

Interner Bericht

DLR-IB-FT-BS-2025-194

Aufbau, Konfiguration und Validierung eines aktiven Steuerkraftsystems für einen Tragschrauber-Simulator

Bachelorarbeit

Lennart Carl Halfbrodt

Deutsches Zentrum für Luft- und Raumfahrt

Institut für Flugsystemtechnik
Braunschweig

Institutsbericht
DLR-IB-FT-BS-2025-194

**Aufbau, Konfiguration und Validierung eines aktiven
Steuerkraftsystems für einen Tragschrauber-Simulator
(Bachelorarbeit)**

Lennart Carl Halfbrodt

Institut für Flugsystemtechnik
Braunschweig

Deutsches Zentrum für Luft- und Raumfahrt e.V.
Institut für Flugsystemtechnik
Abteilung Flugdynamik und Simulation

**Stufe der Zugänglichkeit: I, Allgemein zugänglich: Der Interne Bericht wird
elektronisch ohne Einschränkungen in ELIB abgelegt.**

Braunschweig, den 01.12.2025

Unterschriften:

Institutsleitung:

Abteilungsleitung: Dr. H. Duda

Betreuer:in: D. Müller

Verfasser:in: L. Halfbrodt



**Aufbau, Konfiguration und Validierung eines aktiven Steuerkraftsystems
für einen Tragschrauber-Simulator**

BACHELORARBEIT

für die Prüfung zum

BACHELOR OF ENGINEERING

des Studiengangs Luft- und Raumfahrttechnik

der Dualen Hochschule Baden-Württemberg Ravensburg, Campus Friedrichshafen

von

Lennart Halfbrodt

Abgabe am 04.10.2025

Bearbeitungszeitraum:	30.06.2025 – 04.10.2025
Matrikelnummer, Kurs:	7253972, TLR22
Abteilung:	Institut für Flugsystemtechnik
Ausbildungsbetrieb:	Deutsches Zentrum für Luft- und Raumfahrt e.V. (DLR), Braunschweig
Betreuer des Ausbildungsbetriebs:	David Müller
Gutachter der Dualen Hochschule:	Prof. Dr. Philipp Krämer

Erklärung

Ich versichere hiermit, dass ich meine Bachelorarbeit mit dem

THEMA

**Aufbau, Konfiguration und Validierung eines aktiven Steuerkraftsystems
für einen Tragschrauber-Simulator**

selbstständig verfasst und keine anderen als die angegebenen Quellen und Hilfsmittel
benutzt habe.

A black rectangular box used to redact the signature of the author.

Braunschweig, den 04.10.2025

Abstract

In addition to the Air Vehicle Simulator (AVES), the German Aerospace Center (DLR) also operates the GyroTrain simulator in Braunschweig. This is an autogyro simulator. Its control force system is unable to accurately reproduce the high forces that occur when an autogyro takes off.

For this reason, this thesis investigates an alternative control force system for its usability in a gyrocopter simulator. The control force system was developed by Wittenstein and originally purchased for use in a helicopter simulator. Among other things, this thesis develops and implements a novel methodology for representing dynamic control forces for this system. The implementation is evaluated qualitatively and quantitatively in a real-time simulation that has been slightly adapted for the system's test bench. Finally, a reasoned assessment of the usability of the investigated system is formulated.

Kurzzusammenfassung

Das Deutsche Zentrum für Luft- und Raumfahrt (DLR) betreibt in Braunschweig neben dem Air Vehicle Simulator (AVES) auch den Simulator GyroTrain. Dabei handelt es sich um einen Tragschrauber-Simulator. Dessen Steuerkraftsystem kann die hohen Kräfte, die beim Start eines Tragschraubers auftreten, nicht gut abbilden. Aus diesem Grund untersucht diese Arbeit ein alternatives Steuerkraftsystem auf seine Nutzbarkeit für einen Tragschrauber-Simulator. Das Steuerkraftsystem wurde von der Firma Wittenstein entwickelt und ursprünglich für die Verwendung in einem Helikopter-Simulator angeschafft. Unter anderem wird in dieser Arbeit eine für dieses System neuartige Methodik zur Darstellung von dynamischen Steuerkräften entwickelt und implementiert. In einer für den Teststand des Systems geringfügig angepassten Echtzeitsimulation wird die erarbeitete Implementierung qualitativ und quantitativ evaluiert. Abschließend wird eine begründete Einschätzung der Nutzbarkeit des untersuchten Systems formuliert.

Inhaltsverzeichnis

Abbildungsverzeichnis

Tabellenverzeichnis

Abkürzungsverzeichnis

Symbolverzeichnis

Anhangsverzeichnis

1. Aufgabenstellung	1
2. Motivation	2
3. Grundlagen	9
3.1. Air Vehicle Simulator (AVES)	9
3.2. Wittenstein Control Loading System (WCLS)	12
3.3. Teststand für das Wittenstein Control Loading System (WCLS)	16
3.4. Aktueller Stand des GyroTrain-Simulators	18
3.4.1. Aufbau des GyroTrain-Simulators und des dynamischen Trag- schraubermodells	18
3.4.2. Elektro-magnetischer Sidestick (MAGSI)	21
3.5. 2Simulate	22
3.5.1. 2Simulate Control Center (2SimCC)	23
3.5.2. 2Simulate Realtime Framework (2SimRT)	24
3.5.3. 2Simulate Model Control (2SimMC)	27
3.6. 2Indicate	27
4. Methodik und Umsetzung	29
4.1. Anforderungsanalyse und Projektplanung	29
4.2. Messaufbau für Steuerkräfte	34
4.3. Kalibrierung des WCLS	36
4.4. Konfiguration des WCLS	39

4.5.	Erweiterung des Teststandes	40
4.6.	Die modifizierte GyroTrain-Simulation	42
4.7.	Darstellung von Steuerkräften	47
4.7.1.	Kennlinien und QFeel-Faktor	47
4.7.2.	Direkte Vorgabe von Kräften	49
4.8.	Not-Abschaltung des Control Loading System (CLS)	50
5.	Ergebnisse	54
5.1.	Subjektive Performance des Systems	54
5.2.	Darstellung großer Steuerkräfte	56
5.3.	Performance der Simulation	58
5.4.	Dynamische Systemantwort und Stabilität	62
6.	Diskussion	64
7.	Zusammenfassung	66
8.	Ausblick	67
	Literaturverzeichnis	

Abbildungsverzeichnis

2.1.	Der Flugsimulator „Link Trainer“ [3]	2
2.2.	Anströmung eines Tragschraubers im Vorwärtsflug (aus [5])	4
2.3.	Kippkopfsteuerung um den Bolzen Pitch Pivot Bolt (PPB) (aus [5])	5
2.4.	Steuereingaben um die Querachse (aus [5])	6
2.5.	Tragschrauber bei einem konventionellen Start mit moderatem Nickwinkel (aus [6])	7
3.1.	AVES [9] und Fliegender Hubschrauber Simulator (FHS) [10]	10
3.2.	Beispielhafter Aufbau eines CLS von WITTENSTEIN aerospace & simulation (aus [14])	13
3.3.	Markierter Grip Reference Point (GRP) an dem in dieser Arbeit verwendeten Steuerknüppel	14
3.4.	Computer Aided Design (CAD)-Darstellung des Teststand-Designs	17
3.5.	Der aktuelle GyroTrain-Simulator	18
3.6.	Hardware-Struktur des GyroTrain-Simulators (aus [18])	19
3.7.	Struktureller Aufbau der Simulinkmodelle (aus [19])	20
3.8.	Das Steuerkraftsystem Elektro-magnetischer Sidestick (MAGSI) im GyroTrain-Simulator	22
3.9.	Darstellung einer einfachen Anwendung mit allen drei Bestandteilen von 2Simulate (aus [21])	23
3.10.	2Simulate Control Center (2SimCC)-Startmenü aus dem GyroTrain-Simulator	24
3.11.	Die von 2Simulate bereitgestellten Echtzeitaufgaben (aus [21])	25
3.12.	Datensignale im Quicklook-Menü	26
3.13.	Die Darstellung der Cockpitinstrumente im Tragschrauber-Simulator des Deutsches Zentrum für Luft- und Raumfahrt (DLR) während eines simulierten Fluges	28
4.1.	Eine Satzschablone für die Formulierung von Anforderungen (aus [26])	31
4.2.	Ausschnitt aus dem Projektplan	33
4.3.	Der um den Messaufbau erweiterte Teststand	35
4.4.	Kalibrierungs-Messung einer Richtung der Rollachse	37
4.5.	Kalibrierungs-Messung einer Richtung der Nickachse	38

4.6.	Der um Bildschirme und einen Joystick erweiterte Teststand	41
4.7.	Schematische Übersicht über den Teststand	43
4.8.	ein Frame des WCLS-Tasks	46
4.9.	Eine mögliche Kraft-Weg-Kennlinie, basierend auf einer einfachen Master-Kurve (aus [15])	48
4.10.	Vergleich der Rückseiten zweier System Power Supply (SPS)	52
4.11.	Die Steckdosenleiste mit Not-Aus-Schalter	53
5.1.	Auswertung einiger Fragestellungen der Testkampagne	56
5.2.	Messung der maximalen Spitzenlast der Nickachse des WCLS	57
5.3.	Messung der maximalen Spitzenlast der Rollachse des WCLS	58
5.4.	Aufgezeichnete Daten aus dem ersten Testflug	61
5.5.	Pol-Nullstellen-Diagramm der Übertragungsfunktion für die Nickachse	62
5.6.	Pol-Nullstellen-Diagramm der Übertragungsfunktion für die Rollachse	63
E.1.	Aufgezeichnete Daten aus dem ersten Test	xxxv
E.2.	Aufgezeichnete Daten aus dem zweiten Test: erster Flug	xxxvi
E.3.	Aufgezeichnete Daten aus dem zweiten Test: zweiter Flug	xxxvii
E.4.	Aufgezeichnete Daten aus dem zweiten Test: dritter Flug	xxxviii
E.5.	Aufgezeichnete Daten aus dem dritten Test	xxxix
E.6.	Aufgezeichnete Daten aus dem vierten Test	xl
E.7.	Aufgezeichnete Daten aus dem fünften Test: erster Flug	xli
E.8.	Aufgezeichnete Daten aus dem fünften Test: zweiter Flug	xlii

Tabellenverzeichnis

4.1. Gemessenen Daten aus der Kalibrierung der Achsen des WCLS	39
5.1. Auswertung der technischen Performance der entwickelten Lösung auf Basis der Messdaten der Testkampagne	60
A.1. Anforderungen an das in dieser Arbeit entwickelte Produkt	v

Abkürzungsverzeichnis

2SimCC	2Simulate Control Center	23, 24, 26, 54, 57, 62
2SimMC	2Simulate Model Control	23, 27
2SimRT	2Simulate Realtime Framework	23–27, 42
ATRA	Advanced Technologies Research Aircraft	11
AVES	Air Vehicle Simulator	1, 9–11, 23, 41
CAD	Computer Aided Design	16, 17
CAN	Controller Area Network	12
CLS	Control Loading System	12, 13, 15, 16, 21, 34, 36, 39, 49–53, 58
DLR	Deutsches Zentrum für Luft- und Raumfahrt	1, 3, 8, 9, 11, 12, 18, 20–22, 27, 28, 30, 44, 65
FHS	Fliegender Hubschrauber Simulator	3, 10–12, 14, 16, 39, 48
GRP	Grip Reference Point	14–16, 32, 34, 36, 38, 64
HOTAS	Hands On Throttle And Stick	42
IC	Interface Computer	42–44
IP	Internet Protocol	27
MAGSI	Elektro-magnetischer Sidestick	8, 21, 22, 43, 55, 67
MFC	Model Following Controller	15, 39, 40, 64
PC	Personal Computer	15, 41, 42, 49
PPB	Pitch Pivot Bolt	5
SCD	Simulation Control Database Tool	26
SCM	System Control Module	12, 15, 36, 41, 47, 49
SPS	System Power Supply	12, 41, 51, 52

TB Schlaggelenk	5, 7
UDP User Datagram Protocol	25, 27, 44
USB Universal Serial Bus	42
WCLS Wittenstein Control Loading System . 12–17, 25, 29, 32, 34, 36–40, 42–45, 47–51, 54–59, 62, 64, 65, 67	
ZFT zero flight time	2

Symbolverzeichnis

A Ampere	22
$^{\circ}$ Grad	39
Hz Hertz	7, 40, 64
kg Kilogramm	39
ms Millisekunde	60
N Newton	14, 21, 32, 34, 39, 49, 57, 59, 60, 64, 65
N/s Newton pro Sekunde	21
s Sekunde	57

Anhangsverzeichnis

Anhang A: Anforderungen	i
Anhang B: Quellcode der Callback-Routinen des WCLS-Tasks	vi
B.1. dpWcls.cpp	vi
B.2. dpWcls.h	xiii
Anhang C: Fragebogen für Probanden der Testkampagne	xv
Anhang D: Von Probanden der Testkampagne ausgefüllte Fragebögen	xviii
D.1. Fragebogen von Test 1	xviii
D.2. Fragebogen von Test 2	xxii
D.3. Fragebogen von Test 3	xxv
D.4. Fragebogen von Test 4	xxviii
D.5. Fragebogen von Test 5	xxxi
Anhang E: Messdaten aus den Testflügen	xxxiv

Aufbau, Konfiguration und Validierung eines aktiven Steuerkraftsystems für einen Tragschrauber-Simulator

1. Aufgabenstellung

Das Institut für Flugsystemtechnik des Deutschen Zentrums für Luft- und Raumfahrt (DLR) betreibt in Braunschweig neben dem Air Vehicle Simulator (AVES) auch den Simulator GyroTrain, der das virtuelle Fliegen mit einem Tragschrauber ermöglicht. Damit die hohen Kräfte, die ein Pilot beim Startvorgang typischerweise aufbringen muss, besser abgebildet werden können, soll ein alternatives aktives Steuerkraftsystem auf seine Nutzbarkeit für die Nick- und die Rollachse untersucht werden. Dieses wurde von der Firma Wittenstein entwickelt und basiert, genau wie sein Vorgänger, auf einem Steuerknüppel, der mit zwei Elektromotoren verbunden ist.

Um die Parameter des Steuerkraftsystems auf die Dynamik eines Tragschraubers anzupassen, wurde das System in einem eigens konstruierten Teststand montiert, in dem die anliegenden Kräfte gemessen werden können. Die Ermittlung einer passenden Kraft-Weg-Kennlinie für den Startvorgang, beziehungsweise eine geeignete Modifikation der Kennlinie in Echtzeit, ist das Ziel der vorliegenden Arbeit.

Als Vorgabe für die Steuerkräfte kann auf das bereits bestehende flugdynamische Modell des Tragschrauber-Simulators sowie auf die Messdaten, die ihm zu Grunde liegen, zurückgegriffen werden.

2. Motivation

Flugsimulatoren haben sich über Jahrzehnte zu einem integralen Teil der Luftfahrtindustrie entwickelt. Sie führten zu vielen wichtigen Verbesserungen in der Pilotenausbildung und anderen Disziplinen. Erste Simulatoren mussten noch wegen mangelndem Vertrauen in ihre Nützlichkeit zunächst an Vergnügungsparks verkauft werden.[1] Doch bereits während des zweiten Weltkrieges wurden tausende Piloten der alliierten Luftstreitkräfte an Flugsimulatoren ausgebildet, entworfen von Edwin Link.[1] Ab den 1980er Jahren wurde ein Großteil der Typ-Umschulungen und regelmäßigen Überprüfungen von Piloten ziviler Airlines in Flugsimulatoren absolviert. Heutzutage gibt es sogar ZFT-Trainingsimulatoren, die eine so hohe Simulationsgüte aufweisen, dass in ihnen die gesamte Pilotenausbildung absolviert werden kann.[2]



Abbildung 2.1.: Der Flugsimulator „Link Trainer“ [3]

Im zivilen wie militärischen Bereich sind Simulatoren heute weit verbreitet und bedienen verschiedene Anwendungszwecke. In der Ausbildung und regelmäßigen Trainings können hohe Kosten gespart werden. Außerdem können Besatzungsmitglieder spezifisches Training absolvieren, in dem sie potentiell gefährlichen Situationen ausgesetzt werden, ohne dass ein tatsächliches Verletzungsrisiko besteht. Auch schädliche Emissionen sowie Lärmbelastung aufgrund von Trainingsflügen können eliminiert werden. Im militärischen Bereich kann zusätzlich der Vorteil von Simulatoranlagen genutzt werden, dass spezifische Manöver und Taktiken unter Ausschluss der Öffentlichkeit erprobt werden können. So wird zusätzlich zum reduzierten Risiko für Besatzungen auch die strategische und taktische Geheimhaltung gewahrt.[2]

Neben ihrem primären Einsatzbereich in der Pilotenausbildung werden Flugsimulatoren auch in der Flugzeugentwicklung als Entwicklungs- und Testwerkzeug verwendet.[1]

Ein wichtiger Teil von Flugsimulatoren sind Steuerkraftsysteme. Im Flug eines Luftfahrzeugs wirken über der Zeit veränderliche Kräfte auf die Steuerflächen aufgrund von aerodynamischen Effekten. Diese Kräfte beeinflussen das Handling des Fluggeräts und müssen demnach auch in einem Flugsimulator abgebildet werden. Bei Luftfahrzeugen, wo die Steuerflächen direkt mechanisch mit den Steuerelementen verbunden sind, resultieren Kräfte an den Steuerflächen in entsprechenden Kräften an den Steuerelementen.

