

## 1.1 Einführung Raumfahrttechnologie

### Modulname: Fundamentals of Spacecraft Technology (Einführung Raumfahrttechnologie)

#### Modulübersicht

EDV-Bezeichnung: LURZ 110

Modulverantwortliche(r): Prof. Dr.-Ing. Reza Ahmadi (HKA); Prof. Dr.-Ing. Stefanos Fasoulas (Universität Stuttgart); Dr.-Ing. Constantin Traub (Universität Stuttgart)

Modulumfang (ECTS): 7 CP

Arbeitsaufwand: 170 h

- Stoffvermittlung: 85 h
- Selbstlernzeit und Projektarbeit: 85 h
- Optionale Online-Sprechstunde

Einordnung (Semester): Winter- und Sommersemester

Inhaltliche Voraussetzungen: Mathematik aus dem Grundstudium

Voraussetzungen nach SPO: keine

Kompetenzen der Teilnehmenden nach erfolgreichem Abschluss des Moduls:

- Umfassender Überblick über alle zentralen Elemente einer Raumfahrtmission und Kenntnis der Zusammenhänge.
- Verständnis der Weltraumumgebung und ihrer Auswirkung auf das Raumfahrzeug sowie auf die Mission.
- Umfassender Überblick über alle relevanten Subsysteme eines Raumfahrzeugs.
- Verständnis der physikalischen Gesetzmäßigkeiten der Orbitalmechanik und deren praktischen Auswirkung, der relevantesten Störeinflüsse sowie Kenntnis verschiedener Möglichkeiten der Bahnänderung inklusive deren Vor- und Nachteile.
- Grundlegendes Verständnis der Lagedynamik von Raumfahrzeugen sowie ein Überblick über Möglichkeiten der aktiven und passiven Lageregelung.
- Verständnis der Hintergründe zentraler Raumfahrtmanöver (Raketenstart, Rendezvous mit einer Raumstation, Wiedereintritt) und Einordnung dieser.
- Überblick über die sich von erdgebundenen Missionen unterscheidenden Anforderungen an Explorationsmissionen sowie über Raumfahrtvisionen und Einordnung dieser.

Prüfungsleistungen:

Die Kenntnisse werden in einer schriftlichen Klausur (60 min, bestehend aus Kurzfragen, Single-Choice Aufgaben und optional kurzen Handrechnungen) oder in einer mündlichen Prüfung (30 min) bewertet. Die Prüfungsart wird basierend auf der Teilnehmerzahl festgelegt und rechtzeitig bekannt gegeben.

Verwendbarkeit:

Allgemein:

Das Ziel des Moduls ist die Vermittlung eines umfassenden Überblicks aller zentralen Elemente einer Raumfahrtmission sowie deren physikalischen Hintergründe und Zusammenhänge. Nach der Teilnahme am Modul sollen die Teilnehmenden in der Lage sein, Missionskonzepte einzuschätzen und ihre technische Umsetzbarkeit bewerten zu können. Die vermittelten Kenntnisse befähigen sie, technologische Entscheidungen in Raumfahrtprojekten kritisch zu reflektieren und wesentliche Impulse für eigene Entwicklungsprozesse im Berufsleben zu setzen.

Zusammenhänge / Abgrenzung zu anderen Modulen:

Das Modul bildet die Grundlage für weiterführende Veranstaltungen im Bereich Raumfahrttechnik.

### Lehrveranstaltung: Fundamentals of Space Engineering

EDV-Bezeichnung: LURZ 111

Dozent/in:

Prof. Dr.-Ing. Stefanos Fasoulas (Universität Stuttgart),

Dr.-Ing. Constantin Traub (Universität Stuttgart)

Umfang (SWS): 4

Turnus: halbjährlich (auf Anfrage)

Art und Modus: interaktives Seminar

Lehrsprache: deutsch (opt. englisch)

Inhalte:

- **Fundamentals of Space Mission Design, Operations and Mission Control**
  - Definition of a Space Mission & Key Actors
  - Space Mission Types & Objectives
  - Space Mission Destinations
  - Key Elements of a Space Mission
  - Space Mission Requirements & System Drivers
  - Overview Spacecraft Subsystems
  - Overview Space Mission Development Phases
  - Overview Space Mission Operations
- **Basics of Launcher and Space Vehicle Propulsion**
  - Basic Performance Requirements of Space Propulsion
  - The Rocket Equation and Important Rocket Parameters
  - Chemical Propellant Rockets
  - The Staging Principle
  - Electrical Thrusters
  - Alternative Propulsion Concepts
- **General Definitions and Unperturbed Orbital Motion**
  - Coordinate Frames and General Definitions
  - The Two-Body Problem
  - Orbit Geometry
  - Space Velocities

Empfohlene Literatur: -

Anmerkungen: -

## **Lehrveranstaltung: Space Environment and its Impacts**

EDV-Bezeichnung: LURZ 112

Dozent/in:

Prof. Dr.-Ing. Stefanos Fasoulas (Universität Stuttgart),  
Dr.-Ing. Constantin Traub (Universität Stuttgart)

Umfang: 3,8 h

Art und Modus: interaktives Seminar

Lehrsprache: Deutsch (opt. Englisch)

Inhalte:

- **The Space Environment**
  - Major Factors of Influence on the Space Environment
  - Gravitational Fields
  - Atmospheres and Ionospheres
  - Magnetic Fields
  - Electromagnetic and Particle Radiation
  - Solid Matter
- **Impacts of Space Environment on Spacecraft and Mission Design**
  - Overview of Design Issues in Pre-operational Phase
  - Impacts of the Space Environment
    - Overview
    - Gravitational Fields / Microgravity
    - Vacuum, Atmospheres and Ionospheres
    - Radiation / Magnetic Fields
    - Solid Matter
  - Overview of Design Issues for Post-Operational Phase
  - Summary

