiel des kleinen unbemannten Flugzeugs „Nano Talon“ demonstriert. Zusätzlich werden die sicherheitskritischen Aspekte und die dazugehörenden Prozesse am Beispiel von Verkehrsflugzeugen erläutert. Diese Prozesse werden in ähnlicher Weise für certified UAV gelten, die Definition der Zulassungsvorschriften ist allerdings noch nicht abgeschlossen.

**Folgende Hilfsmittel werden im Kurs verwendet:**

- Laptop, zusätzlich wird ein zwei-achsiger Joystick für die Flugsimulation in der virtuellen Flugtestumgebung empfohlen (muss jeder Teilnehmer mitbringen),
- für den Reglerentwurf: open source Software Scilab/Xcos (nach Absprache ist auch Matlab/Simulink möglich),
- für die Flugsimulation: die browserbasierte, virtuelle Flugtestumgebung alphalink-vfte.com (wird bereitgestellt),
- zum Implementieren des Reglers auf embedded Flugsteuerungsrechner: Open-Source-Autopilot Pixhawk PX4 (wird bereitgestellt).

**Am ersten Tag** wird die Regelstrecke beschrieben und analysiert – d.h. das Flugzeug und seine dynamische Bewegung in der Atmosphäre. Die nichtlinearen und linearisierten Differentialgleichungen der Flugmechanik und das daraus resultierende flugmechanische (Simulations)-Modell bilden die Grundlage des Reglerentwurfs. Für das Modell werden Daten des kleinen unbemannten Flugzeugs „Nano Talon“ verwendet. Die Teilnehmenden können ihre erworbenen Kenntnisse direkt in der virtuellen Flugtestumgebung (alphalink-vfte.com) praktisch anwenden. Anschließend werden die einzelnen Komponenten eines Flugregelungssystem erläutert. Mit der virtuellen Testumgebung werden Flüge simuliert. Die aufgezeichneten Daten werden analysiert und es wird mit den Teilnehmenden gemeinsam erarbeitet, wie und durch welche Funktionen Flugregler den Betrieb von Flächenflugzeugen vereinfachen können.

**Am zweiten Tag** werden – aufbauend auf den Kenntnissen des ersten Tages - Flugregelungsfunktionen ausgelegt. Flugregler sind kaskadenförmig aufgebaut. Begonnen wird mit den innen liegenden Kaskaden zur Lagehaltung für Längs- und Seitenbewegung, es folgen die Kaskaden zur Bahn- und Fahrthaltung sowie am dritten Tag die Kaskade zur Wegpunktregelung. Die Teilnehmenden testen ihre ausgelegten Funktionen anschließend in virtuellen Flugversuchen und evaluieren basierend auf ihren Analysen der Flugsimulationsdaten, wie gut die ausgelegten Regler ihre Funktion erfüllen.

Am dritten Tag wird, aufbauend auf den Reglerkaskaden vom Vortag, ein Regler entworfen, mit dem Wegpunkte abgeflogen und das Flugzeug an einem definierten Punkt gelandet werden kann. Auch dieser Regler wird wieder in der virtuellen Flugtestumgebung getestet. Nach der Auslegung der Reglerfunktionen werden Entwicklungsaspekte und -methoden angesprochen, die für die Entwicklung von sicherheitskritischen Systemen notwendig sind. Hierzu Beispielen von Flugregelungssystemen (Airbus, Boeing, AUS) hinsichtlich Architektur, Systemkomponenten, Funktionen, Redundanz und Dissimilarität vorgestellt. Anschließend werden Regler zur manuellen Flugbahnführung von Verkehrsflugzeugen vorgestellt und die Zulassungsanforderungen und Entwicklungsprozesse für sicherheitskritische Flugregelungssysteme besprochen. Interessierte Teilnehmer haben die Möglichkeit am Abend am Teufelsberg eigene Regler mit einem erfahrenen Piloten zu testen.

## Zielgruppe

Der Kurs richtet sich an Ingenieur*innen und Wissenschaftler*innen, die unbemannte Flächenflugzeuge einsetzen wollen oder mit der Entwicklung von Flugregelungssystemen befasst sind. Grundkenntnisse im Bereich der Flugmechanik und der Regelungstechnik sind notwendig. Solide Kenntnisse zur Beschreibung und Behandlung dynamischer Systeme (lineare Differentialgleichungssysteme, Übertragungsfunktionen) sollten vorhanden sein. Kenntnisse der Flugregelung oder vertiefte Kenntnisse in der Regelungstechnik werden nicht vorausgesetzt.

# FLUGREGELUNGEN FÜR BEMANNTE UND UNBEMANNTE FLUGZEUGE

## Inhalte

**Streckenbeschreibung unbemannter Flugzeuge**
Um die Bewegung eines Luftfahrzeugs regeln zu können, muss zuerst seine dynamische Flugbewegung modelliert werden. Hierzu werden Methoden vorgestellt, mit denen ein aerodynamisches Modell, sowie Massen- und Schubmodell aufgebaut werden können und in die Bewegungsdifferentialgleichungen integriert werden. Dadurch entsteht eine nichtlineare Flugsimulation, die anschließend linearisiert wird, um damit die dynamischen Eigenschaften des Flugzeuges für verschiedene Flugzustände zu ermitteln und zu bewerten.