Bei anderen Luftfahrzeugen kommt stattdessen beispielsweise die Fly-by-Wire Technologie zum Einsatz, bei der keine direkte Kopplung zwischen Steuerelementen und -Flächen mehr herrscht. In diesem Fall können aktive Steuerorgane verwendet werden, um Kräfte an den Steuerelementen darzustellen. So werden zum Beispiel im Forschungshelikopter Fliegender Hubschrauber Simulator (FHS) des DLR Steuerkräfte an nachgerüsteten aktiven Sidesticks über Kraft-Weg-Kennlinien realisiert. Mit diesen können Piloten taktil zusätzliche Hinweise auf bestimmte Situationen und Flugzustände mithilfe von Ausbrechkräften, Steuervibrationen und Softstops gegeben werden.[4]

Für die Darstellung jeglicher Kräfte an den Steuerelementen im Flugsimulator werden hingegen Steuerkraftsysteme verwendet. Diese können mit hydraulischen oder elektronischen Aktoren realisiert werden. Beide Systeme müssen strikten Sicherheitsvorschriften genügen, da sie das Potential besitzen, große Verletzungen bei der Besatzung eines Simulators zu verursachen. Aus diesem Grund, und damit eine akkurate Kraftrückmeldung bereitgestellt werden kann, besitzen Steuerkraftsysteme meist integrierte Kraftsensoren.[1] Mithilfe des Feedbacks der Sensoren und der Ansteuerung der Aktoren können so auch taktile Signale über den aktuellen simulierten Flugzustand übermittelt werden.

Taktile Rückmeldungen über den Flugzustand sind besonders dynamisch ausgeprägt bei Luftfahrzeugen, bei denen eine direkte mechanische Kopplung der Steuerflächen mit dem Steuerknüppel besteht. Somit ist ein gutes Steuerkraftsystem bei Flugsimulatoren, die solche Fluggeräte darstellen sollen, ein sehr wichtiger Bestandteil des Simulators.

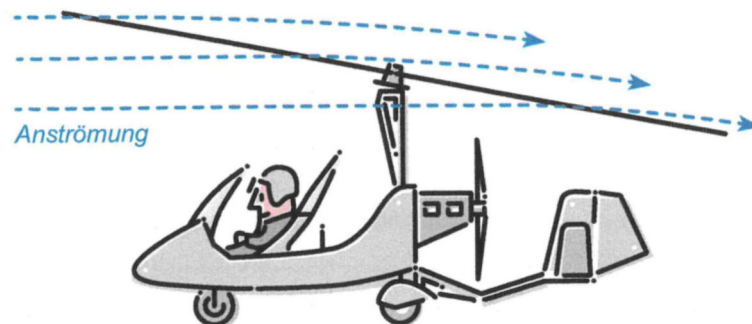


Abbildung 2.2.: Anströmung eines Tragschraubers im Vorwärtsflug (aus [5])

Tragschrauber sind Luftfahrzeuge, die Auftrieb über einen Hauptrotor generieren, ähnlich wie ein Helikopter. Jedoch wird der frei drehende Hauptrotor eines Tragschraubers im Flug nicht aktiv, sondern nur durch den Fahrtwind angetrieben. Diesen im Flug eines Tragschraubers durchgehend bestehenden Zustand nennt man Autorotation.[5]

Damit dieser Zustand besteht, muss die Rotorebene von unten angeströmt werden. Aus diesem Grund ist der Rotor im Flug leicht nach hinten geneigt, wie in Abbildung 2.2 zu sehen ist.[5] Auftrieb wird unabhängig von der Fluggeschwindigkeit erzeugt, solange ein ausreichend großer Luftstrom aufwärts durch die Rotorebene strömt.[6]

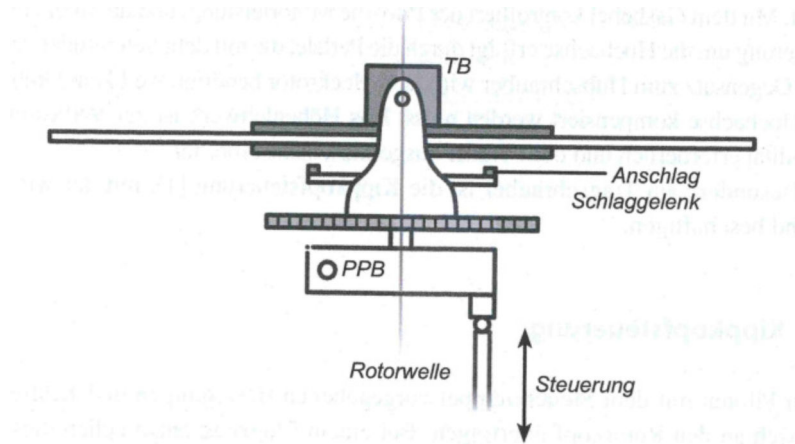


Abbildung 2.3.: Kippkopfsteuerung um den Bolzen PPB (aus [5])

Die Funktionen, die bei einem Flächenflugzeug das Höhen- und das Querruder übernehmen, werden bei einem Tragschrauber durch die Neigung des Rotorkopfes bereitgestellt. Dabei werden am Steuerknüppel vorgegebene Kräfte und Bewegungen mechanisch über Steuerstangen an den Rotorkopf übertragen. Eine Neigung des Rotorkopfes um die Querachse erfolgt über die Rotornickachse, auch Pitch Pivot Bolt (PPB) genannt. Die Rotorblätter sind dabei über das Schlaggelenk (TB) zentral gelenkig befestigt, wie in Abbildung 2.3 dargestellt ist. Dieses Steuerprinzip nennt sich Kippkopfsteuerung und bietet eine weniger komplizierte Ansteuerung der Rotorblätter als die Steuerung über eine Taumelscheibe.[5] Eine beispielhafte Darstellung der mechanischen Kopplung zwischen Steuerknüppel und Rotorkopf bei Steuereingaben um die Querachse ist in Abbildung 2.4 zu erkennen. Bei der Kippkopfsteuerung wird zwischen der Rotordrehebene, die senkrecht zur Rotorwelle steht, und der Rotorkreisebene, die der Blattspitzenebene entspricht, unterschieden. Bewegt ein Pilot den Steuerknüppel um die Querachse, neigt er zunächst nur den Rotorkopf, und damit die Rotordrehebene.

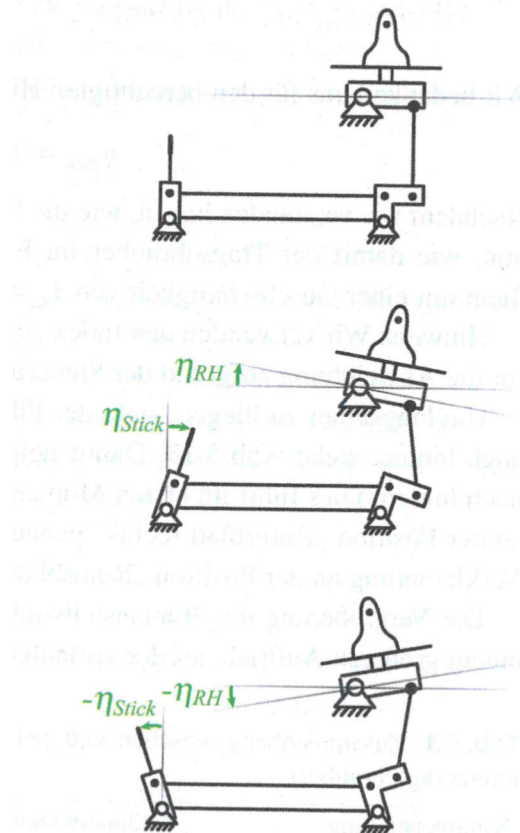


Abbildung 2.4.: Steuereingaben um die Querachse (aus [5])

Die Neigung der Rotorkreisebene folgt der Steuereingabe nach wenigen Zehntel Sekunden. Trotz dieser zeitlichen Verzögerung neigt sich die Rotorkreisebene genau um den Wert des Steuerwinkels.[5]

Da der Rotorkopf direkt über ein mechanisches Gestänge mit dem Steuerknüppel verbunden ist, führen Kräfte am Rotorkopf, beziehungsweise Momente um die Rotornickachse, zu einer am Steuerknüppel wirkenden Handkraft. Diese Handkraft ist eine wichtige Rückmeldung für Piloten im Flug. Sie ergibt sich aufgrund der Neigung der Rotorkreisebene gegenüber der Rotordrehebene.[5] Viele Faktoren, darunter die Rotorkraft, die Fluggeschwindigkeit, aerodynamische Widerstände, die Beladung und Steuereingaben beeinflussen die wirkende Handkraft. In modernen Tragschraubern können außerdem zusätzliche Kräfte am Rotorkopf mithilfe einer Trimmanlage aufgebracht werden, um die Handkraft zu kompensieren.[5]

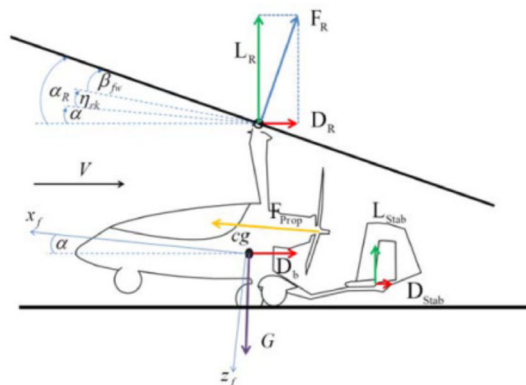


Abbildung 2.5.: Tragschrauber bei einem konventionellen Start mit moderatem Nickwinkel (aus [6])

Bei dem konventionellen Start eines Tragschraubers wird der Hauptrotor in der Vorrotations-Phase des Startvorgangs über eine Kopplung mit dem Motor auf eine Drehrate von ca. 200 Umdrehungen pro Minute beschleunigt. Danach wird der Rotor nach hinten geneigt und nach einem Schubkommando beschleunigt der Tragschrauber stark. Bei steigender Geschwindigkeit entsteht aufgrund der Neigung des Rotors ein starkes aufnickendes Moment um die Achse des Hauptfahrwerks.[6]

Wegen der starken Neigung und dem wachsenden Betrag des Rotorkraftvektors müssen große Handkräfte aufgebracht werden, um den kleinen Nickwinkel des Tragschraubers zu halten. Der Tragschrauber muss für einen sicheren Start in einer Fluglage mit einem geringen Anstellwinkel gehalten werden, bis der Rotor eine ausreichend hohe Drehrate für einen Steigflug erreicht hat.[6] Dieser besonders kritische Flugzustand ist in Abbildung 2.5 dargestellt.

Eine weitere Besonderheit des Verhaltens des Steuerknüppels im Flug ist dessen ständige Schwingung. Diese Schwingung tritt, je nach Rotordrehzahl, mit einer Frequenz von 11 bis 12 Hz auf. Sie resultiert aus dem zweimaligen Schwanken der Rotorkraft pro Umdrehung.[5]

Die Rotorkraft ergibt sich aus der Summe der Luftkräfte beider Rotorblätter. Die Luftkräfte am Vor- und Rücklaufenden Rotorblatt unterscheiden sich aufgrund einer unsymmetrischen Anströmung und der damit verbundenen Schlagbewegung des Rotors um das TB.

Diese Schlagbewegung ist ein wichtiger Ausgleich für den Rotor im Vorwärtsflug.[5] Daher ist die aus ihr resultierende Schwingung des Steuerknüppels ein wichtiges Verhalten, das auch in einem Simulator abgebildet werden sollte.

Das DLR Institut für Flugsystemtechnik verfügt über einen einfachen und kostengünstigen Tragschraubersimulator. Dieser enthält einen Fernseher als Sichtsystem sowie ein Touchpanel für die Darstellung und Bedienung der Cockpitinstrumente. Bei dem Pilotensitz, dem Steuerknüppel, den Pedalen und der Gas-/Bremseinheit handelt es sich um originale Steuerelemente eines Tragschraubers.[7]

Die am Steuerknüppel anliegenden Handkräfte werden mithilfe des im DLR entwickelten Elektro-magnetischer Sidestick (MAGSI) erbracht.[7] Im Betrieb des Simulators haben einige Personen den Eindruck gewonnen, dass der MAGSI zu geringe Steuerkräfte erbringt. Aus diesem Grund soll ein alternatives aktives Steuerkraftsystem gefunden werden, dass die hohen Kräfte, die beispielsweise im Startvorgang eines Tragschraubers auftreten, besser darstellen kann.

3. Grundlagen

Dieses Kapitel stellt den AVES, das in dieser Arbeit verwendete Steuerkraftsystem sowie den in einer vorherigen Arbeit für dieses entworfenen Teststand vor. Außerdem wird auf den bereits vorhandenen Tragschrauber-Simulator des DLR und dessen Steuerkraftsystem eingegangen. Zuletzt wird das in der Simulation verwendete Framework 2Simulate vorgestellt.

3.1. AVES

Das 2013 in Braunschweig eröffnete Flugsimulationszentrum AVES stellt einen zentralen Bestandteil der Forschung im DLR zu den komplexen dynamischen Wechselwirkungen zwischen Piloten und Luftfahrzeugen dar. Während das DLR schon seit Jahrzehnten zuvor über vielseitige Simulationsmöglichkeiten am Boden verfügte, boten diese nicht die gewünschte Simulationsgüte. Soft- und Hardwaretests vor Flugtests mit den Forschungsluftfahrzeugen des DLR waren bereits möglich. Doch um die dynamische Kopplung zwischen Luftfahrzeugen und Piloten untersuchen zu können, wurde 2008 entschieden, das high-fidelity Flugsimulationszentrum AVES zu schaffen.[8]



(a) Bewegtsimulator



(b) feststehender Simulator



(c) FHS-Bodensimulator-Cockpit



(d) Airbus Helicopter EC135 FHS

Abbildung 3.1.: AVES [9] und FHS [10]

Das Forschungszenrum verfügt heute über zwei feststehende Simulatoren und einen Simulator auf einer elektropneumatischen Bewegungsplattform mit sechs Freiheitsgraden. So können Bewegungen von simulierten Luftfahrzeugen realitätsnah und präzise dargestellt werden.[11]

Die Cockpits der Simulatoren können binnen weniger Stunden getauscht werden, was eine flexible Darstellung verschiedener Luftfahrzeuge mit unterschiedlichen dynamischem Verhalten, Cockpitanzeigen und Vibrationen ermöglicht. Der modulare Aufbau des Simulationszentrums birgt einzigartige Möglichkeiten der Forschung.[9][8]

Bei Eröffnung des AVES waren die wichtigsten Luftfahrzeuge der Forschungsflotte des DLR der Airbus A320 ATRA und der Airbus Helicopter EC135 FHS, die als fliegende Simulatoren und Technologieträger verwendet werden. Aus diesem Grund sind die Cockpits beider als Simulatoren-Cockpits im Simulationszentrum verfügbar, sodass das Zentrum auch als Systemsimulator für die Vorbereitung von Flugtests und Special Mission Training dienen kann.[8]

Der FHS verfügt über eine spezielle Konfiguration der Steuerung. Es können beide Piloten in voller Verantwortung den Hubschrauber fliegen. Dabei sitzt vorne links der Sicherheitspilot und rechts der Versuchspilot. Im normalen Flugmodus steuern beide den Hubschrauber über ein nachgerüstetes Fly-by-Light System, das die Rotoren mittels intelligenter elektrohydraulischer Stellantriebe ansteuert. Beim Versuchspiloten kann jedoch zusätzlich ein Experimentalsystem zwischengeschaltet werden. Als Notsteuerung kann beim Sicherheitspiloten manuell oder automatisch auf eine mechanische Steuerung zurückgegriffen werden. Diese wird durch die direkte Verbindung der Steuer des Sicherheitspiloten über Kugelzüge mit den Steuerstangen der elektrohydraulischen Ventile realisiert. Der Bodensimulator des FHS verfügt über die gleiche Anordnung der Pilotensitze, Steuerung und Bediengeräte und besitzt ein Duplikat des Experimentalsystems.[4]

Ein Bild des Systemsimulator-Cockpits ist in Abbildung 3.1 zu erkennen.