Empfohlene Literatur: -

Anmerkungen: -

## Lehrveranstaltung: Subsystems

EDV-Bezeichnung: LURZ 113

Dozent/in:

Prof. Dr.-Ing. Stefanos Fasoulas (Universität Stuttgart),  
Dr.-Ing. Constantin Traub (Universität Stuttgart)

Umfang: 7,6 h

Art und Modus: interaktives Seminar

Lehrsprache: Deutsch (opt. Englisch)

Inhalte:

- **Concepts of Spacecraft Structures and Materials**
  - Spacecraft Structures
    - Tasks and Categories
    - Structural Loads During Mission Phases
    - Key Characteristics and Design Process
  - Spacecraft Materials
    - Selection Criteria
    - Material Erosion Examples
- **Concepts of Spacecraft Thermal Control**
  - Thermal Environment & Objectives of Thermal Control
    - External Heat Loads
    - Internal Heat Loads
    - Objectives of Thermal Control
  - Thermal Analysis and Tests
    - Heat Transfer Mechanism
    - Heat Balance Equation for Spacecraft
    - Thermal Analysis and Tests
  - Thermal Control Hardware
    - Passive Thermal Control
    - Active Thermal Control
- **Fundamental Concepts of Communication in Space**
  - Important Definitions and Boundary Conditions
  - Electromagnetic Waves & Basics for Space Communication
  - Modulation, Coding, Protocols
  - Important System Components
  - Link Budget
  - Important Aspects Human Spaceflight
  - Examples
- **Concepts of Spacecraft Power Systems**
  - Power system – functions and configuration
  - Primary energy sources and energy conversion
    - Overview
    - Solar power
    - Radioisotope Thermoelectric Generator (RTG)
    - Nuclear reactors in space
  - Energy storage systems
    - Overview
    - Secondary batteries
    - Regenerative fuel cells
  - Power systems selection criteria

Empfohlene Literatur: -

Anmerkungen: -

## **Lehrveranstaltung: Translational Motion (Orbit Control)**

EDV-Bezeichnung: LURZ 114

Dozent/in:

Prof. Dr.-Ing. Stefanos Fasoulas (Universität Stuttgart),

Dr.-Ing. Constantin Traub (Universität Stuttgart)

Umfang: 4,8 h

Art und Modus: interaktives Seminar

Lehrsprache: Deutsch (opt. Englisch)

Inhalte:

- **Perturbed Orbital Motion**
  - Variations in the Orbital Elements due to General Perturbing Forces
  - Perturbing Forces Acting on a Satellite
  - Effects of Atmospheric Drag on the Satellite Orbit
  - Nodal Precession
- **Orbital Manoeuvres and Interorbital Transfers**
  - One-Impulse Manoeuvres
  - Two- and Three-Impulse Manoeuvres
  - Continuous Thrust Manoeuvres
  - Effects of Impulsive Manoeuvres on the ISS Orbit
- **Orbit Determination**
  - Navigation
  - Orbit Determination
  - The "Two-Line Element" Format

Empfohlene Literatur: -

Anmerkungen: -

## **Lehrveranstaltung: Rotational Motion (Attitude Control)**

EDV-Bezeichnung: LURZ 115

Dozent/in:

Prof. Dr.-Ing. Stefanos Fasoulas (Universität Stuttgart),

Dr.-Ing. Constantin Traub (Universität Stuttgart)

Umfang: 2,5 h

Art und Modus: interaktives Seminar

Lehrsprache: Deutsch (opt. Englisch)

Inhalte:

- **Fundamentals of Attitude Determination and Control**
  - One-Impulse Manoeuvres
  - Two- and Three-Impulse Manoeuvres
  - Continuous Thrust Manoeuvres
  - Effects of Impulsive Manoeuvres on the ISS Orbit

Empfohlene Literatur: -

Anmerkungen: -

## **Lehrveranstaltung: Applied Orbital Mechanics for Vehicle Operations**

EDV-Bezeichnung: LURZ 116

Dozent/in:

Prof. Dr.-Ing. Stefanos Fasoulas (Universität Stuttgart),  
Dr.-Ing. Constantin Traub (Universität Stuttgart)

Umfang: 8 h

Art und Modus: interaktives Seminar

Lehrsprache: Deutsch (opt. Englisch)

Inhalte:

- **Access to Space**
  - Launch Sites and Launch Directions
  - Launch Window and Launch Time
  - Launch Profile
  - Launch Abort Modes
- **Fundamentals of Rendezvous, Departure and Relative Motion**
  - Launch and Orbit Insertion
  - Phasing
  - Far Range Rendezvous
  - Close Range Rendezvous
  - Final Approach and Docking
  - Departure
- **Deorbit, Reentry and Landing**
  - Overview & General Aspects
  - Undocking & Deorbit
  - Re-entry
    - Types & Energies of Atmospheric Entry Maneuvers
    - Important Parameters & Definitions
    - Ballistic, Lift-assisted & Skip-assisted Re-entry
    - Re-entry Trajectory & Corridor
    - Remarks Stability & Thermal Protection System
  - Landing
  - Disposal Aspects

Empfohlene Literatur: -

Anmerkungen: -

## **Lehrveranstaltung: Exploration**

EDV-Bezeichnung: LURZ 117

Dozent/in:

Prof. Dr.-Ing. Stefanos Fasoulas (Universität Stuttgart),  
Dr.-Ing. Constantin Traub (Universität Stuttgart)

Umfang: 3 h

Art und Modus: interaktives Seminar

Lehrsprache: Deutsch (opt. Englisch)

Inhalte:

- **Introduction to Exploration Flight Dynamics and Navigation**
  - Possible destinations and their features
  - Basic concepts
  - Mission to the Moon
  - Interplanetary missions
  - Communication and navigation methods
- **Interstellar Spaceflight Visions**

<ul style="list-style-type: none"><li>○ Dimensions, Energies, Relativity</li><li>○ Why? Where Do We Stand?</li><li>○ Concepts</li></ul>
Empfohlene Literatur:
Anmerkungen:

## 1.2 Aerospace Systems Engineering

### Modulname: Aerospace Systems Engineering

Modulübersicht
EDV-Bezeichnung: LURZ 120
Modulverantwortliche(r): Prof. Dr.-Ing. Reza Ahmadi (HKA)
Modulumfang (ECTS): 7 CP
Arbeitsaufwand: 170 h
<ul style="list-style-type: none"><li>• Stoffvermittlung: 85 h</li><li>• Selbstlernzeit und Projektarbeit: 85 h</li><li>• Optionale Online-Sprechstunde</li></ul>
Einordnung (Semester): Winter- und Sommersemester
Inhaltliche Voraussetzungen: Keine
Voraussetzungen nach SPO: Keine
<b>Kompetenzen:</b> <ul style="list-style-type: none"><li>• Die Teilnehmenden bekommen einen Überblick über Flugzeugsysteme, deren Technik und die Grundlagen der Sicherheit in der Luftfahrt.</li><li>• Sie kennen die wichtigsten luftfahrtsspezifischen Normen (z. B. CS-25, ARP-4754, ARP-4761, DO-254, DO-178 und DO-326) sowie deren Zusammenhänge und Anforderungen an Luftfahrtssysteme und Entwicklungs- und Zertifizierungsprozesse.</li><li>• Die Teilnehmenden verstehen den strukturierten Entwicklungsprozess im V-Modell, inklusive der Erstellung und Dokumentation von Anforderungen, Entwurf und Entwicklung. Sie wissen, wie diese Phasen in sicherheitskritischen Projekten verknüpft und rückverfolgbar gemacht werden.</li><li>• Die Teilnehmenden kennen die verschiedenen Methoden zur Berechnung und zum Nachweis der Sicherheit von Flugzeugsystemen.</li><li>• Sie kennen die verschiedenen Design-Muster zur Erreichung der Sicherheitsziele und deren Entwicklungskosten und betrieblichen Folgen.</li></ul>
<b>Prüfungsleistungen:</b> <ul style="list-style-type: none"><li>• Projektarbeit: Selbstständiger Entwurf eines Primary/Secondary Flight Control Systems für ein zukünftiges Flugzeug</li></ul>
<b>Verwendbarkeit:</b> <ul style="list-style-type: none"><li>• Entwurfskompetenz bezüglich Flugzeugsystemen und -Architekturen</li><li>• Entscheidungskompetenz bezüglich Safety-Engineerings und -Managements in der Luftfahrt</li><li>• Das Modul ermöglicht einen leichteren Einstieg in den Modulen 3 und 4</li></ul>

Lehrveranstaltung: Aerospace Systems Engineering
EDV-Bezeichnung: LURZ 121
Dozent/in: Prof. Dr.-Ing. Reza Ahmadi
Umfang (SWS): 4
Turnus: halbjährlich (auf Anfrage)
Art und Modus: interaktives Seminar
Lehrsprache: deutsch (opt. englisch)
Inhalte:

### **Tag 1: Luftfahrt-Anforderungen**

- Business-Anforderungen  
Luftfahrtgeschäft: Airlines, OEMs, Zulieferer, MRO, Neue Märkte und Player  
Stärken und Schwächen der Industrie in Deutschland und Baden-Württemberg
- Umweltschutz-Anforderungen  
Umweltbilanz des Luftverkehrs  
Risiken und Chancen (EU und Global)
- Regulatorische Anforderungen  
Gesetze und Behörden in der EU und USA  
Bauvorschriften und Normen  
Empfehlungen und Standards
- Sicherheitsanforderungen  
Akzeptable Ausfallwahrscheinlichkeit, warum so extrem?  
Gefahrenquellen (Technisches Versagen, Human-Factors, Umgebungseffekte, Security)
- Grundlagen der Sicherheitsanalyse

### **Tag 2: Aerospace Management**

- Aircraft System Development Process (orientiert an SAE ARP-4754)
- Aerospace Management and Leadership (praktische Aspekte)
- Sicherheit vs. Compliance
- Safety vs. Security
- V-Modell vs. Agility
- Human Factors

### **Tag 3: Aircraft Safety Assessment**

- Aircraft Safety Assessment (orientiert an SAE ARP-4761)

### **Tag 4: Flugsystemtechnik**

- Übersicht Flugzeugaufbau
- Aerodynamik
- Flugmechanik und -Regelung
- Flugsteuerung
- Weitere Systeme

### **Tag 5: Flight Control System**

- Hydraulic Power System
  - Airbus A320
  - Airbus A380
- Navigation System
  - Cockpit Systeme
  - Air Data and Inertial Sensors
  - Air Data and Inertial Reference Systeme (ADC/CADC/ADIRU)
  - Radio Navigation (Radar, ILS, GNSS)

### **Tag 6: Avionik-Netzwerke**

- Kommunikationsmedien
  - Kabel / Glasfaser / Wireless
- Kommunikationsmuster
  - CSMA / P2P
- Protokolle
  - ARINC 429-629 / AFDX / PCIeX / MIL-STD 1773

**Tag 7: Redundanz-Management**

- Dual Simplex Redundanz
- Duplex Redundanz
- Triplex
- Quadruplex
- Multi-Duplex / Multi-Triplex