**Flugreglerfunktionen zur manuellen Flugbahnführung (UAV)**
Unbemannte Flugzeuge werden vom Piloten*innen über eine Fernbedienung gesteuert. Dabei ist der Funkempfänger im Flugzeug meist direkt mit den Servomotoren gekoppelt. Durch das Zwischenschalten von Flugreglerfunktionen können die Flugeigenschaften verbessert und somit die manuelle Steuerung erleichtert werden. Dadurch lassen sich auch schwierig zu steuernde Flugzeuge im manuellen Flug sicher beherrschen.

**Regler zur automatischen Flugbahnführung**
Neben der manuellen Steuerung eines unbemannten Flugzeugs vom Boden aus, soll es in der Regel eine Trajektorie automatisch abfliegen. Hierzu werden Vorgabewerte und Wegpunkte über eine Bodenstation vorgegeben. Es werden zuerst Konzepte vorgestellt, bei denen der Flugregler das Flugzeug um alle drei Achsen stabilisiert und eine Lageregelung ermöglicht. Zudem wird ein Konzept zur Regelung der Geschwindigkeit eingeführt. Auf diesen "Basisautopiloten" können weitere Flugregler aufgesetzt werden, die das Abfliegen von vorgegebenen Wegpunkten ermöglichen (Navigationsregler).

**Sensorik und Aktuatorik**
Regler funktionieren nach dem Prinzip, dass Sollwerte mit Messwerten abgeglichen werden. Je nach Luftfahrzeug kommen unterschiedliche Sensoren für verschiedene Messgrößen (inertial, strömungsmechanisch, magnetisch, funktechnisch) zum Einsatz. Deren Prinzipe und Modellierung im Simulationsmodell wird im Kurs kurz besprochen. Weiterhin wird gezeigt, wie mit Filtern die Signalqualität verbessert werden kann. Die vom Regler berechneten Größen sind Kommandos an das Triebwerk und die Aktuatoren, die die aerodynamischen Stellflächen entsprechen bewegen. Für unbemannte Luftfahrzeuge kommen meist Servomotoren zum Einsatz, während für größere Luftfahrzeuge elektromechanische oder hydraulische Aktuatoren verwendet werden. Die Grenzen, Funktionsweise und Modellierung dieser Aktuatoren wird ebenfalls kurz besprochen.

**Implementierung von Flugreglern**
Nach dem Entwurf der Reglerfunktionen müssen diese als Software realisiert und in Hardware eingebettet werden, damit sie mit dem Flugzeug interagieren. Hierzu steht als Flugsteuerungsrechner ein Pixhawk PX4 zur Verfügung. Zuerst wird aus dem entwickelten Reglermodell Code generiert. Anschließend wird gezeigt, wie dieser Code mit den entwickelten Flugregelungsfunktionen in die Open-Source-Autopilotensoftware des PX4 integriert wird.

**Beispiele von Flugregelungssystemen**
Ausgeführte Flugsteuerungssysteme werden am Beispiel Airbus erklärt. Wichtige Unterschiede zu Boeing und UAVs werden erläutert. Im Einzelnen wird eingegangen auf die Architektur, Systemkomponenten (Bediengeräte, Displays, Rechner, Sensoren, Aktuatoren) Funktionen, Redundanz, Dissimilarität, und Standards.

**Regler für den manuellen Flug (Verkehrsflugzeuge)**
Aus den Anforderungen werden die Betriebsarten für den Normalbetrieb mit Vorgabesteuerung einschließlich der Protections sowie für den Betrieb nach Systemfehlern mit einer direkten Steuerung zwischen Cockpit-Bedienelementen und Stellflächen am Beispiel der Airbus Fly-by-Wire-Steuerung erläutert.

**Zulassungsanforderungen und Entwicklungsprozess**
Flugregelungsfunktionen sind sicherheitskritisch. Ein Fehler kann katastrophale Konsequenzen haben. Es muss deshalb garantiert sein, dass die Auftrittswahrscheinlichkeit eines Fehlers mit katastrophalen Folgen unter 10-9 1/Flugstunde liegt. Das wird durch einen stringenten Entwicklungsprozess, Sicherheitsanalysen, Redundanzen und andere Maßnahmen erreicht. Für Verkehrsflugzeuge gibt es Zulassungsvorschriften (EASA CS-25), die in angepasster Form für die UAV open category in Zukunft vorliegen werden. Diese Regularien werden durch die Guidelines SAE-ARP 4754A zum Systementwurf und RTCA DO-178C für die Entwicklung von Software (u. a. auch für Flugregelungsfunktionen) flankiert. Die Standards und Anwendung der Empfehlungen werden vereinfacht dargestellt, um den Teilnehmenden einen schnellen Einstieg in das Selbststudium zu ermöglichen.