3.2. Wittenstein Control Loading System (WCLS)

Das Unternehmen Wittenstein aerospace & simulation Inc. produziert unter Anderem Steuerkraftsysteme für Simulatoren. Das in dieser Arbeit behandelte Steuerkraftsystem, im Folgenden WCLS genannt, wurde im Jahr 2008 vom DLR für den alten FHS-Systemsimulator angeschafft.[12][13] Das Steuerkraftsystem besteht aus der System Power Supply (SPS), dem System Control Module (SCM) und vier elektrischen Aktoren für verschiedene Steuerachsen des alten FHS-Systemsimulators. Bei diesen Achsen handelt es sich um die Nick- und die Roll-Achse, den kollektiven Blattverstellungshebel sowie die Pedale. Für die Darstellung der Steuerkräfte an der Nick- und der Roll-Achse steht jeweils ein Aktor zur Verfügung. Die SPS des Systems versorgt die Aktoren mit Strom, während das SCM für die Ansteuerung verantwortlich ist. Es realisiert das gewünschte Verhalten des Steuerkraftsystems und führt die proprietäre Aktiv 8 Control Software aus. Die Kommunikation zwischen SCM und SPS erfolgt über einen CAN-Bus. Auch die Aktoren werden darüber vom SCM angesteuert. Das SCM kommuniziert mit einem externen Hostrechner über einen Standard Ethernet Port.[14] Eine beispielhafte Systemarchitektur eines Control Loading System (CLS) von Wittenstein ist in Abbildung 3.2 dargestellt. Funktionsfähig ist dabei bereits ein Aufbau bestehend aus SCM, SPS und Aktoren.

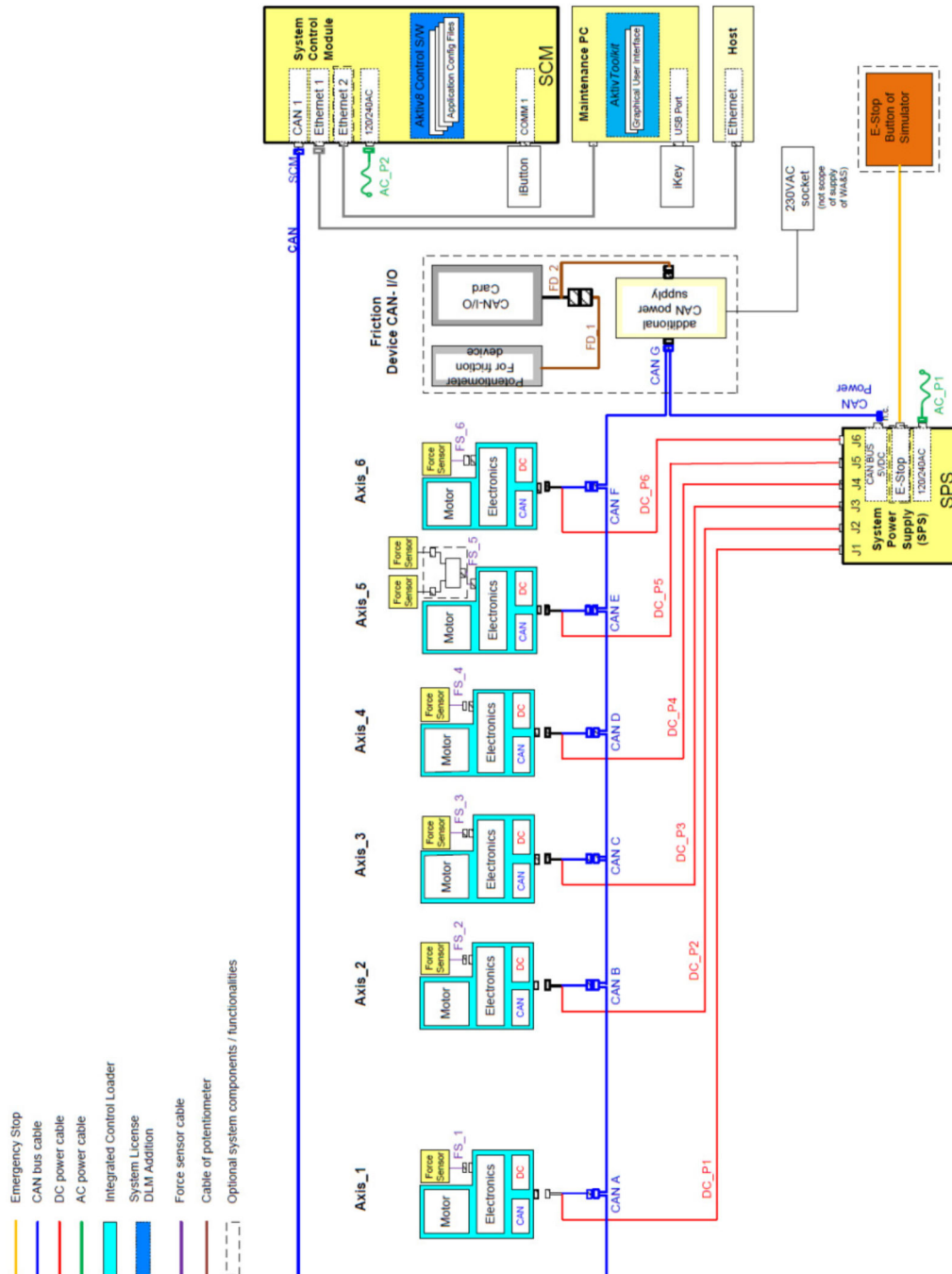


Abbildung 3.2.: Beispielhafter Aufbau eines CLS von WITTENSTEIN aerospace & simulation (aus [14])



Abbildung 3.3.: Markierter GRP an dem in dieser Arbeit verwendeten Steuerknüppel

Das WCLS kann laut Wittenstein eine Steuerkraft im Dauerlastfall von maximal $173,8\text{ N}$ ausüben. Außerdem ist eine kurzzeitige Spitzenlast von bis zu $282,91\text{ N}$ möglich. Die herrschenden Kräfte können vom System selbst mithilfe von Drehmomentsensoren in den Aktoren ermittelt werden.[12] Welche Kräfte tatsächlich in der schlussendlich gewählten Konfiguration am sogenannten Grip Reference Point (GRP) eines Steuerknüppels maximal ausgeübt werden können, hängt stark vom Hebelarm des Steuerknüppels ab. Es ist davon auszugehen, dass die im Abschlussbericht der Beschaffung des WCLS (siehe Quelle [12]) angegebenen maximalen Kräfte für die spezifische Konfiguration des alten FHS-Systemsimulators ermittelt wurden. Andernfalls wäre die Angabe nicht aussagekräftig und die Angabe eines maximalen Drehmoments eines Aktors sinnvoller.

Der definierte Angriffspunkt der Kräfte an einem Steuerknüppel, der GRP, liegt üblicherweise circa einen Zentimeter unter dem Kommunikations-Trigger an der Vorderseite des Griffes.[15] In Abbildung 3.3 ist er an dem in dieser Arbeit verwendeten Steuerknüppel markiert dargestellt.

Das WCLS ermöglicht auch die Anpassung der dynamischen Systemantwort über einen im SCM integrierten Model Following Controller (MFC). Es gibt verschiedene Möglichkeiten, auf die Kraft-Weg-Charakteristik des Systems Einfluss zu nehmen und diese präzise zu steuern. Auch Reibungswerte können vorgegeben werden um das Haft- und Gleitreibungsverhalten des Systems zu definieren. Zusätzlich ist auch das Einbinden einer Autopiloten-Funktionalität möglich.[14]

Die proprietäre Aktiv 8 Control Software verwendet einen MFC, um die Systemantwort des Steuerknüppels der Antwort eines gedämpften Feder-Masse-Schwingers folgen zu lassen. Dabei ist es für den Nutzer möglich, die Eigenfrequenz und das Dämpfungsverhältnis des Systems zweiter Ordnung direkt vorzugeben. Über die Vorgabe dieser Faktoren kann ein Nutzer die dynamische Systemantwort des Feder-Masse-Schwinger-Modells spezifizieren. Indirekt wird so auch die Systemantwort des geregelten CLS vorgegeben. Wie genau das CLS die vorgegebene Systemantwort abbilden kann, hängt von den dynamischen Fähigkeiten der restlichen Komponenten des Systems ab.[16]

Parameter wie das Dämpfungsverhältnis des MFC können auch mithilfe des Aktiv Toolkit vorgegeben werden. Beim Aktiv Toolkit handelt es sich um eine von Wittenstein angebotene Anwendung. Sie wird auf einem Host-PC, der per Ethernet mit dem SCM kommuniziert, ausgeführt. Die Software ermöglicht so die einfache Kontrolle, Steuerung und Konfiguration des WCLS. Je nach erworbener Zugangsstufe können auch Daten aufgezeichnet oder Test-Inputs an das CLS gesendet werden.[16]

3.3. Teststand für das WCLS

In einer vorherigen Projektarbeit wurde die grundsätzliche Funktionstüchtigkeit des WCLS überprüft und ein Teststand für die Evaluierung des Systems entworfen.

Ein erster minimal funktionsfähiger Aufbau wurde genutzt, um die Aktoren und andere Komponenten des Systems auf ihre grundlegenden Funktionen zu prüfen. Lediglich die vom System angezeigten Kräfte wichen von den realen Kräften ab. Dies liegt daran, dass das System die Kräfte anzeigt, wie sie am GRP angreifen würden. Das WCLS zeigt Kräfte an, obwohl die Aktoren eigentlich Momente erzeugen. Somit ist der verwendete Aufbau und dessen Hebelarm zwischen Angriffspunkt der Hand und Befestigung am Aktor entscheidend. Darauf basierend errechnet das CLS die korrekten GRP herrschenden Kräfte. Aus diesem Grund ist später noch eine Kalibrierung des Systems notwendig.[15]

Die Hardware des WCLS sollte für den Aufbau des Teststandes nicht modifiziert werden. Außerdem wurden bereits vorhandene Koppelstangen und ein Steuerknüppel aus dem alten FHS-Systemsimulator verwendet. Dadurch war die Anordnung der mechanischen Komponenten des gesamten Systems bereits vorgegeben. Um die Eignung des WCLS für die Verwendung in einem Tragschrauber-Simulator beurteilen zu können, ist es notwendig, einen Simulator-ähnlichen Prüf- oder Teststand zu schaffen. Die CAD-Software FreeCAD wurde daher verwendet, um die bestehende mechanische Konfiguration zu modellieren und eine stützende Konstruktion für diese zu entwerfen. Da es sich bei der Konstruktion um einen Teststand und nicht einen neuen Simulator handelt, wurde auf einen möglichst geringen Materialverbrauch und Fertigungsaufwand geachtet. Für solche Anwendungszwecke eignen sich Systemprofile besonders gut, da sie flexible Befestigungsmöglichkeiten bieten. Es standen Systemprofile aus Aluminium in verschiedenen Längen zur Verfügung. Diese Längen wurden als Basis-Maße der Konstruktion verwendet, um möglichst wenige Profile anpassen zu müssen. Für eine Überprüfung des haptischen Feedbacks des WCLS ist die Einbeziehung eines Sitzes in den Teststand unerlässlich. Dadurch treten jedoch große Gewichtskräfte auf. Aus diesem Grund mussten Systemprofile an den Ecken des Teststandes aufgeteilt werden. So stützen sich die horizontalen Segmente des Teststandes direkt auf den vertikalen Systemprofilen ab.

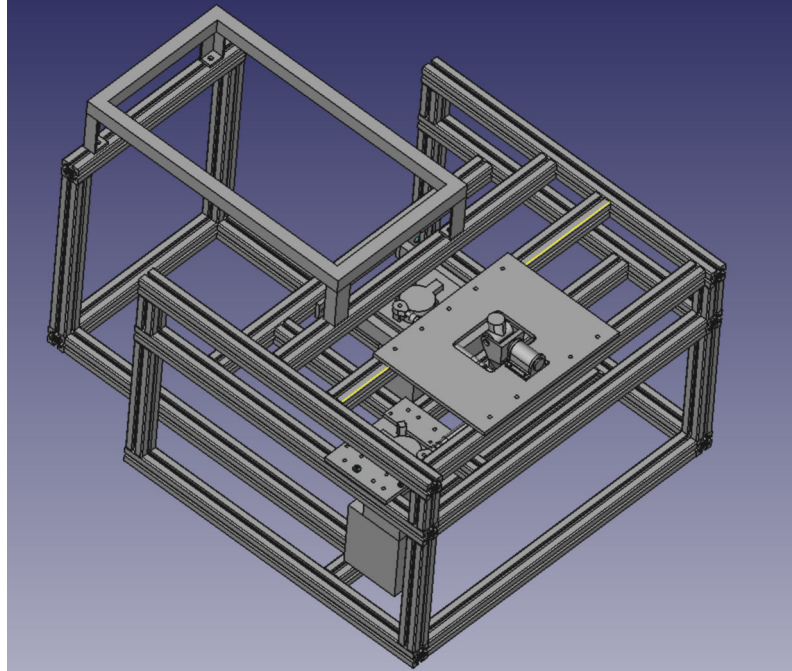


Abbildung 3.4.: CAD-Darstellung des Teststand-Designs

Da das WCLS und der Steuerknüppel zuvor in einem Simulator verwendet wurden, der nicht aus Systemprofilen konstruiert wurde, mussten neue Verschraubungspunkte innerhalb des Teststandes geschaffen werden. Es wurden zu diesem Zweck eigene Befestigungsplatten verschiedener Größe konstruiert und aus bestehenden Aluminium-Platten gefertigt. In Abbildung 3.4 ist eine CAD-Darstellung des fertigen Designs des Teststandes dargestellt. Der rechteckige Rahmen im oberen Bereich der Konstruktion, der nicht aus Systemprofilen besteht, stellt den unteren Teil des vorhandenen Sitz-Aufbaus dar.

Weitere Details zum Teststand sind in Quelle [17] zu finden, der Projektarbeit, die sich mit dem Entwurf des Teststandes beschäftigt.

3.4. Aktueller Stand des GyroTrain-Simulators

Das DLR besitzt einen kleinen und kostengünstigen Tragschraubersimulator. Dieser sogenannte GyroTrain-Simulator ist in Abbildung 3.5 zu sehen und wird in dem folgenden Abschnitt näher vorgestellt.