**Empfohlene Literatur:**

- EASA CS-25
- SAE ARP4754
- SAE ARP4761
- RTCA DO-326

Anmerkungen: Keine

### 1.3 Aerospace Sensorik - Radar

**Modulname: Aerospace Sensorik - Radar****Modulübersicht**

EDV-Bezeichnung: LURZ 130

Modulverantwortliche(r): Prof. Dr.-Ing. Reza Ahmadi, Prof. Dr.-Ing. Serdal Ayhan (HKA); Prof. Dr.-Ing. Waldschmidt, Dr.-Ing. Martin Hitzler (Universität Ulm)

Modulumfang (ECTS): 8 CP

Arbeitsaufwand: 190 h

- Stoffvermittlung: 95 h
- Selbstlernzeit und Projektarbeit: 95 h
- Optionale Online-Sprechstunde

Einordnung (Semester): Winter- und Sommersemester

Inhaltliche Voraussetzungen: keine

Voraussetzungen nach SPO: keine

Kompetenzen:

Nach erfolgreichem Abschluss des Moduls weisen die Teilnehmenden ein grundlegendes Verständnis für die Radartechnik im Bereich der Hochfrequenztechnik (HF) auf, indem sie

- die wichtigsten Grundlagen der HF-Technik verstehen und diese mit Simulationswerkzeugen anwenden.
- die Eigenschaften und den Aufbau passiver HF-Komponenten für den Einsatz in Radarsensoren kennen.
- die Bedienung und Anwendung des Netzwerkanalysators zur Durchführung praxisnaher Messungen an passiven HF-Bauteilen beherrschen.
- die Eigenschaften aktiver HF-Komponenten und die Prinzipien der HF-Signalgenerierung für den Einsatz in Radarsensoren kennen.
- die Bedienung und Anwendung des Spektrumanalysators zur Durchführung praxisnaher Messungen an aktiven HF-Bauteilen beherrschen.
- die wichtigsten Grundlagen der Radartechnik verstehen, die Messgrößen beschreiben sowie Zusammenhänge zwischen den Sensorkenngrößen ziehen.
- die Radargleichung anwenden und den Einfluss der Reflexionseigenschaften unterschiedlicher Objekte auf die Empfangsleistung berechnen.
- die Methoden zur Richtungsbestimmung und Bildgebung mittels winkelgebender Radarsysteme und deren praktische Grenzen verstehen.

- die Funktionsweise, Einsatzgebiete und Einschränkungen von einem Radar mit synthetischer Apertur kennen.
- einen Überblick über aktuelle Trends der Radartechnologie, einschließlich Miniaturisierung, steigender Auflösung und Einsatz von künstlicher Intelligenz erhalten.
- die wichtigsten Grundlagen der Radar-Signalverarbeitung mit Schwerpunkt auf dem FMCW-Mehrrampenverfahren (engl. Frequency-Modulated Continuous Wave) und der praktischen Anwendung von Radarsensoren kennen und verstehen.
- die gesamte Signalverarbeitungskette eines Radarsensors von der Vorsignalverarbeitung zur Erzeugung einer Punktewolke bis hin zur Nachsignalverarbeitung auf Objektebene kennen.
- die Frequenzschätzung mittels Fouriertransformation zur Abstandsmessung sowohl simulieren als auch praktisch anwenden.
- die Geschwindigkeits- und Winkelinformationen bestimmen und die Prinzipien von Mehrantennensystemen verstehen.
- die systematische Auslegung von FMCW-Mehrrampenverfahren zur kombinierten Messung von Abstand, Geschwindigkeit und Winkel lernen und diese praktisch umsetzen.
- entsprechend der Anwendung, die Anforderungen an die Hardware und die Signalverarbeitung eines Radarsensors ableiten.
- eigenständig praktische Messungen mit Radarsensoren durchführen und Abstand, Geschwindigkeit und Winkel auswerten.
- die unterschiedlichen Einflüsse auf die Messergebnisse eines Radarsensors verstehen und Hardware-, Software- und Umgebungseinflüsse analysieren und einordnen

**Prüfungsleistungen:**

Schriftliche Ausarbeitung mit einem Umfang von maximal 20 Seiten mit abschließender Präsentation und Diskussion wahlweise entweder über ein vorgegebenes, aktuelles Thema der Radartechnik in der Luft- und Raumfahrt oder über die Durchführung und Auswertung von realen Radarmessungen zur Abstands-, Geschwindigkeits- und Winkelbestimmung.

**Verwendbarkeit:**

Das Ziel des Moduls ist die Vermittlung von allgemeinen und speziellen Kenntnissen im Bereich der Radartechnik auf System- und auf Komponentenebene. Hierfür werden die Grundlagen der Hochfrequenztechnik vermittelt und deren Bedeutung auf Systemebene beschrieben. Insbesondere wird der Bereich der Signalverarbeitung zur Auswertung der Radarsignale über die gesamte Verarbeitungskette vorgestellt. Durch die erlangten Spezialkenntnisse sind die Teilnehmenden in der Lage, die Radartechnik für unterschiedliche Anwendungen einzusetzen und in diesem Bereich auch Entwicklung zu betreiben.

**Lehrveranstaltung: Aerospace Sensorik - Radar**

EDV-Bezeichnung: LURZ 131

Dozent/in: Prof. Dr. Serdal Ayhan (HKA), Dr.-Ing. Martin Hitzler (Universität Ulm)

Umfang (SWS): 4

Turnus: halbjährlich (auf Anfrage)

Art und Modus: interaktives Seminar

Lehrsprache: deutsch (opt. englisch)

Inhalte:

**Teil 1: HF-Technik**

- HF-Grundlagen:
  - Leitungstheorie, Streuparameter, Smith-Diagramm
  - Laborversuch: HF-Schaltungssimulation zu HF-Grundlagen, Anpassung, Reflexion, Transmission
- Passive HF-Komponenten
  - Koppler und Filter mit  $\mu$ Streifenleitungen
  - Laborversuch: HF-Messtechnik mit Netzwerkanalysator  
Einführung Netzwerkanalysator, Messungen zu HF-Grundlagen, Filter, Koppler

- Aktive HF-Komponenten
  - Rauschen, Signal-zu-Rausch-Verhältnis, Nichtlinearitäten
  - HF-Signalgenerierung mit Phasenregelschleife (PLL), Phasenrauschen
  - Laborversuch: HF-Messtechnik mit Spektrumanalysator  
Einführung Spektrumanalysator, Messungen zu Nichtlinearitäten mit Mischer und Verstärker

#### Teil 2: Grundlagen Radartechnik

- Frequenzbereiche, Technologien, Wellenausbreitung, Messgrößen, Auflösung
- Radargleichung und Radarrückstreuquerschnitt (engl. Radar Cross Section RCS)
- Modulationsverfahren: Continuous Wave Radar, Pulsmodulation
- Winkelgebende Radarsysteme: Grundlagen der Winkelgebung, Phased Arrays, Antennen für Radarsysteme, Praktische Randbedingungen
- Synthetisches Apertur Radar (SAR): Funktionsweise, Anwendungsbeispiele und Grenzen
- Neue Trends der Radarsensorik

#### Teil 3: Radar-Signalverarbeitung

- FMCW-Signalverarbeitung zur Abstandsbestimmung
  - Abstandsschätzung und Abstandsauflösung
  - Laborversuch: Simulationen zur Bestimmung des Abstandes mittels Fouriertransformation (engl. fast Fourier transform, FFT), Signal- zu Rauschverhältnis (engl. Signal-to-Noise Ratio, SNR)
  - Laborversuch: Messungen mit einem 77-GHz Radarsensor und Auswertung realer Radarsignale
- FMCW-Signalverarbeitung zur Geschwindigkeits- und Winkelbestimmung
  - Geschwindigkeitsschätzung und Geschwindigkeitsauflösung
  - Winkelschätzung und Winkelauflösung
  - Mehrantennensysteme, MIMO (engl. Multiple Input Multiple Output), Beamforming
  - Laborversuch: Simulationen zur Bestimmung der Geschwindigkeit und des Winkels mittels FFT
  - Laborversuch: Software-Tool zur Auslegung und Systemanalyse von FMCW-Mehrampenverfahren für reale Sensoren
- FMCW-Signalverarbeitung zur Erzeugung von Radardetektionen
  - CFAR (engl. Constant False Alarm Rate), Clustering, Tracking
  - Laborversuch: Simulationen zu CFAR
  - Laborversuch: Abstands-, Geschwindigkeits- und Winkelmessungen mit einem 60-GHz Radarsensor, Diskussion der Messergebnisse

#### Empfohlene Literatur:

- Frank Gustrau: Hochfrequenztechnik – Grundlagen der mobilen Kommunikationstechnik, 3. Aufl. (zweite Aufl. 2013; aktuelle Ausgabe 2023), Hanser Fachbuchverlag, München. ISBN 978-3-446-47685-1
- David M. Pozar: Microwave Engineering, 4. Aufl., Wiley, Hoboken NJ 2011, ISBN 978-0-470-63155-3
- Michael Hieber: Grundlagen der vektoriellen Netzwerkanalyse, 2. Aufl. 2006, Rohde & Schwarz, München, ISBN 978-3-939837-05-3
- Christoph Rauscher, Volker Janssen, Roland Minihold: Grundlagen der Spektrumanalyse, 3. Aufl. 2007 (5. Aufl. 2011), Rohde & Schwarz, München, ISBN 978-3-939837-00-8
- Merrill I. Skolnik (Hrsg.): Radar Handbook, 3. Aufl. 2007, McGraw-Hill, New York, ISBN 978-0-07-148547-0
- Jürgen Göbel: Radartechnik: Grundlagen und Anwendungen, 2. Aufl. (aktuelle Ausgabe 2011), VDE Verlag, Berlin, ISBN 978-3-8007-3141-1

#### Anmerkungen:

Laborversuche mit HF-Messgeräten (Netzwerkanalysator und Spektrumanalysator), Messungen mit realen Radarsensoren und Matlab-Simulationen zur Radarauswertung sind Teil der Vorlesung.

## 1.4 Aerospace Software Engineering

### Modulname: Aerospace Software Engineering

#### Modulübersicht

EDV-Bezeichnung: LURZ 140

Modulverantwortliche(r): Prof. Dr.-Ing. Reza Ahmadi (HKA);  
Dipl.-Ing. Matthias Lehmann (Universität Stuttgart)

Modulumfang (ECTS): 8 CP

Arbeitsaufwand: 190 h

- Stoffvermittlung: 95 h
- Selbstlernzeit und Projektarbeit: 95 h
- Optionale Online-Sprechstunde

Einordnung (Semester): Winter- und Sommersemester

Inhaltliche Voraussetzungen: keine

Voraussetzungen nach SPO: keine

Kompetenzen: Nach erfolgreichem Abschluss des Moduls:

- Die Teilnehmenden kennen die wichtigsten luftfahrtsspezifischen Normen (z. B. DO-178C, ARP-4754A) sowie deren Zusammenhänge und Anforderungen an Softwareentwicklungsprozesse. Sie verstehen die Grundlagen des Konfigurations-, Änderungs- und Risikomanagements und können gängige Werkzeuge wie Git und JIRA einordnen.
- Die Teilnehmenden verstehen den strukturierten Entwicklungsprozess im V-Modell gemäß DO-178C, inklusive der Erstellung und Dokumentation von Anforderungen, Softwaredesign und Implementierung. Sie wissen, wie diese Phasen in sicherheitskritischen Projekten verknüpft und rückverfolgbar gemacht werden.
- Die Teilnehmenden kennen die Anforderungen an Verifikation und Validierung gemäß DO-178C für sicherheitskritische Software der Klasse DAL-A. Sie wissen, wie Verifikation geplant, durchgeführt und dokumentiert wird, einschließlich der Nutzung geeigneter Tools und Coverage-Metriken.
- Die Teilnehmenden verstehen die Grundlagen von IMA, ARINC-653/664 und der Architektur moderner Avioniksysteme. Sie können Echtzeitbedingungen (z. B. WCET), Multicore-Herausforderungen und modellbasierte Entwicklungsansätze in sicherheitsrelevanten Systemen bewerten.
- Die Teilnehmenden kennen Prinzipien der defensiven Programmierung, konfigurierbarer Systeme sowie CI/CT-Pipelines mit Tools wie Jenkins und Git. Sie haben einen Überblick über KI-gestützte Entwicklungsmethoden, Software-Reuse/COTS-Einsatz und Systemintegration auf µC-, FPGA- und ASIC-Basis.

Prüfungsleistungen:

- LBP – Während der Woche Projektarbeiten und Präsentationen von den Teilnehmenden
- Am Ende eine schriftliche Prüfung von 2 Stunden
  - 1 Stunde online Test mit Fragen zu den verschiedenen Themen
  - 1 Stunde Ausarbeitung einer konkreten Aufgabe unter Anwendung der gelernten Methoden und Techniken

Verwendbarkeit:

#### Allgemein:

Das Ziel des Moduls ist die Vermittlung von allgemeinen und speziellen Kenntnissen im Bereich der Entwicklung sicherheitskritischer Software im Luftfahrtkontext. Die Teilnehmenden erlangen ein fundiertes Verständnis der zugrunde liegenden Normen (z. B. DO-178C, ARP-4754A), des V-Modells

sowie der relevanten Entwicklungs-, Verifikations- und Managementprozesse. Darüber hinaus werden moderne technische Konzepte wie Multicore, modellbasierte Entwicklung, CI/CD und KI-Anwendungen im Kontext sicherer Software behandelt.

Das Modul schafft die Grundlagen für die eigenständige Planung, Umsetzung und Bewertung sicherheitsrelevanter Softwarelösungen in regulierten Systemumgebungen – insbesondere im Avionikbereich.

**Zusammenhänge / Abgrenzung zu anderen Modulen:**

Das Modul baut auf einem allgemeinen Verständnis von Softwareentwicklung und Systemtechnik auf und ergänzt dieses um sicherheitskritische, normenkonforme Praktiken. Es ist eng verknüpft mit Modulen zu Echtzeitsystemen, Requirements Engineering und Embedded Software, unterscheidet sich jedoch durch seinen Fokus auf Regelwerke, Verifikation, Zertifizierungsprozesse und Architekturentscheidungen nach luftfahrtsspezifischen Standards.

Im Unterschied zu klassischen Modulen über Programmierung oder Softwarearchitektur liegt der Schwerpunkt hier auf Zulassung, Nachvollziehbarkeit, Prozessdisziplin und Safety-Nachweisen, wie sie in stark regulierten Umfeldern gefordert sind (z. B. durch DO-178C, DO-254, ARINC 653, DO-326A).

**Lehrveranstaltung: Aerospace Software Engineering**

EDV-Bezeichnung: LURZ 141

Dozent/in: Prof. Dr.-Ing. Reza Ahmadi, Dipl.-Ing. Matthias Lehmann

Umfang (SWS): 4

Turnus: halbjährlich (auf Anfrage)

Art und Modus: interaktives Seminar

Lehrsprache: deutsch (opt. englisch)

Inhalte:

**Tag 1:**

**Übersicht der Vorgaben**

SAE ARP-4754A: System Development Process

SAE ARP-4761: Safety Assessment & Functional Hazard Analysis

RTCA DO-178C: Software Development & Certification

RTCA DO-330: Tool Qualification

RTCA DO-331/332/333: Model-Based, Object-Oriented, Formal Methods

RTCA DO-254: Hardware Design Assurance

RTCA DO-160: Environmental Conditions & Testing

RTCA DO-326A / DO-356A: Airborne Security (Cybersecurity Guidelines)

**Aerospace Software Project Management**

Aerospace Software Project Management

Projektlebenszyklus im Luftfahrtkontext

Rollen: Certification Authority, Design Assurance Engineer, Project Manager

Anforderungen an Nachvollziehbarkeit, Dokumentation, Prozessreife

Unterschiede zu klassischen/agilen SW-Projekten

Version Management / Konfigurationsmanagement

Einführung in das Konfigurationsmanagement (KM)

Was ist KM und warum ist es kritisch in der Luftfahrt?