3.4.1. Aufbau des GyroTrain-Simulators und des dynamischen Tragschraubermodells

GyroTrain verfügt über einen LED-Fernseher als Sichtsystem und ein Touchpanel für die Darstellung und Aktivierung der Instrumente des simulierten Tragschraubers. Elemente des Simulators wie der Sitz, die Pedale, der Steuerknüppel und die Gas-/Bremsenheit sind Originalteile aus einem Tragschrauber.[7]

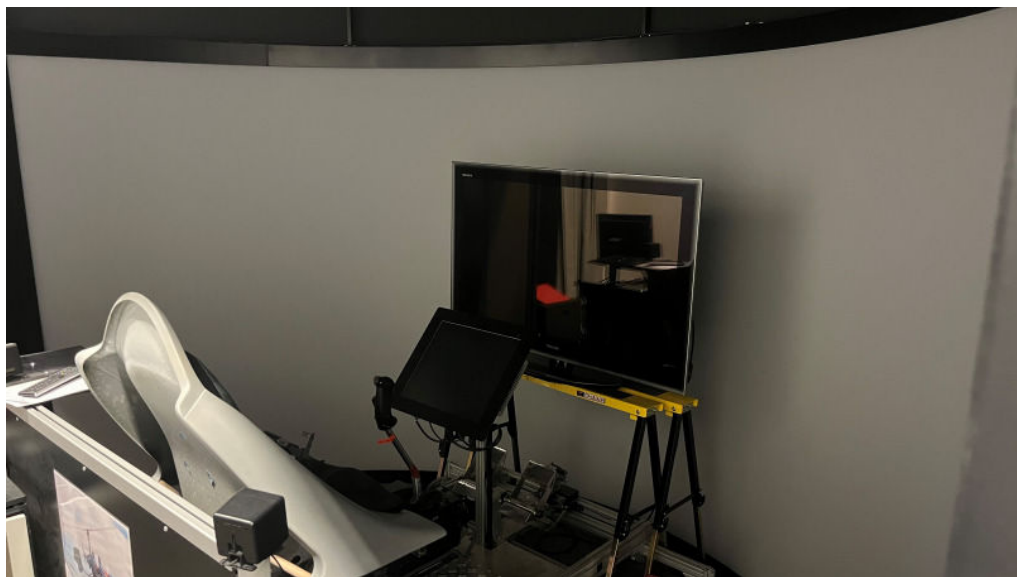


Abbildung 3.5.: Der aktuelle GyroTrain-Simulator

Außer dem Fernseher und dem Touchpanel stehen noch ein Soundsystem und ein Seatshaker zur Verfügung, um die Immersion von Nutzenden des Simulators zu steigern. Die Bewegung des am Pilotensitz angebrachten Seatshakers ist mit der simulierten Fluggeschwindigkeit gekoppelt und bildet außerdem die beim Landen entstehenden Fahrwerkskräfte ab.[7]

Mithilfe des Soundsystems können Geräusche, die üblicherweise während eines Fluges entstehen, dargestellt werden. Dabei werden generische Geräusche verwendet.[7]
Das Touchpanel stellt die Instrumente des simulierten Tragschraubers dar. Diese sind auch in Abbildung 3.13 abgebildet. Neben den Schaltflächen zur Beeinflussung des simulierten Tragschraubers wurden zusätzlich Schaltflächen zur Steuerung der Simulation hinzugefügt. So kann nicht nur beispielsweise die simulierte Treibstoffpumpe des Tragschraubers über Eingaben des Touchpanels bedient werden, sondern auch unter Anderem die gesamte Simulation pausiert oder neu gestartet werden.[7]

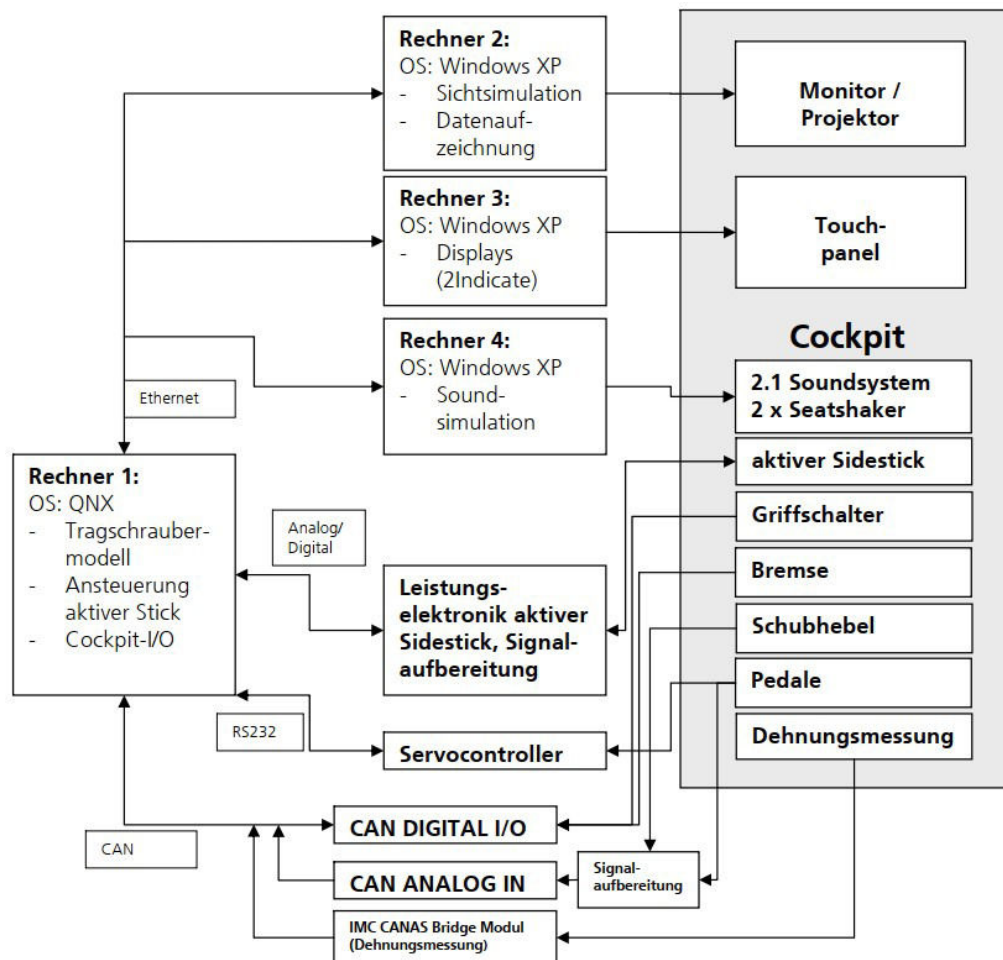


Abbildung 3.6.: Hardware-Struktur des GyroTrain-Simulators (aus [18])

Die Struktur des vorhandenen Simulators ist in Abbildung 3.6 schematisch dargestellt. Wie dort zu erkennen ist, werden verschiedene Aufgaben der Simulation auf verschiedene Rechner ausgelagert. Eine so aufgebaute Simulation wird auch verteilte Simulation genannt.[1] Außer den bisher vorgestellten Punkten ist einer der wichtigsten Aspekte der Simulation das auf dem Rechner Eins laufende Tragschraubermodell. Hierbei handelt es sich um ein in Matlab/Simulink aufgebautes

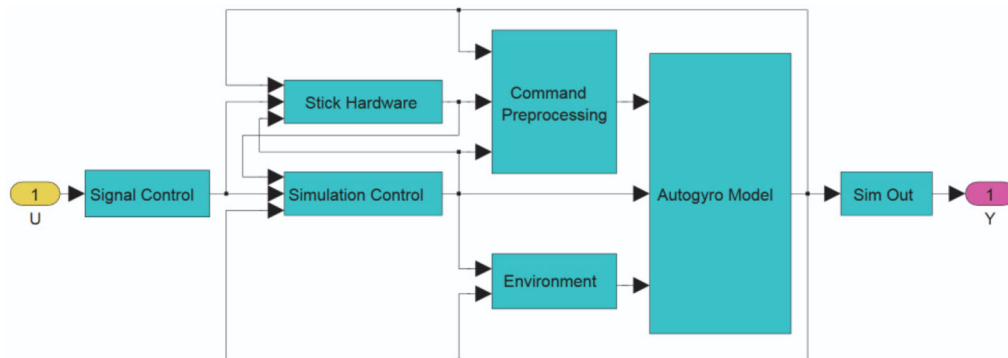


Abbildung 3.7.: Struktureller Aufbau der Simulinkmodelle (aus [19])

flugphysikalisches Modell des Tragschraubers vom Typ MTOsport.[19] Das Modell ist modular aufgebaut und betrachtet Rumpf und Rotor des Tragschraubers als zwei getrennte Körper, die über Drehgelenke miteinander gekoppelt sind. So wird auch die Aerodynamik für die zwei Körper getrennt betrachtet.[19] Dabei werden verschiedene Anströmungen von der Zelle und den Leitwerken berücksichtigt, ein spezifisches Triebwerksmodell verwendet, das Fahrwerk durch ein analytisches Modell umgesetzt und innerhalb der Berechnung der Umgebungsbedingungen ein Wind- und Turbulenzmodell verwendet.[19]

Die Module des Simulationsmodells sind detailliert aufgeschlüsselt und beinhalten „Simulationssteuerung, Umgebungsbedingungen, Fahrwerk, Triebwerk, Aerodynamik und Bewegungsgleichungen“[19]. Für verschiedene Anwendungen im DLR wurden verschiedene Versionen des Tragschraubermodells erstellt. Der allgemeine strukturelle Aufbau der Simulinkmodelle ist in Abbildung 3.7 dargestellt. Die flugphysikalischen Zusammenhänge des simulierten Tragschraubers werden im Block *Autogyro Model* modelliert. Dieser ist wiederum unterteilt in die Blöcke *Weight and Balance*, *Forces and Moments* und *Flight Dynamics*.[19]

Das Untersystem *Command Preprocessing* unterscheidet sich für die verschiedenen Simulinkmodelle, wobei dort in allen Modellen die „Steuereingaben entsprechend den im Simulationsmodell benötigten Eingaben umgewandelt“[19] werden. In dem in dieser Arbeit verwendeten Modell für die Echtzeitsimulation umfasst das Sticksteuerungs-Untersystem, was Teil des *Command Preprocessing*-Blocks ist, jedoch die gesamte Regelung des Steuerknüppels. Dieses *Stick Control* Untersystem stellt somit auch die Berechnung der Steuerkraft aus der Position des Steuerknüppels bereit. Außerdem werden auch Trimm- und Bremsdrücke ermittelt.[19] Für die Rollbewegung ist keine Trimmung vorhanden. Es wird jedoch eine zusätzliche Steuerkraft addiert, da bei der Vorrotation eines Tragschraubers große Querkräfte auftreten.[19] Die Simulinkmodelle wurden primär für das aktuelle Steuerkraftsystem des GyroTrain-Simulators, den Elektro-magnetischen Sidestick (MAGSI), erstellt. Jedoch wurden parallel auch Limitierungen eines anderen Steuerkraftsystems der Firma Simtec beachtet. Dieses Steuerkraftsystem verwendet die berechneten Steuerkräfte direkt. Um eine Überlastung des CLS zu verhindern, wurden die Steuerkräfte auf $\pm 100\text{ N}$ und die Rate dieser auf $\pm 300\text{ N/s}$ innerhalb des Modells begrenzt.[19]

Soll, wie es aktuell der Fall ist, jedoch der MAGSI verwendet werden, sind einige weitere Verarbeitungsschritte innerhalb des Simulinkmodells nötig. Im folgenden Abschnitt wird der MAGSI etwas näher vorgestellt.

3.4.2. Elektro-magnetischer Sidestick (MAGSI)

Beim MAGSI handelt es sich um ein elektromagnetisches Steuerkraftsystem. Es wird, wie in Abbildung 3.8 zu erkennen ist, im GyroTrain-Simulator des DLR verwendet. Die erzeugten Steuerkräfte am Steuerknüppel resultieren aus einem in der Basis des CLS verursachten Drehmoment. Dieses Drehmoment entsteht durch überlagerte Magnetfelder. Deren Stärke und Richtung basiert auf der in das System eingebrachten Stromstärke und -Richtung. Somit gibt die Stromrichtung die Richtung der wirkenden Steuerkraft vor.[19] Der MAGSI besitzt keine Sensoren für die Messung der Steuerkräfte. Aus diesem Grund wird im Simulinkmodell die erbrachte Kraft anhand der der Auslenkung des Steuerknüppels des MAGSI ermittelt. Um dem MAGSI die im Modell berechnete Steuerkraft vorgeben zu können, wird aus dieser mithilfe



Abbildung 3.8.: Das Steuerkraftsystem MAGSI im GyroTrain-Simulator

eines Kennfeldes ein Strom berechnet. Dieser Strom wird, um eine Überlastung des MAGSI zu vermeiden, auf 12 A begrenzt und, im Fall einer laufenden Simulation, an das MAGSI weitergeleitet.[19]

3.5. 2Simulate

2Simulate ist ein im DLR entwickeltes Simulations-Framework. Es wurde in der Sprache C++ verfasst und bietet die Steuerung und die deterministische Planung verschiedener Echtzeitaufgaben.[20] Kontrollaufgaben, die Unterhaltung diverser Datenverbindungen zu externen Geräten sowie die Steuerung und Verwaltung von

dynamischen Simulationsmodellen sind zentrale Aufgaben, die durch das Framework ermöglicht werden. So können mithilfe von 2Simulate kleine Desktopanwendungen bis hin zu komplexen Flugsimulatoren realisiert werden.[21]

Ein grundlegendes Prinzip der Softwarearchitektur von 2Simulate ist die Bereitstellung von wiederverwendbaren, flexiblen, standardisierten und validierten Software-Modulen.

Im AVES werden diese Module genutzt, um eine verteilte Architektur der Simulationen zu realisieren. So können einzelne Module auf eigenen Rechnern oder gemeinsam mit anderen Modulen auf der gleichen Hardware ausgeführt werden. Für kritische Prozesse werden dabei Rechner mit Echtzeitbetriebssystemen verwendet. Software-Module, die keine harten Echtzeitbedingungen erfordern, können auch auf herkömmlichen Betriebssystemen ausgeführt werden.[20]

Die 2Simulate-Simulationsumgebung besteht aus den drei Teilen 2Simulate Control Center (2SimCC), 2Simulate Realtime Framework (2SimRT) und 2Simulate Model Control (2SimMC). Diese Bestandteile sind in Abbildung 3.9 dargestellt und werden im Folgenden kurz erläutert.

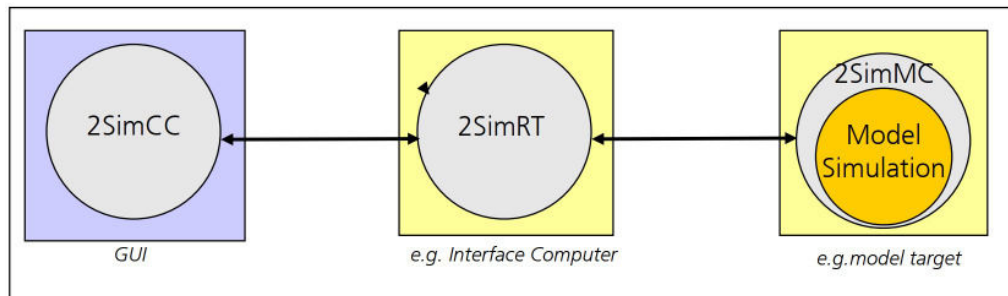


Abbildung 3.9.: Darstellung einer einfachen Anwendung mit allen drei Bestandteilen von 2Simulate (aus [21])

3.5.1. 2Simulate Control Center (2SimCC)

Das 2SimCC stellt eine grafische Benutzeroberfläche für die Targets in einer verteilten 2Simulate-Simulationsumgebung bereit. Es ermöglicht es Anwendern, Einstellungen bezüglich der Benutzerprofile, Projekte und Targets vorzunehmen und zu speichern.

Die Echtzeit-Target-Systeme der Simulation werden durch 2SimCC gesteuert und verwaltet. Dabei kann die Benutzeroberfläche über eine Executable-Datei gestartet oder zuvor mithilfe der Bibliothek *2SimCC.lib* auf spezifische Anwendungen angepasst und erweitert werden. Außerdem unterhält 2SimCC Datenverbindungen zu verbundenen Targets und erstellt auf Basis dieser beim Start der Anwendung eine Liste aller verfügbaren Datensignale. So können einzelne Signale von Anwendern während der Simulation betrachtet, analysiert und auch im Verlauf über der Zeit aufgezeichnet werden.[21] Das Startmenü der Benutzeroberfläche der Tragschrauber-Simulation im GyroTrain-Simulator ist in Abbildung 3.10 dargestellt. In dieser kann die Simulation gestartet, pausiert und zurückgesetzt werden.