Überblick über Konfigurationsobjekte: Code, Requirements, Tests, Dokumente

Lebenszyklus eines Konfigurationselements (Create – Modify – Release – Archive)

Anforderungen aus der Luftfahrt an ein KM-System

Eindeutige Identifikation und Versionierung

Änderungsverfolgung und Freigabeprozesse

Auditfähigkeit und Baseline-Kontrolle (z. B. Configuration Status Accounting)

Nachweise in DO-178C & DO-254 (z. B. Configuration Management Plan)

Tools für den Einsatz

Vergleich: Git, Subversion (SVN), ClearCase  
Branchenübliche Werkzeuge: GitLab, IBM Rational, Polarion, Helix Core  
Einführung in Git (Hands-on/Überblick)  
    Repositories, Commits, Branches, Tags  
    Best Practices für strukturierte KM in Git (z. B. Git Flow)  
    Toolchain-Integration (z. B. Git + Jenkins + DOORS)  
Problem Reporting & Change Management (ca. 60 min)  
    Problem Reporting  
        Klassifikation von Fehlern  
        Nachvollziehbarer Fehlerlebenszyklus (Detection → Logging → Tracking → Resolution)  
        Tools: JIRA, Bugzilla, Polarion ALM, gitlab, github  
    Change Management  
        Änderungsantrag, Impact Analysis, Freigabeworkflows  
        Zusammenhang mit Traceability und Safety Assessment  
        Review & Approval in DO-178-Umgebung  
Risk Management in Luftfahrtprojekten (ca. 45–60 min)  
    Systematische Risikoidentifikation (z. B. technische, terminliche, sicherheitsrelevante Risiken)  
    Methoden: FMEA, FTA, Hazard Analysis (ARP-4761)  
    Risikobehandlung: Vermeidung, Minderung, Akzeptanz  
    Risikomanagement-Dokumentation & Review  
Dissimilarity  
    Definition: Was bedeutet „Dissimilar Software“ im Kontext Safety & Certification?  
    Einsatz in Redundanzarchitekturen (z. B. diverse Implementierungen, unterschiedliche Tools/Compiler)  
    Vorteile: Fehlerunabhängigkeit, erhöhte Fehlertoleranz  
    Herausforderungen: Verifikation, Kosten, Maintenance  
Abschluss / Zusammenfassung  
    Rückblick auf Normenlandschaft und deren Zusammenwirken  
    Diskussion typischer Praxisprobleme bei KM, Change Mgmt, Dissimilarity  
    Q&A

## Tag 2:

### V-Modell Entwicklungsprozess (RTCA DO-178 )

Einführung: DO-178C und das V-Modell  
Struktur des Entwicklungsprozesses  
Anforderungsentwicklung im V-Modell  
Software Design im sicherheitskritischen Umfeld  
Implementierung und Integration  
Traceability & Artefaktstruktur  
Beispielhafte Dokumente und Artefakte  
Praxisübung / Workshop-Teil  
Zusammenfassung & Reflexion  
Optional: Vertiefungsthemen  
    Vergleich mit ISO 26262 (z. B. Automotive vs. Aviation)

## Tag 3:

### V-Modell V&V-Prozess (DAL-A)

Einführung in das V-Modell  
Verifikation und Validierung im V-Modell  
Einführung in DAL (Design Assurance Levels) nach DO-178C  
V&V-Prozess bei DAL-A im Detail  
Tools und Techniken für V&V bei DAL-A  
Beispiel-Szenario / Mini-Workshop

## Abschluss / Reflexion

- Checkliste für V&V bei DAL-A
- Was unterscheidet DAL-A von niedrigeren Levels (z. B. B/C)?
- Typische Auditfragen / Vorbereitung auf Zertifizierung
- Fragerunde & Zusammenfassung
- Optionales Bonus-Thema (wenn Zeit bleibt):
  - Tool Qualification nach DO-330
  - Unterschiede zu ISO 26262 / IEC 61508

## Tag 4 und 5:

### Software Architektur

#### IMA ARINC-653+ARINC-664

- Grundlagen der IMA Technologien
- IMA Plattformkonzepte
- IMA und Luftfahrtssysteme
- ARINC 653 - API, Operating-System,
  - Entwicklung und Realisierung einer Anwendung mit dem ARINC 653 API
  - Signalverarbeitung und Buskommunikation mit AFDX
  - Auslegen und Verifikation einer Systemfunktion

#### Worst Case Execution Time

- Grundlagen WCET
- Beurteilung von Algorithmen (O-Notation)
- Einflussfaktoren auf die WCET
- Messung und Vorgehen zur Bestimmung der WCET
- Statische WCET-Analyse
- Messbasierte WCET-Analyse
- Toolunterstützung & Frameworks
- WCET in Echtzeitsystemen
- Herausforderungen & Grenzen
- Anwendungsbeispiele
- Projekt oder Vortrag

#### Multi-Core

- Grundlagen der Multicore-Architektur
- Parallelisierungstechniken
- Thread-Programmierung
- Synchronisation und Speicherzugriff
- Programmiermodelle für Multicore
- Multicore-Optimierung
- Debugging & Testing in Multicore-Umgebungen
- Betriebssystemunterstützung für Multicore
- Performance-Messung und -Tuning
- Anwendungen von Multicore-Programmierung
- Bonus-Themen (fortgeschritten)

#### Modellbasierte Softwareentwicklung

#### Code-Generierung

- Grundlagen und Motivation
- Arten von Code-Generierung
- Tools & Frameworks zur Code-Generierung
- Vor- und Nachteile der Code-Generierung
- Code-Generierung in Build-Prozessen
- Templatebasierte Code-Generierung
- Domänenspezifische Sprachen (DSLs)

Sicherheit & Qualität bei generiertem Code  
Code-Generierung in der KI-Entwicklung  
Reverse Engineering und Re-Generierung  
Fallstudien und Praxisbeispiele

**Tag 6 und 7:**

**Software Entwicklung**

Defensive Programmierung und Safe C  
Fehlerbehandlung und Ausnahmebehandlung  
Validierung von Eingaben  
Vertragsbasiertes Programmieren (Design by Contract)  
Unit Testing & Testgetriebene Entwicklung (TDD)  
Code Reviews & statische Codeanalyse  
Verwendung sicherer Programmiermuster  
Logging und Monitoring  
Dokumentation und Verständlichkeit  
Defensive Programmierung im Teamkontext  
Vergleich verschiedener Programmiersprachen  
Defensive Programmierung vs. offensive Techniken

Konfiguration

Grundlagen konfigurierbarer Systeme  
Konfigurierbarkeit vs. Selbstadaptation  
Probleme konfigurierbarer/selbst adaptierbarer Systeme  
DO178C und Parameter Data Item (PDI)  
Definition der Usage Domain  
Verifikation der Usage Domain

CI/CT

Einführung: Continuous Integration (CI) & Continuous Testing (CT)  
Tool: Jenkins  
Git und Jenkins – Zusammenspiel  
Aufsetzen eines Workflows  
Code Coverage  
Performance-Messung in der CI  
Erweiterbare Zusatzthemen (optional)  
    Security Checks (SAST)  
    Fehler- und Loganalyse  
    Containerisierung & CI/CD  
    Best Practices & Anti-Patterns

Vortrag/Projektbericht

KI in der Entwicklung

Einführung in KI  
KI-Methoden  
Retrieval-Augmented Generation (RAG)  
KI-gestützte Tools in der Softwareentwicklung  
KI in CI/CD-Pipelines  
Herausforderungen und Risiken  
Praxisbeispiele und Werkzeuge  
Zukunft & Ausblick  
Präsentation oder Arbeit:

Software Reuse / COTS

Was ist Software Reuse  
Einbindung in das V-Modell  
Traceability  
Arten von Software Reuse

Bewertung und Auswahl von COTS  
Qualitätsaspekte und Risiken bei Reuse  
Integrationstechniken  
Dokumentation und Governance  
Wirtschaftlichkeit von Software-Reuse  
Beispiele aus der Praxis  
µC / Speicher / ASIC / FPGA  
Aufbau eines Avionik Rechners  
Betrachtung einzelner Komponenten

#### **Empfohlene Literatur:**

Normen & Zertifizierung (DO-178C, ARP-4754A, DO-254 usw.):

1. "Software Engineering for Embedded Systems" – Robert Oshana Umfangreiches Praxisbuch zu sicherheitskritischer Entwicklung, inkl. DO-178C und DO-254
2. "Avionics Certification: A Complete Guide to DO-178 (and DO-254)" – Vance Hilderman, Tony Baghai - Praktischer Leitfaden zu Zertifizierung, Prozessen und Dokumentation
3. "Safety-Critical Software: Specification, Verification, and Compliance" – Leanna Rierson- Tiefgehende Einführung in Standards wie DO-178C, ARP-4754A, DO-330, DO-254

V-Modell, Projektmanagement & Traceability:

4. "The V-Model of Software Development" – Michael Züger - Praxisnahes Buch zur Anwendung des V-Modells in regulierten Entwicklungsprojekten
5. "Requirements Engineering: Fundamentals, Principles, and Techniques" – Klaus Pohl- Grundlagen der Anforderungsanalyse mit Fokus auf Traceability

Echtzeitsysteme, WCET, Multicore, Architektur:

6. "Real-Time Systems" – Jane W. S. Liu - Standardwerk für Echtzeitsysteme, Scheduling und Echtzeitbetrieb
7. "Embedded Systems Architecture" – Tammy Noergaard - Einführung in eingebettete Architekturen, Plattformen, ARINC und Multicore
8. "Modern Multicore-Systems: Programming, Performance, and Analysis" – Shameem Akhter - Technisches Buch zu Multicore-Programmierung und Optimierung
9. "Worst-Case Execution Time Analysis" – Reinhard Wilhelm et al. - Fachlich präzise Darstellung statischer und dynamischer WCET-Analyse

Modellbasierte Entwicklung & Codegenerierung:

10. "Model-Based Engineering with AADL" – Peter H. Feiler - Einführung in modellbasiertes Systemdesign mit AADL und Safety-Bezug
11. "Model-Based Development for Embedded Systems" – Gabriela Nicolescu - Übersicht zu Modellierung, Generierung und Verifikation in Embedded-Projekten

Testing, CI/CD, Defensive Programmierung:

12. "Continuous Delivery" – Jez Humble, David Farley - Grundlagen und Best Practices für moderne CI/CD-Pipelines
13. "Effective Unit Testing" – Lasse Koskela - Praktische Einführung in sinnvolle Teststrategien und Testabdeckung
14. "Clean Code" – Robert C. Martin - Grundlagen für sauberen, wartbaren, testbaren Code
15. "Secure Coding in C and C++" – Robert C. Seacord - Praxisnahes Buch für sichere Programmierung in sicherheitskritischer Umgebung

Künstliche Intelligenz in der Softwareentwicklung:

16. "You Look Like a Thing and I Love You" – Janelle Shane - Einstieg in KI, Fehlverhalten und Grenzen – verständlich erklärt
17. "Designing Data-Intensive Applications" – Martin Kleppmann - Architektur moderner datenintensiver Systeme – auch relevant für KI-Anwendungen
18. "Practical Deep Learning for Coders" – Jeremy Howard, Sylvain Gugger - Einführung in Deep Learning mit praktischen Beispielen

**Software Reuse & COTS:**

19. "Component Software: Beyond Object-Oriented Programming" – Clemens Szyperski - Technische Grundlagen der Wiederverwendung von Softwarekomponenten
20. "Commercial-Off-The-Shelf (COTS) Software in Defense Systems" – Defense Acquisition University - Fokus auf Bewertung, Integration und Risiken von COTS in sicherheitskritischen Systemen

**Zusätzliche Empfehlungen:**

- EASA/FAA-Guidance Material (z. B. DO-178C Handbook, AC 20-115D)
- Originaldokumente: RTCA DO-178C, DO-254, DO-330, SAE ARP-4754A, ARP-4761 - (sofern verfügbar oder intern zugänglich)

Anmerkungen: keine