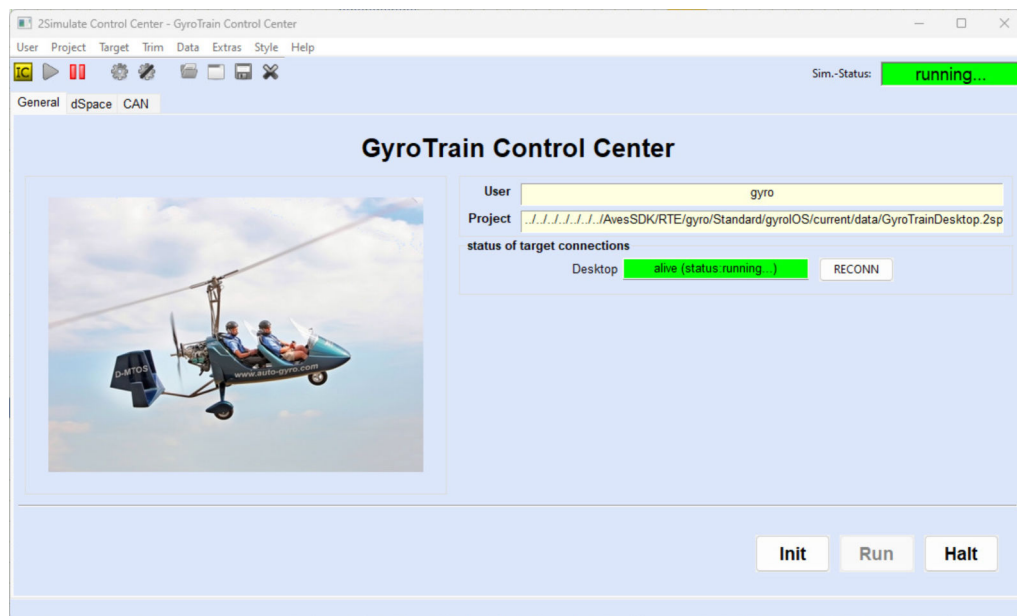


Abbildung 3.10.: 2SimCC-Startmenü aus dem GyroTrain-Simulator

3.5.2. 2Simulate Realtime Framework (2SimRT)

Das 2SimRT ist das Kernsimulations-Framework von 2Simulate und für die Steuerung und die deterministische Planung der Echtzeitaufgaben zuständig. Eine auf 2SimRT basierende Simulations-Anwendung wird Target genannt und führt verschiedene

Echtzeitaufgaben aus. Dabei bietet 2SimRT Vorlagen für deterministisch planbare Echtzeitaufgaben sowie einen gemeinsamen Datenbereich.[20] Die bereitgestellten Vorlagen für Echtzeitaufgaben sind, wie in Abbildung 3.11 zu sehen ist, vielfältig und erben teilweise von anderen Echtzeitaufgaben. So bietet beispielsweise ein User Datagram Protocol (UDP)-Task einige Methoden, mit denen ein Anwender eine UDP-Kommunikation realisieren kann.[20] Außerdem können Nutzende diese bereitgestellten Task-Vorlagen nutzen, um eigene spezielle Tasks zu schaffen. So gibt es bereits, wie in Abbildung 3.11 zu erkennen ist, einen WCLS-Task, der vom UDP-Task erbt. Dieser implementiert ein spezifisches Protokoll für die Kommunikation mit Steuerkraftsystemen der Wittenstein GmbH. Implementierte Echtzeitaufgaben

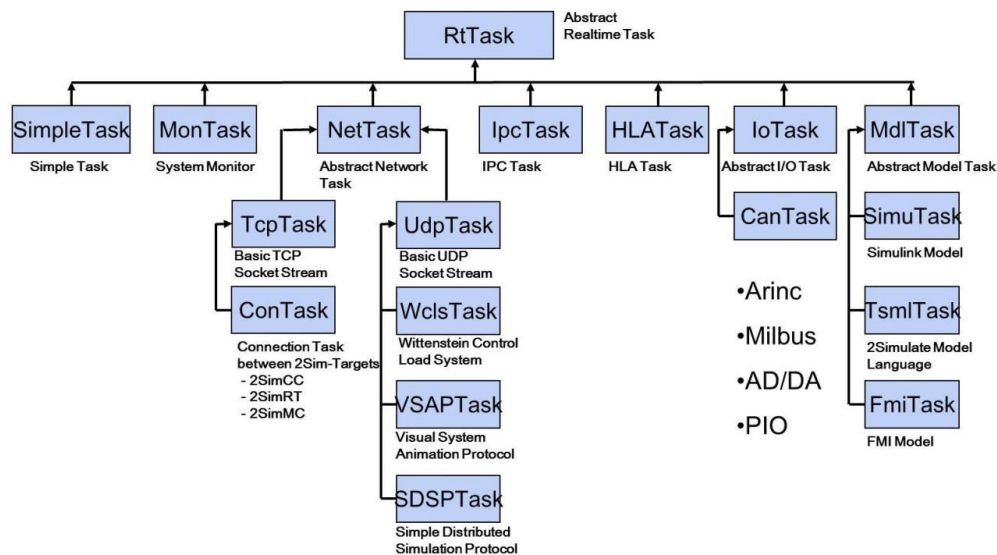


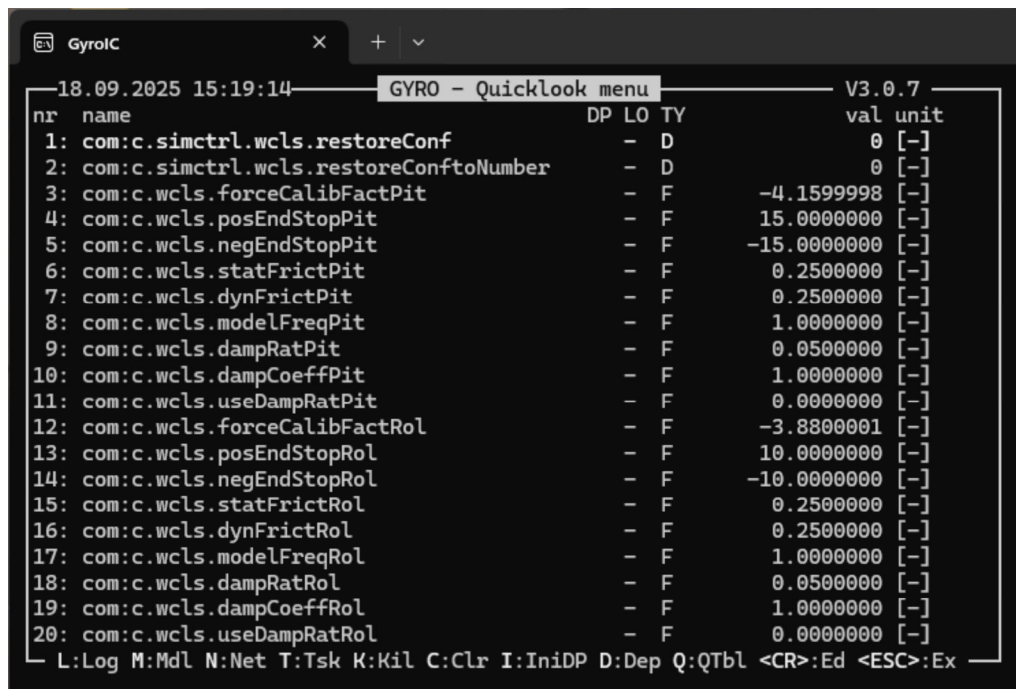
Abbildung 3.11.: Die von 2Simulate bereitgestellten Echtzeitaufgaben (aus [21])

können über sogenannte Callback-Routinen für die spezifischen Anwendungsfälle programmiert werden. Die Vorlagen der Aufgaben bieten dabei die Methoden, die für die Realisierung des Nutzer-spezifischen Verhaltens der jeweiligen Echtzeitaufgabe verwendet werden können.[20]

Die Echtzeitaufgaben eines Targets laufen parallel. Ihre Ausführung wird bestimmt durch ihre jeweilige Priorität und Frametime, welche beide für jede Echtzeitaufgabe in einer .xml-Datei definiert werden können.

Verschiedene Targets werden in einer hierarchischen Anordnung ausgeführt, wobei die 2SimCC Benutzeroberfläche das Target der obersten Ebene darstellt.[21]

Es ist möglich einen gemeinsamen Datenbereich zu erstellen, sodass verschiedene Echtzeitaufgaben in ihren Callback-Routinen Zugriff auf globale Daten haben können. Dafür müssen globale Datensignale in einer Skriptdatei des Typs .scd definiert werden. Diese Datei wird dann von dem Simulation Control Database Tool (SCD) verarbeitet, welches auf deren Basis C++-Dateien in einem für den gemeinsamen Datenbereich standardisierten Format erstellt.[21] Detailliertere Informationen über das Erstellen von .scd-Dateien können der Quelle [21] auf den Seiten 64 bis 66 entnommen werden. Einer 2SimRT-Applikation kann ein System-Monitor hinzugefügt werden, der ein Hauptmenü und verschiedene Untermenüs mit spezifischen Informationen über die Applikation bereitstellt. So wird im Hauptmenü eine Liste der aller Echtzeitaufgaben der Applikation in Reihenfolge der Implementierung ausgegeben. Diese beinhaltet Informationen über die Kurzbezeichnung, die Beschreibung, den Status, die verstrichene Zeit und die Frametime jedes Tasks.[21]



nr	name	DP	LO	TY	val	unit
1:	com:c.simctrl.wcls.restoreConf	-	D		0	[-]
2:	com:c.simctrl.wcls.restoreConfToNumber	-	D		0	[-]
3:	com:c.wcls.forceCalibFactPit	-	F		-4.1599998	[-]
4:	com:c.wcls.posEndStopPit	-	F		15.0000000	[-]
5:	com:c.wcls.negEndStopPit	-	F		-15.0000000	[-]
6:	com:c.wcls.statFrictPit	-	F		0.2500000	[-]
7:	com:c.wcls.dynFrictPit	-	F		0.2500000	[-]
8:	com:c.wcls.modelFreqPit	-	F		1.0000000	[-]
9:	com:c.wcls.dampRatPit	-	F		0.0500000	[-]
10:	com:c.wcls.dampCoeffPit	-	F		1.0000000	[-]
11:	com:c.wcls.useDampRatPit	-	F		0.0000000	[-]
12:	com:c.wcls.forceCalibFactRol	-	F		-3.8800001	[-]
13:	com:c.wcls.posEndStopRol	-	F		10.0000000	[-]
14:	com:c.wcls.negEndStopRol	-	F		-10.0000000	[-]
15:	com:c.wcls.statFrictRol	-	F		0.2500000	[-]
16:	com:c.wcls.dynFrictRol	-	F		0.2500000	[-]
17:	com:c.wcls.modelFreqRol	-	F		1.0000000	[-]
18:	com:c.wcls.dampRatRol	-	F		0.0500000	[-]
19:	com:c.wcls.dampCoeffRol	-	F		1.0000000	[-]
20:	com:c.wcls.useDampRatRol	-	F		0.0000000	[-]

Abbildung 3.12.: Datensignale im Quicklook-Menü

Im Netzwerk-Menü werden detailliertere Informationen zu den Netzwerkverbindungen angegeben, die Teil der 2SimRT-Applikation sind. Unter anderem werden hier der Status, die IP-Adresse des Hosts und die verwendeten Ports jeder Netzwerkverbindung dargestellt.[21]

Das Quicklook-Menü des System-Monitors kann bis zu 20 Datensignale aus dem gemeinsamen Datenbereich anzeigen (siehe Abbildung 3.12). Außerdem können zuvor in den C++-Dateien der Applikation Signaltabellen für dieses Menü erstellt werden, die dann als aufrufbare Liste an Signalen im Quicklook-Menü für die Anzeige ausgewählt werden können. Werte dargestellter Signale können durch Nutzende in diesem Menü modifiziert werden.[21]

3.5.3. 2Simulate Model Control (2SimMC)

2SimMC stellt die Schnittstelle zur Einbindung von dynamischen Simulationsmodellen bereit. Solche dynamischen Modelle können zum Beispiel in Matlab/Simulink erstellt werden. Eine 2SimMC-Anwendung kann nicht unabhängig von einer 2SimRT-Applikation ausgeführt werden. Jedes 2SimRT-Target kann jedoch über 2SimMC beliebig viele dynamische Modelle gemeinsam simulieren.[20]

3.6. 2Indicate

2Indicate ist eine Grafiksoftware und ein Entwicklungstool für die Erstellung von Displays und Anzeigeinstrumenten, die im DLR entwickelt wurde. Im Kern ist 2Indicate eine objektorientierte Grafikbibliothek, die durch eine logisch aufgebaute Metasprache und die Verwendung von Bildern und Texturen die Darstellung von Instrumenten aus modernen Cockpits ermöglicht.[22]

Dabei müssen grafische Objekte nicht einzeln platziert werden, sondern können durch Algorithmen berechnet werden. Ein Beispiel hierfür ist die Darstellung von Skalen durch die Angabe eines Wertebereiches und des jeweiligen Start- und Endpunktes. Außerdem können die erstellten Instrumente über eine Ethernet-Verbindung mit UDP-Kommunikation mit dynamischen Daten versorgt werden. Eine 2Indicate-Anwendung

kann zusätzlich Daten an die Simulation senden.[22] So können mit 2Indicate erstellte Grafiken problemlos in die 2Simulate-Simulationsumgebung integriert und mit Daten zur Animation der Anzeigen versorgt werden.

Auch die Darstellung der Instrumente im Tragschrauber-Simulator GyroTrain wurde samt der bedienbaren Schaltflächen in 2Indicate realisiert. Die für diese Arbeit daraus direkt übernommenen Instrumente sind in Abbildung 3.13 dargestellt.



Abbildung 3.13.: Die Darstellung der Cockpitinstrumente im Tragschrauber-Simulator des DLR während eines simulierten Fluges

4. Methodik und Umsetzung

Im Folgenden wird die Ausarbeitung dieses Projektes beschrieben. Dabei wird zunächst die Anforderungsanalyse und die Planung des Projektes erarbeitet. Daraufhin werden die wichtigsten Arbeitsschritte und erarbeiteten Lösungen strukturiert dargestellt, um ein schlüssiges Gesamtbild über das Produkt dieser Arbeit zu liefern. Die Validierung und die Bewertung jenes Produktes werden in darauf folgenden Kapiteln behandelt.

4.1. Anforderungsanalyse und Projektplanung

Grundlage für das in dieser Arbeit behandelte Projekt ist die Aufgabenstellung sowie die in Kapitel 2 vorgestellte, zunächst erarbeitete Motivation. Darauf basierend wurde das Projekt geplant. Dafür ist im ersten Schritt ein Vorgehensmodell zu wählen. Da es sich bei dieser Arbeit um ein Entwicklungsprojekt mit einem auf ungefähr drei Monate begrenzten Zeitraum sowie einer einzigen ausführenden Person handelt, kann kein klassisches Vorgehensmodell vollständig implementiert werden. Aus diesen Gründen wurde sich bei der Entwicklung der Implementierung des WCLS in eine Echtzeitsimulation gleichzeitig an Prinzipien und Vorgehensmustern aus dem V-Modell XT und der agilen Entwicklung orientiert. Das V-Modell XT ist ein produktzentriertes Vorgehensmodell. Die Struktur und der Inhalt der Ergebnisse einer Entwicklung stehen im Mittelpunkt und werden inklusive ihrer Abhängigkeiten voneinander zu Beginn der Entwicklung festgelegt. Ein zentraler Vorteil dieses Vorgehensmodells ist die strukturierte Dokumentierung von Anforderungen und der direkte Bezug von Validierungs- und Prüfschritten auf diese Anforderungen. Weiterhin bietet es detaillierte Projektrollen und Tailoring-Möglichkeiten, die aufgrund des kleinen

Projekt-Umfangs in dieser Arbeit nicht verwendet werden.[23]

Abweichend vom V-Modell XT werden einige Prinzipien der agilen Softwareentwicklung angewendet. So wird eine einfache Implementierung priorisiert und Änderungen der Anforderungen im Verlauf des Projektes ermöglicht. Der Ansatz, dass die effizienteste und effektivste Methode für das Übermitteln von Informationen das „Gespräch von Angesicht zu Angesicht“ ist, wird für dieses Projekt übernommen.[24] So können Probleme und Unklarheiten in kurzer Zeit durch Rücksprachen mit Experten und leitenden Personen gelöst werden. Außerdem wird der Fokus auf die schnelle Entwicklung eines funktionsfähigen Produktes übernommen, um dem kleinen zeitlichen Rahmen dieses Projekts gerecht zu werden. Dabei ist die Perfektion ein weniger wichtiges Fortschrittsmaß als ein funktionierendes Produkt.[24] Durch regelmäßige Reflektion mit Stakeholdern der Arbeit wird sichergestellt, dass Ziele rechtzeitig erreicht werden.

Um die Voraussetzungen für eine erfolgreiche Behandlung der Aufgabenstellung (siehe Kapitel 1) ermitteln zu können, werden zunächst die Anforderungen an das Projekt identifiziert, beschrieben und strukturiert dokumentiert. Grundlage für das Sammeln der Anforderungen bilden die Aufgabenstellung dieser Arbeit sowie Messdaten aus einem Flug mit einem Tragschrauber vom Typ MTOsport des DLR. Diese Messdaten dienen hauptsächlich als Grundlage für technische Anforderungen, die beispielsweise Grenzwerte definieren. Hauptsächlich wurde die Kreativitätstechnik des Brainstormings sowie die Interviewtechnik für die Ermittlung der anderen Anforderungen verwendet. Dabei wurde bei der Befragung der Stakeholder des Projektes auf das üblicherweise formalisierte Verfahren des V-Modells XT verzichtet.[23]

Es wurde die Entscheidung getroffen, die Anforderungen in natürlicher Sprache zu dokumentieren. Dies ermöglicht eine einfache Dokumentierung der Anforderungen und ist für Außenstehende leicht verständlich. Einige Nachteile der natürlichsprachlichen Dokumentierung müssen jedoch beachtet werden.[25] Allgemein ist natürliche Sprache inhärent anfällig für Fehlinterpretationen. Verschiedene Menschen, die Anforderungen lesen und verfassen, besitzen verschiedenes Wissen, unterschiedliche Erfahrungen und verschiedene soziale Hintergründe. Aus diesen Gründen interpretieren sie die Anforderungen auf unterschiedliche Weise, was zu Missverständnissen führen kann.[25] Beim Verfassen von Anforderungen in natürlicher Sprache müssen

einige Aspekte besonders beachtet werden. Komplexe Prozesse können durch Nominalisierung in ein einziges Ereignis umgewandelt werden, was zu einem Verlust der Informationen für die präzise Beschreibung eines Prozesses führt. Nominalisierung muss nicht vollständig vermieden werden, doch es sollte darauf geachtet werden, dass der dem verwendeten Begriff zugrundeliegende Prozess ausreichend präzise definiert wurde.[25] Auch bei Prozessverben und Substantiven in Anforderungen sowie bei Bedingungen gibt es die Gefahr einer unvollständigen Spezifizierung, die zu Informationsverlust führen kann. Wenn Objekte in einer Anforderung gruppiert werden, muss außerdem darauf geachtet werden, dass das spezifizierte Verhalten tatsächlich auf alle Teile der Gruppe vollständig zutrifft.[25] Um alle diese potentiell negativen Effekte natürlicher Sprache auf Anforderungen zu reduzieren, können Anforderungsvorlagen verwendet werden. Vorlagen können die verfassende Person der Anforderungen dabei unterstützen, syntaktische Eindeutigkeit der Anforderungen zu erreichen.[25] Zu Beginn der Formulierung einer Anforderung sollte die rechtliche Verbindlichkeit dieser untersucht und mithilfe von Modalverben festgelegt werden.[25] Dies wurde auch bei der Formulierung der Anforderungen an diese Arbeit beachtet, obwohl streng genommen keine rechtlichen Verbindlichkeiten im Kontext eines Vertrags bestehen. Als Vorlage für die Struktur der Anforderungen wurde sich an die in Abbildung 4.1 dargestellte Satzschablone gehalten.

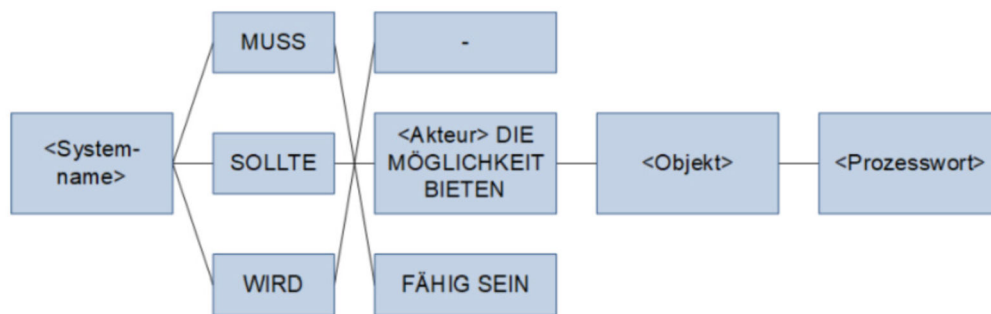


Abbildung 4.1.: Eine Satzschablone für die Formulierung von Anforderungen (aus [26])

Eine weitere wichtige Eigenschaft einer Anforderung ist, ob es sich um eine funktionale oder eine nicht-funktionale Anforderung handelt. Funktionale Anforderun-

gen spezifizieren Fähigkeiten des Systems, die Anwender für die Lösung fachlicher Probleme erwartet. Nicht-funktionale Anforderungen hingegen sind nicht-fachliche Anforderungen, die grundlegende Eigenschaften des Systems darstellen. Typische nicht-funktionale Anforderungen sind beispielsweise Anforderungen an die Performance oder die Benutzbarkeit eines Systems.[23] Diese Unterscheidung der Anforderungen wurde für dieses Projekt nicht in der Formulierung der Anforderungen, sondern durch eine Zuordnung in der Tabelle der Anforderungen vorgenommen (siehe A).

Aufgrund des geringen Umfangs des Projektes wird auf ein vollständiges Pflichtenheft als Ausgangsdokument zur Erstellung des Produkts verzichtet.[23] Stattdessen werden die Anforderungen tabellarisch dokumentiert. Die Tabelle mit allen Anforderungen an dieses Projekt ist in Anhang A zu finden. Auf der Grundlage dieser Tabelle wurden Aufgaben formuliert, die als Arbeitsschritte zum Erfüllen der Anforderungen dienen. Aufgaben und Anforderungen wird außerdem eine Priorität basierend darauf zugeschrieben, wie wichtig sie für ein minimal funktionsfähiges Produkt sind. Diese Prioritäten werden in der zeitlichen Planung des Projektes beachtet. Der Zeitplan des Projektes wird in einem eigens dafür erstellten Gantt-Chart realisiert. Ein Ausschnitt dieses Diagrammes ist in Abbildung 4.2 dargestellt.

Eine der wichtigsten Anforderungen an diese Arbeit ist die Definition der mindestens vom WCLS zu erbringende kurzzeitige Spitzenlast am GRP. Diese Anforderung wurde auf Basis der Analyse von den verfügbaren Messdaten aus einem Tragschrauber-Flug. Dabei konnten maximale Spitzenlasten von 150 N beobachtet werden. Diese Lasten traten spitzenförmig auf, wobei die gemessenen Steuerkräfte jeweils für eine Zeit von maximal 20 Sekunden einen Wert größer 20 N aufwiesen. Das WCLS soll also Lasten solcher Charakteristik abbilden können. Eine weitere wichtige Anforderung, der maximale durchschnittliche Fehler der Kraft von $1,5\text{ N}$, wurde aus dieser Anforderung abgeleitet. Diese maximale durchschnittliche Abweichung zwischen der aus dem Simulink-Modell vorgegebenen und der vom WCLS gemessenen Kraft ist definiert durch ein Prozent der mindestens darzustellenden Spitzenlast.

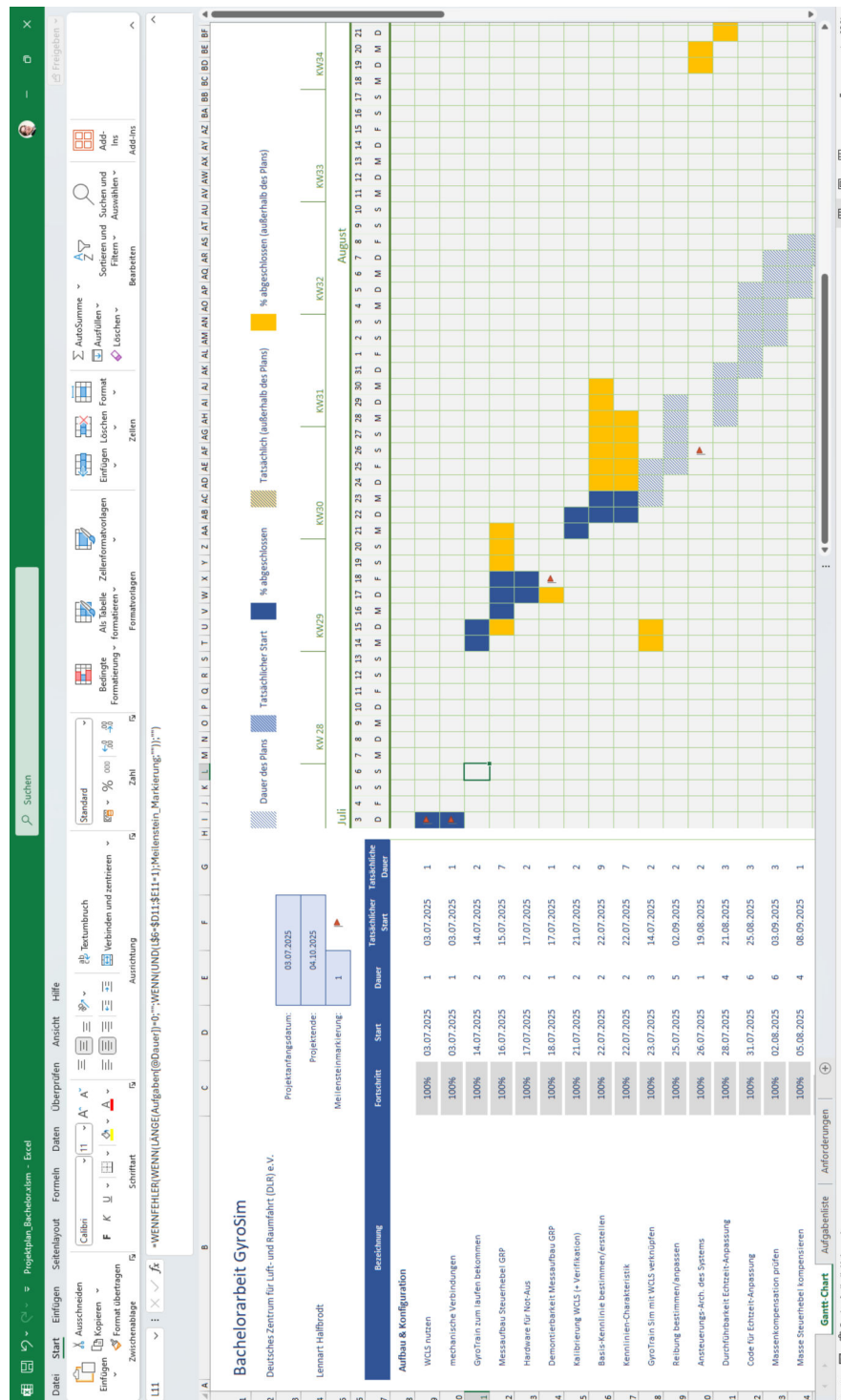


Abbildung 4.2.: Ausschnitt aus dem Projektplan

4.2. Messaufbau für Steuerkräfte

Das WCLS muss zu Beginn des Projektes kalibriert werden. Außerdem muss validiert werden, dass es eine Spitzenlast von 150 N am GRP des Steuerknüppels ausüben kann (siehe Anhang A). Es muss also die Möglichkeit geben, mindestens diese Spitzenlast kontrolliert am GRP aufzubringen. Im normalen Teststand ist eine solche Möglichkeit nicht gegeben, weshalb dieser um einen Messaufbau erweitert werden muss. Da ein solcher Aufbau jedoch bei Tests der später implementierten dynamischen Tragschrauber-Simulation stören kann, muss auf eine modulare Konstruktion des Messaufbaus geachtet werden.

Aufgrund des geringen zeitlichen Rahmens des Projektes ist außerdem von umfangreichen Sonderanfertigungen abzusehen. Daher wurde ein Messaufbau aus Aluminium-Systemprofilen geschaffen, der in Abbildung 4.3 dargestellt ist. Er besteht aus zwei Bögen. Einer der Bögen ist am vorderen Ende des Teststandes angebracht und kann besonders stark in Richtung der Nickachse des CLS belastet werden. Der andere Bogen dient dazu, Kräfte in Richtung der Rollachse des Systems aufbringen zu können. Diese Konstruktionsweise knüpft nahtlos an den grundlegenden Entwurf des Teststandes an und ermöglicht einen flexiblen Auf- und Abbau der Messvorrichtung, ohne den ursprünglichen Teststand zu verändern. Als Befestigungspunkt für die Ausübung einer aufnickenden Kraft an der Nickachse des CLS genügt der verwendete Sitz.

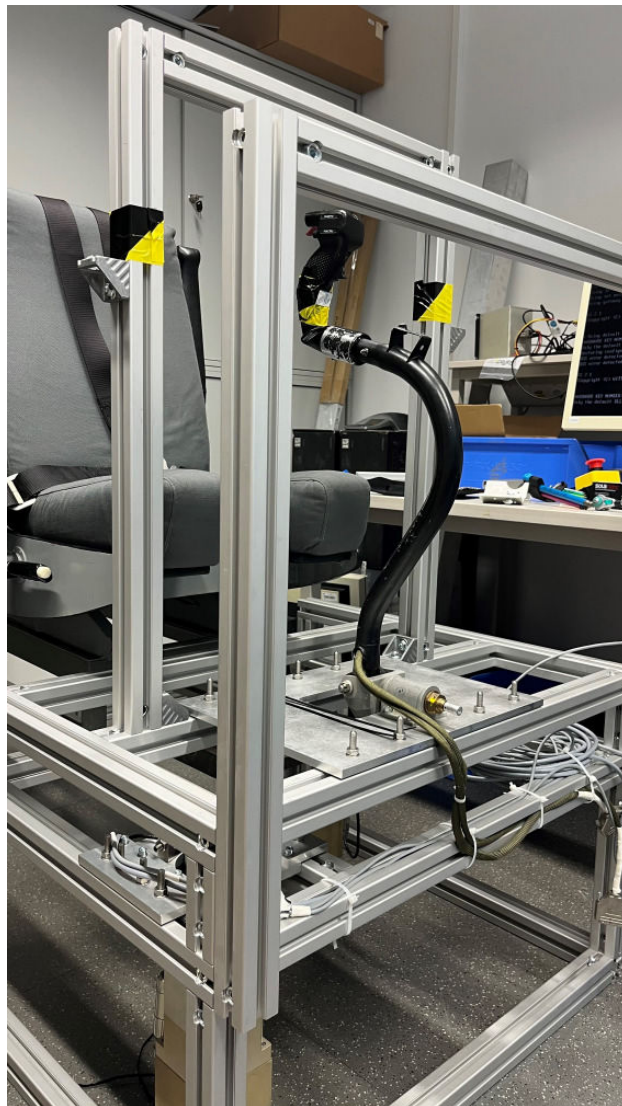


Abbildung 4.3.: Der um den Messaufbau erweiterte Teststand

4.3. Kalibrierung des WCLS

Da das verwendete WCLS die gemessene Auslenkung der Achsen in Grad anzeigt, müssen die Positionsdaten der Achsen nicht kalibriert oder validiert werden.[15] Auch während des Site Acceptance Tests nach der ursprünglichen Lieferung durch Wittenstein wurde lediglich der Fahrweg der Achsen verifiziert und nicht zusätzlich die vom System selbst gemessene Auslenkung der Achsen.[13] Somit müssen lediglich die im WCLS integrierten Kraftsensoren kalibriert werden.

Da das WCLS die Kräfte anzeigt, die am GRP des verwendeten Steuerknüppels angreifen sollen, müssen die Kraftsensoren des Systems für jeden neuen System-Aufbau kalibriert werden. Dabei wird zunächst im AktivToolkit die zu kalibrierende Konfiguration auf das SCM geladen.[15] Gegebenenfalls müssen daraufhin die Achsen des Systems traversieren und aktiv geschaltet werden. Die Achsen müssen, wenn das System eingeschaltet wird, traversieren, um ihre physisch maximal mögliche Auslenkung abzutasten. So gewinnt das CLS ein Erkenntnis über den möglichen Bewegungsraum der Aktoren. Außerdem wird während des Traversierens eine Kraft-Offset-Kalibrierung durchgeführt, weshalb die Steuerelemente währenddessen nicht berührt werden dürfen.[14]

Die Positionen der positiven und negativen Software-Endstops der zu kalibrierenden Achsen sollten notiert und dann auf Null eingestellt werden.[15] Nun können die jeweils an der Achse wirkenden Kräfte ohne eine Änderung der Auslenkung der Achse gemessen und variiert werden. Es muss nun eine Kraft von 50 Newton nacheinander in positiver und negativer Richtung jeder Achse aufgebracht werden. Die Kraft sollte dabei in einem rechten Winkel zum Radius des Steuerknüppels angreifen.[15] Im AktivToolkit werden die vom WCLS gemessenen Kräfte angezeigt. Weicht die vom WCLS angegebene Kraft von der extern gemessenen Kraft ab, muss der Force Calibration Faktor der Achse angepasst werden. Dieser wird variiert, bis die Differenz zwischen der angezeigten und der manuell gemessenen Kraft minimal ist.[15] Der so neu gewonnene Faktor muss notiert werden. Ist die Kalibrierung vollendet, so muss die Konfiguration erneut auf das SCM geladen werden. Daraufhin kann der alte Force Calibration Faktor durch den neu ermittelten Faktor ersetzt und die Konfiguration gespeichert werden.[15]



Abbildung 4.4.: Kalibrierungs-Messung einer Richtung der Rollachse

Für die Kalibrierung der Nick- und der Rollachse des um den Messaufbau erweiterten Teststandes wurde eine Hängewaage verwendet. Bei der genutzten Hängewaage handelt es sich um die Hängewaage Kern CH 50K50, welche eine Reproduzierbarkeit von 0,05kg vorweist. Der Wägebereich liegt bei maximal 50kg, was für den Zweck der Kalibrierung des WCLS vollkommen ausreicht.[27] Die Hängewaage ist außerdem gut geeignet, weil sie mithilfe des integrierten Hakens leicht an Systemprofilen befestigt werden kann (siehe Abbildung 4.4). Sie ist dafür vorgesehen, während einer Messung in der Hand gehalten zu werden. Da ein solches Vorgehen jedoch nicht eine konstante Kraft in einem konstanten Winkel zu dem Radius des Steuerknüppels produzieren kann, ist es für die Kalibrierung des WCLS ungeeignet. Daher wurde die Waage stattdessen mithilfe von Kabelbindern in dem Teststand eingespannt. Kabelbinder sind für diese Anwendung ausreichend gut geeignet, da sie stufenweise verstellt werden können. So kann die aufgebrachte Kraft in vergleichsweise kleinen Schritten erhöht und über einen längeren Zeitraum konstant gehalten werden. Die mögliche elastische und plastische Verformung der Kabelbinder unter Last ist jedoch eine zu beachtende Fehlerquelle. Auch das sogenannte Kriechen der von der Hängewaage gemessenen

Last ist eine Quelle für Ungenauigkeit. Es liegt bei der verwendeten Waage bei maximal 100 Gramm in 15 Minuten.[27] Weitere Fehlerquellen sind die weniger präzise Montage-Möglichkeiten der Waage und Ungenauigkeiten in der Messung des Winkels der Waage relativ zum Radius des Steuerknüppels. Für die Messung dieses Winkels wurde ein FISCO EN17 digitales Inklinometer verwendet, welches in Abbildung 4.5 zu sehen ist. Es weist eine Genauigkeit von $\pm 0,2$ Grad auf.[28] Da es sich in dieser Arbeit um einen Teststand und nicht die finale Konfiguration eines Flugsimulators handelt, werden die durch die genannten Fehlerquellen entstehenden Ungenauigkeiten jedoch als vernachlässigbar angesehen.

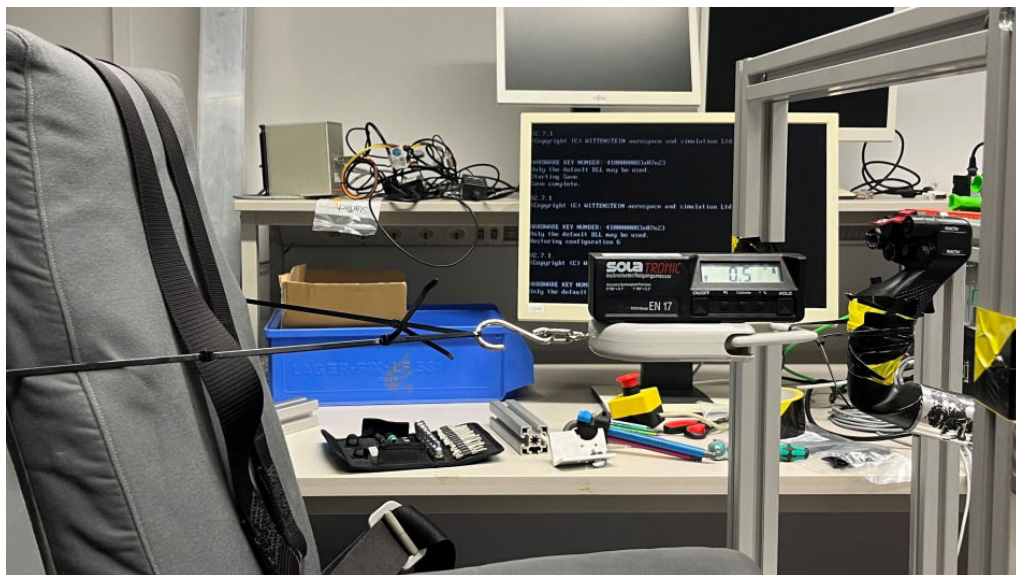


Abbildung 4.5.: Kalibrierungs-Messung einer Richtung der Nickachse

Um die Kräfte am GRP zu messen, wurde dieser am Steuerknüppel mit Hilfe eines Kabelbinders und etwas Klebeband optisch und haptisch markiert (siehe Abbildung 3.3). Das Klebeband dient auch dem Schutz des Steuerknüppels vor Beschädigung durch die verwendeten Kabelbinder.

Die verwendeten Kabelbinder sind in kleineren Schritten einstellbar als beispielsweise eine Ratsche eines Zurrgurtes. Jedoch sind die Schritte zu groß, um in jeder Messung exakt 50 Newton ausgeübte Kraft einstellen zu können. Da die Kalibrierung des WCLS

	Nick-Achse	Roll-Achse
alter Kraft-Faktor	-4,10	-4,00
gemessene Kraft positive Richtung	5,20 <i>kg</i>	5,55 <i>kg</i>
WCLS gemessene Kraft pos. Richtung	51,5 <i>N</i>	57,6 <i>N</i>
resultierender Kraft-Faktor	-4,18	-3,86
Abweichung des Messwinkels von 90°	0,5°	0,5°
gemessene Kraft negative Richtung	5,15 <i>kg</i>	5,20 <i>kg</i>
WCLS gemessene Kraft neg. Richtung	51,0 <i>N</i>	53,5 <i>N</i>
resultierender Kraft-Faktor	-4,14	-3,90
Abweichung des Messwinkels von 90°	0,9°	0,3°

Tabelle 4.1.: Gemessenen Daten aus der Kalibrierung der Achsen des WCLS

durch den Vergleich der manuell gemessenen Kraft mit der vom CLS gemessenen Kraft erfolgt, ist dieses Vorgehen dennoch hinreichend. In Tabelle 4.1 sind die gemessenen Daten aus der Kalibrierung beider Achsen aufgeführt, samt des jeweils aus der Messung resultierenden neuen Force Calibration Faktors. Da jede Achse nur über einen solchen Faktor verfügt, wurden in der verwendeten Konfiguration nach der Kalibrierung jeweils die Mittelwerte der zwei neu ermittelten Werte gewählt. Somit beträgt der neue Kraftkalibrierungsfaktor der Nick-Achse -4,16. Der Faktor der Rollachse erhält einen neuen Wert von -3,88.

4.4. Konfiguration des WCLS

Die Konfiguration des WCLS kann über einige Faktoren beeinflusst werden. So können beispielsweise die Eigenfrequenz und das Dämpfungsverhältnis des MFC direkt vorgegeben werden [16], wie in Kapitel 3.2 beschrieben wurde. Da das Steuerkraftsystem bereits in dem alten FHS-Simulator verwendet wurde, sind einige funktionsfähige Konfigurationen des Systems verfügbar.

Ausgangspunkt für die Konfiguration des WCLS für dieses Projekt waren Werte aus einer dieser alten Konfigurationen. Es wurde sich jedoch dazu entschieden, die Haft- und Gleitreibungsfaktoren des Systems auf Null zu setzen, damit bereits kleine vorgegebene Kräfte haptisch dargestellt werden können. Lediglich die physikalische Reibung der Komponenten des Systems verschlechtert so noch die Darstellung besonders kleiner Änderungen der Kräfte direkt.

Die ursprünglichen Werte für Eigenfrequenz und Dämpfungsverhältnis waren mit 1 Hz und $0,05$ recht niedrig gewählt. Da, wie in Kapitel 2 beschrieben, im Flug eines Tragschraubers eine Schwingung des Steuerknüppels mit einer Frequenz von 11 Hz bis 12 Hz auftritt, sollte die Eigenfrequenz des MFC wesentlich größer sein. Um passende Werte für Eigenfrequenz und Dämpfungsverhältnis zu ermitteln, wurden die Werte mithilfe des Aktiv Toolkits iterativ erhöht. Dabei ist aufgefallen, dass selbst bei einem Dämpfungsverhältnis, was sich Eins nähert, keine besonders großen Eigenfrequenzen vorgegeben werden konnten. In jedem getesteten Fall wurde das aktiv geregelte Steuerkraftsystem ab einer vorgegebenen Eigenfrequenz von circa $2,5\text{ Hz}$ offensichtlich instabil. Offensichtlich instabil bedeutet in diesem Fall, dass eine starke Schwingung des Steuerknüppels mit schnell ansteigender Amplitude ohne äußerer Anregung des Systems beobachtet werden konnte.

Aus diesem Grund wurde für beide Achsen des Systems eine Eigenfrequenz des MFC von 1 Hz gewählt. Um das Überspringen der Achsen nach Auslenkung zu reduzieren, wurden mittlere bis hohe Werte für das Dämpfungsverhältnis gewählt. Für die Nickachse wurde ein Faktor von $0,8$ und für die Rollachse ein Faktor von $0,5$ als Vorgabe für das jeweilige Dämpfungsverhältnis des MFC festgelegt.

4.5. Erweiterung des Teststandes

Um ermitteln zu können, ob das Verhalten des Steuerkraftsystems subjektiv den Erwartungen von Tragschrauber-Piloten und Pilotinnen gerecht wird, muss es im Kontext einer Echtzeit-Flugsimulation verwendet werden können (siehe Anforderungen im Anhang A). Dafür ist es wichtig, Instrumente des Tragschraubers und eine Außensicht darstellen zu können. Außerdem muss die Möglichkeit gegeben sein, den

Schub des simulierten Tragschraubers variieren zu können.

Da keine Möglichkeit besteht, den Teststand temporär in bestehende Teile der Simulationsinfrastruktur des AVES zu integrieren, muss er erweitert werden.

Um die Tragschrauber-Instrumentierung und eine Außensicht darstellen zu können, sind zwei herkömmliche Bildschirme ausreichend. Diese wurden, wie in Abbildung 4.6 zu sehen ist, übereinander angeordnet vor dem Steuerknüppel des Teststandes angebracht. Um die Halterung der Bildschirme installieren zu können, wurde der Teststand um eine einfache Konstruktion aus Aluminium-Systemprofilen erweitert. Dies erforderte keine Modifikation einzelner Systemprofile, da seit Projektbeginn auf die Verwendung von Standardmaßen geachtet wurde.



Abbildung 4.6.: Der um Bildschirme und einen Joystick erweiterte Teststand

Neben der SPS und dem SCM wurde ein Desktop-PC platziert. Dieser ist für die Darstellung der Außensicht und der Instrumente auf den zwei Bildschirmen des Test-

standes verantwortlich. Da die restliche Simulation nicht auf diesem PC ausgeführt wird, fungiert er als Target für die Außensicht- und die Display-Simulation. Die Außensicht wird durch eine Instanz des AvesViewers dargestellt. Für die Darstellung der Instrumente wird eine 2Indicate-Applikation ausgeführt. Außensicht und dargestellte Instrumente werden aus einer bestehenden Tragschrauber-Simulation übernommen. Da der Computer über Ethernet mit dem IC verbunden ist, können alle Applikationen die korrekten Daten senden und empfangen.

Ein HOTAS Joystick der Marke Thrustmaster, der Thrustmaster T.Flight Hotas X, wird verwendet, um den Schub des simulierten Tragschraubers zu variieren. Da es keine eigene 2Simulate-Anwendung dafür gibt, ein USB-Eingabegerät an einem Computer zu verwenden, der nicht der IC ist, ist der Joystick direkt an den IC angeschlossen. Der HOTAS wird in Reichweite potentieller Testpersonen platziert, sodass diese dessen Schubhebel unmittelbar erreichen können. Auch weitere Knöpfe des Joysticks können als Bedienelemente in der Simulation verwendet werden.

4.6. Die modifizierte GyroTrain-Simulation

Um prüfen zu können, ob das WCLS für die Verwendung in einem Tragschrauber-Simulator geeignet ist, soll es in eine solche Echtzeitsimulation integriert werden. Als Simulator fungiert dabei der in Kapitel 4.5 beschriebene erweiterte Teststand. Ein Großteil der benötigten Software kann zudem aus dem GyroTrain-Simulator übernommen werden (siehe Kapitel 3.4). Da die Simulations-Applikation auf 2SimRT basiert, kann die Verteilung der Software-Module der Simulation einfach an die Struktur des Teststandes angepasst werden. Eine schematische Übersicht über den so entstandenen Simulator ist in Abbildung 4.7 dargestellt.

Die Simulation der Instrumente, der IC und die Einbindung des dynamischen Tragschrauber-Simulationsmodells sowie das Modell selbst konnten vollständig aus dem GyroTrain-Simulator übernommen werden. Auch die simulierte Außensicht war bereits vorhanden. Der IC ist die zentrale, auf 2SimRT basierende, Echtzeitanwendung, die auch für das Management der Datenströme, die Verwaltung der Echtzeitaufgaben und die Bereitstellung eines gemeinsamen Datenbereiches verantwortlich ist.

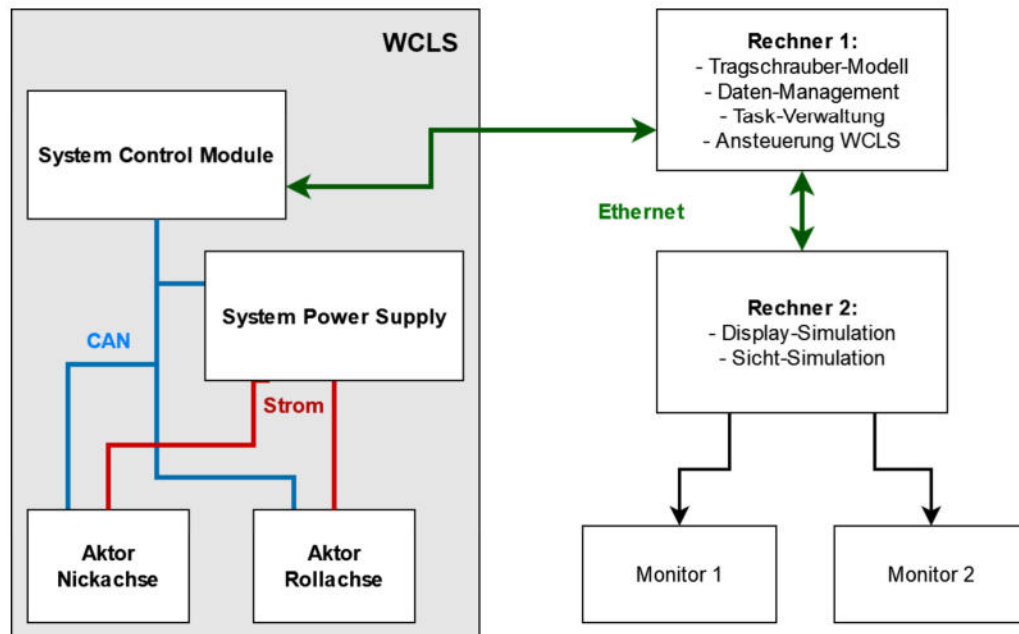


Abbildung 4.7.: Schematische Übersicht über den Teststand

Für dieses Projekt wurden jedoch einige neue globale Datensignale dem gemeinsamen Datenbereich hinzugefügt. Außerdem wurde die Ausführung der für die Anbindung des MAGSI verantwortlichen Echtzeitaufgabe abgewählt. Stattdessen wurde der IC um eine Echtzeitaufgabe für die Ansteuerung des WCLS erweitert. Die Einbindung des WCLS-Tasks in die Simulation wird in Quellcode 4.1 gezeigt.

Quellcode 4.1: createTasks.cpp: Einbindung des WCLS-Tasks

```

226 else if (pConfig->pm_strTaskType == "WCLS") {
227     if (pConfig->pm_vecNetInfo.size()) {
228         TSimWclsTaskGyro *pWcls = new TSimWclsTaskGyro(pRoot, pConfig->
            pm_strShortName, TASK_SCHED_RR, pConfig->pm_iPriority, pConfig->
            pm_fFrameTime*(float)iMSECToNSEC, true, true, true);
229         pWcls->setDesc(pConfig->pm_strDescMain);
230         pWcls->setHost(pConfig->pm_vecNetInfo[0].pm_strIPAddress.c_str(),
            pConfig->pm_vecNetInfo[0].pm_iPortRcv, pConfig->pm_vecNetInfo[0].
            pm_iPortSnd);
231         pWcls->setUserCtrl((int*)&com->c.simctrl.wcls.userCmd, (int*)&com->c.
            simctrl.wcls.state, (int*)&com->c.simctrl.wcls.axisState);
232         pWcls->setInitMode(WCLSTASK_INITMODE_SEQ); // sequential init. of axes
            !!
233         pWcls->addAxis((WCLSTASK_AXIS_DATA_RCV *)&com->i.r.wcls.PosPit,

```

```
(WCLSTASK_AXIS_DATA_SND *)&com->o.r.wcls.PosOffPit,  
WCLS_NUM_VAR_QUERY_MSG, com->c.wcls.dataCodesQuery, &com->c.  
wcls.posEndStopPit);  
234 pWcls->addAxis((WCLSTASK_AXIS_DATA_RCV *)&com->i.r.wcls.PosRol,  
(WCLSTASK_AXIS_DATA_SND *)&com->o.r.wcls.PosOffRol,  
WCLS_NUM_VAR_QUERY_MSG, com->c.wcls.dataCodesQuery, &com->c.  
wcls.posEndStopRol);  
235 pWcls->setPostInitCB((void*)(TSim *, TSimRtTask *)&  
dpWclsPostInit);  
236 pWcls->setPreProcCB((void*)(TSim *, TSimRtTask *)&dpWclsPre);  
237 pWcls->setPostProcCB((void*)(TSim *, TSimRtTask *)&dpWclsPost)  
;  
238 pWcls->setIntermediateProcCB((void*)(TSim *, TSimUdpTask *)&  
dpWclsIntermediate);  
239 }  
240 }
```

Dafür stand, wie in Kapitel 3.5.2 beschrieben, bereits die Vorlage des WCLS-Tasks in 2Simulate zur Verfügung. Die dort bereitgestellten Methoden implementieren das Wittenstein-Protokoll für die Kommunikation mit dem WCLS. Mithilfe dieser Methoden wurde in den Callback-Routinen des implementierten WCLS-Tasks das gewünschte Verhalten des WCLS programmiert. Diese Routinen werden in der laufenden Simulation nacheinander für jeden Frame des WCLS-Tasks ausgeführt. Ein solcher Frame ist in Abbildung 4.8 schematisch dargestellt. Bei der Entwicklung des Inhaltes der Callback-Routinen wurde sich an Konventionen des DLR gehalten. So werden in der Pre-Processing-Routine die Ausgabe-Datensignale des Tasks und in der Post-Processing-Routine die Eingabe-Datensignale des Tasks mit neuen Werten versorgt. Die Intermediate-Processing-Routine stellt eine Besonderheit des WCLS-Tasks dar. Einige Methoden des Tasks dürfen, wie in ihrer Definition festgehalten wird, nur in dieser Routine verwendet werden. So soll ein Fehlverhalten des WCLS verhindert werden.

Die Intermediate-Processing-Routine beinhaltet daher auch den Großteil des spezifisch implementierten Verhaltens des WCLS. Verschiedene Faktoren der Steuerung des WCLS, die mithilfe des Aktiv Toolkits verändert werden können, können auch per UDP-Kommunikation aus dem IC angepasst werden. Der WCLS-Task stellt dafür einige spezifische sowie eine anpassbare Methode bereit, um die Kommunikation zu erleichtern. Es ist jedoch nicht sinnvoll, alle die Methoden, die im Verlauf der

Simulation genutzt werden könnten, in jedem Frame aufzurufen. Stattdessen sollten sie nur dann verwendet werden, wenn dem System neue Werte vorgegeben werden sollen, um die Performance der Simulation nicht unnötig negativ zu beeinflussen. Zu diesem Zweck wurde eine WCLS-Controller-Klasse für dieses Projekt geschaffen. Sie stellt Memberfunktionen bereit, die die Update-Methoden des WCLS-Tasks aufrufen. Für jeden Faktor des Systems, der während der Simulation angepasst werden soll, ist eine eigene Funktion verfügbar. Diese können auf den gemeinsamen Datenbereich zugreifen, um aktuelle Werte für ihre Faktoren zu erhalten. Intern verfügen sie zusätzlich über statische Membervariablen, die für die Zwischenspeicherung alter Werte verwendet werden. Die Memberfunktionen werden für jeden Frame des WCLS-Tasks am Ende der Intermediate-Processing-Routine aufgerufen. Sie lösen jedoch die Update-Methoden des WCLS-Tasks nur aus, wenn der aus dem gemeinsamen Datenbereich abgerufene aktuell vorgegebene Wert von dem in der Membervariable zwischengespeicherten alten Wert abweicht. Alternativ kann jeder Memberfunktion beim Aufruf aus der Callback-Routine zusätzlich ein boolscher Parameter mit dem Wert *Wahr* übergeben werden. Ist das der Fall, wird ein Aufrufen der assoziierten Update-Methode des WCLS-Tasks für jeden Frame erzwungen. Der vollständige C++ - Code der programmierten Callback-Routinen ist in Anhang B aufgeführt.

Eine der wichtigsten Aspekte der Implementierung des WCLS ist die Modalität der Darstellung der geforderten Kräfte. Die dafür gewählte Lösung wird in dem folgenden Abschnitt erläutert.

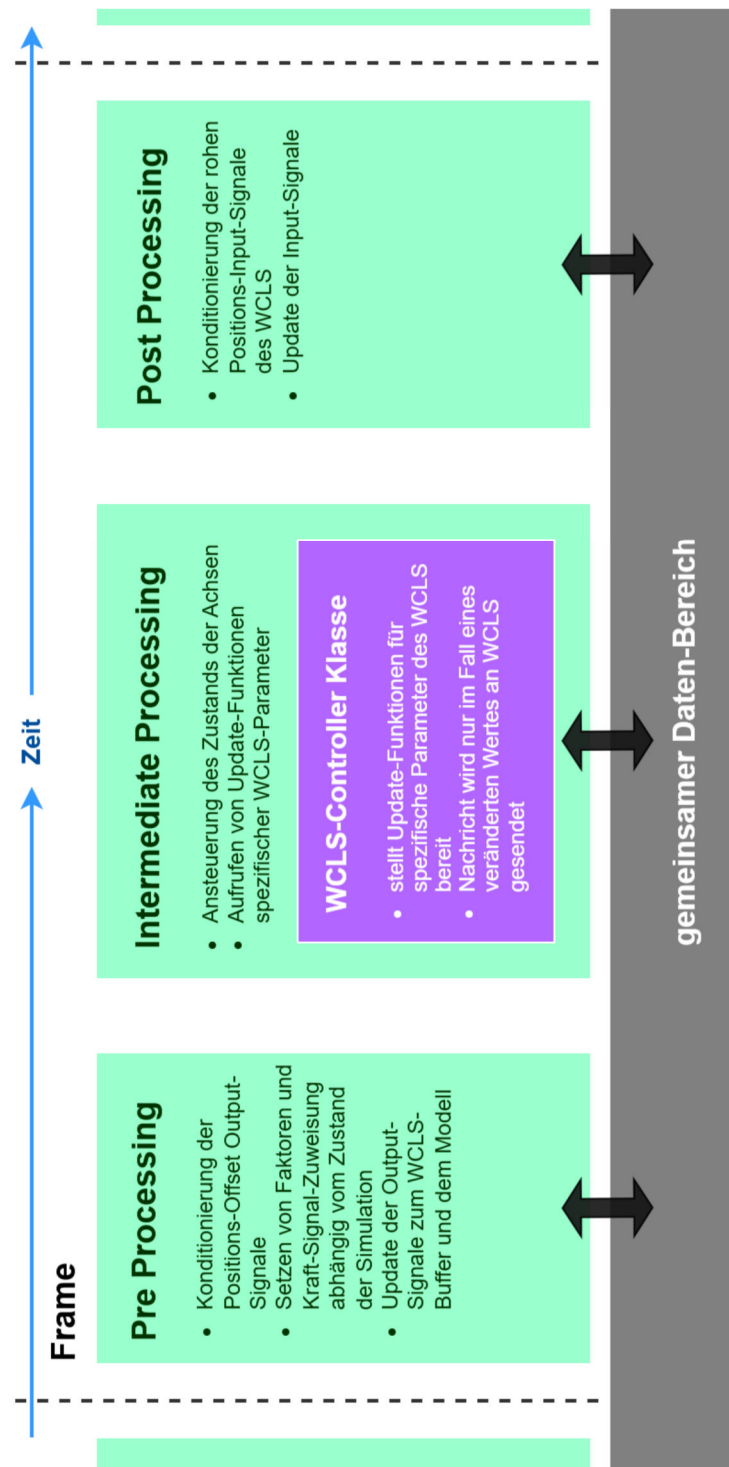


Abbildung 4.8.: ein Frame des WCLS-Tasks

4.7. Darstellung von Steuerkräften

Das WCLS bietet verschiedene Möglichkeiten, Steuerkräfte vorzugeben. Bei dem im GyroTrain-Simulator abgebildeten Tragschrauber des Typs MTOSport entstehen Steuerkräfte aufgrund der mechanischen Kopplung des Steuerknüppels mit dem Rotorkopf (siehe Kapitel 2). Diese Steuerkräfte werden in dem dynamischen Modell des Tragschraubers, wie in Kapitel 3.4 beschrieben, berechnet. Da dieses Modell für dieses Projekt übernommen und wie im GyroTrain-Simulator in die Simulation eingebunden wird, stehen die berechneten Steuerkräfte als Datensignale im gemeinsamen Datenbereich der Simulations-Applikation zur Verfügung. So muss lediglich eine Möglichkeit erarbeitet werden, diese dynamischen Kraft-Daten akkurat vom WCLS darstellen zu lassen.

Zunächst wird die standardmäßig verwendete Methode der Darstellung von Steuerkräften mit dem WCLS vorgestellt. Daraufhin wird argumentiert, warum diese Methodik für die Verwendung in der Tragschrauber-Simulation ungeeignet ist und ein alternativer, für diese Arbeit entwickelter Ansatz vorgestellt.

4.7.1. Kennlinien und QFeel-Faktor

Grundsätzlich wird die Darstellung von Steuerkräften im WCLS durch die Vorgabe einer Kraft-Weg-Kennlinie für jede Achse erreicht. Eine beispielhafte Kraft-Weg-Kennlinie ist in Abbildung 4.9 dargestellt. Dabei legt die Master-Kurve das grundlegende Verhalten des Systems fest. Sie kann durch zwei oder mehr Punkte definiert werden. Diese Punkte bestehen jeweils aus einem Wert für die Auslenkung und einem Wert für die dieser Auslenkung zugeordnete Kraft. Das SCM ermittelt auf der Grundlage der Kraft-Weg-Kennlinie und der Auslenkung der Achse die zu dem Zeitpunkt aufzubringende Kraft.[15] Mithilfe von Zusatzkurven (Addin-Curves) können zusätzliche besondere Rückmeldungen an Piloten wie beispielsweise Breakouts realisiert werden.[16] Diese, auch in [29] vorgestellte, Möglichkeit der Darstellung von Steuerkräften ist besonders für Steuerelemente geeignet, die aktive Steuerorgane in einem Simulator abbilden sollen. Bei der Anschaffung des WCLS für den alten

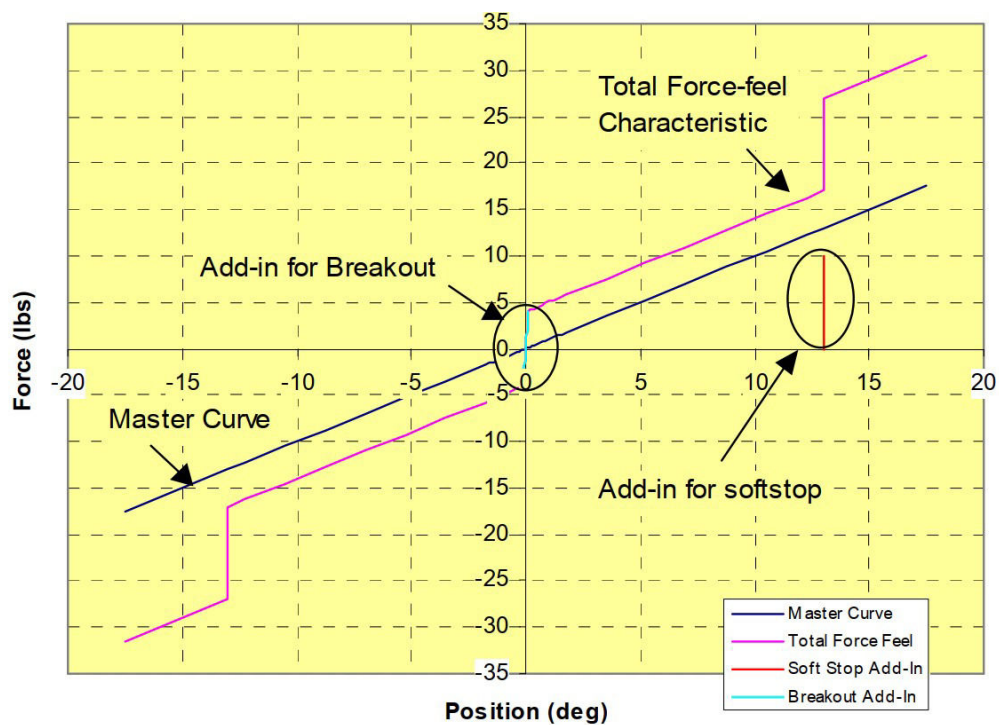


Abbildung 4.9.: Eine mögliche Kraft-Weg-Kennlinie, basierend auf einer einfachen Master-Kurve (aus [15])

FHS-Simulator war dieser Ansatz ausdrücklich erwünscht, da auch das vorherige Steuerkraftsystem eine als Kraft-Weg-Kennlinie darstellbare Steuerkraft-Charakteristik aufwies.[12]

Die Charakteristik der in dem in dieser Arbeit zu simulierenden Tragschrauber auftretenden Steuerkräfte unterscheidet sich jedoch stark von den vorher erwähnten Anwendungen. Wie in Kapitel 2 erläutert, hängen die Steuerkräfte von vielen verschiedenen Faktoren und dem aktuellen Flugzustand ab, da sie aus einer mechanischen Kopplung des Steuerknüppels mit dem Rotorkopf entstehen. Somit lässt sich keine einfache Kraft-Weg-Kennlinie für das Verhalten der Steuerkräfte definieren.

Über den sogenannten QFeel-Faktor des WCLS ist es jedoch möglich, die Steigung der Master-Kurve dynamisch anzupassen.[15] Es wäre also denkbar, eine simple Gerade als Master-Kurve mit einer Steigung von einem Newton pro Grad Auslenkung zu definieren. Dann könnte in der Simulations-Applikation auf Basis der aus dem Tragschrauber-Modell vorgegebenen Kräfte der QFeel-Faktor dynamisch angepasst

werden. Wäre eine Achse beispielsweise um 10 Grad ausgelenkt während das Modell eine Kraft von 20 N für diese Auslenkung vorgibt, müsste der QFeel-Faktor auf den Wert 2 gesetzt werden.

Dieser Ansatz ignoriert jedoch, dass bei einer Auslenkung der Achse von Null Grad trotzdem Kräfte größer Null vom Modell gefordert werden können. Diese wären durch eine bloße Anpassung der Steigung der Kraft-Weg-Kennlinie nicht darstellbar.

Es ist möglich, die Position des Trimpunktes einer WCLS-Achse dynamisch anzupassen. Dieser Punkt definiert die Auslenkung der Achse, an dem die zugehörige Steuerkraft Null Newton ergibt.[16] Das zentrale Problem des zuvor erarbeiteten Ansatzes könnte also dadurch gelöst werden, dass zusätzlich zum QFeel-Faktor auch der Trimpunkt jeder Achse dynamisch angepasst wird. Durch eine entsprechend programmierte Logik in der Simulations-Applikation wäre es auf diese Weise theoretisch möglich, die aus dem Tragschrauber-Modell vorgegebenen Steuerkräfte abzubilden. Dabei handelt es sich jedoch um eine sehr aufwändige und fehleranfällige Lösung. Außerdem ist unklar, ob der Trimpunkt schnell genug verändert werden kann. Die gleichzeitige Anpassung von zwei Faktoren pro Achse könnte zu einer zusätzlichen Latenz zwischen vorgegebener und vom WCLS dargestellter Steuerkraft führen.

Im folgenden Abschnitt wird der in dieser Arbeit verwendete und entwickelte, alternative Lösungsansatz vorgestellt. Dieser ist wesentlich simpler gestaltet als der soeben beschriebene Ansatz.

4.7.2. Direkte Vorgabe von Kräften

Das WCLS ermöglicht Anwendenden die Implementierung von Autopilot-Funktionalitäten im Steuerkraftsystem. Dafür wird unter anderem ein Kraft-Faktor bereitgestellt. Dieser Kraft-Faktor wird normalerweise vom Host-PC während der Simulation dynamisch gesetzt.[16] Er wird vom SCM auf die über die Kraft-Weg-Kennlinie erzeugte Kraft addiert.[30]

Somit steht ein Faktor zur Verfügung, mit dem eine von der Auslenkung der Achse unabhängige Steuerkraft aufgebracht werden kann. Wird eine Master-Kurve mit einer Steigung von Null Newton pro Grad Auslenkung vorgegeben, stellt das CLS darüber keine Steuerkräfte dar. In einem so konfigurierten System kann dennoch

eine Kraft über den Autopiloten-Kraft-Faktor vorgegeben werden. Da die über die Kraft-Weg-Kennlinie erzeugte Kraft gleich Null ist, stellt die Autopiloten-Kraft die gesamte wirkende Steuerkraft dar. Über diesen Umweg können dem WCLS also Steuerkräfte direkt vorgegeben werden.

Wie in Kapitel 3.4 beschrieben wurde, werden die geforderten Steuerkräfte im dynamischen Tragschrauber-Modell in Abhängigkeit von der Auslenkung des Steuerknüppels berechnet. Sie stehen im gemeinsamen Datenbereich der Simulations-Applikation zur Verfügung.

Werden dem Modell die Auslenkungen der Achsen des WCLS auf einen relativen Wert normiert übergeben, so betragen die vom Modell berechneten Steuerkräfte den Wert, der bei der jeweiligen Auslenkungen der Achsen von Piloten erwartet wird. Daher können die berechneten Steuerkräfte aus dem Modell über den Autopilot-Kraft-Faktor dem WCLS in der hier beschriebenen Konfiguration direkt übergeben werden. So können die dynamischen Steuerkräfte akkurat dargestellt werden, obwohl sie stark vom Flugzustand des Tragschraubers abhängen und nicht durch eine einfache Kennlinie abgebildet werden können.

4.8. Not-Abschaltung des CLS

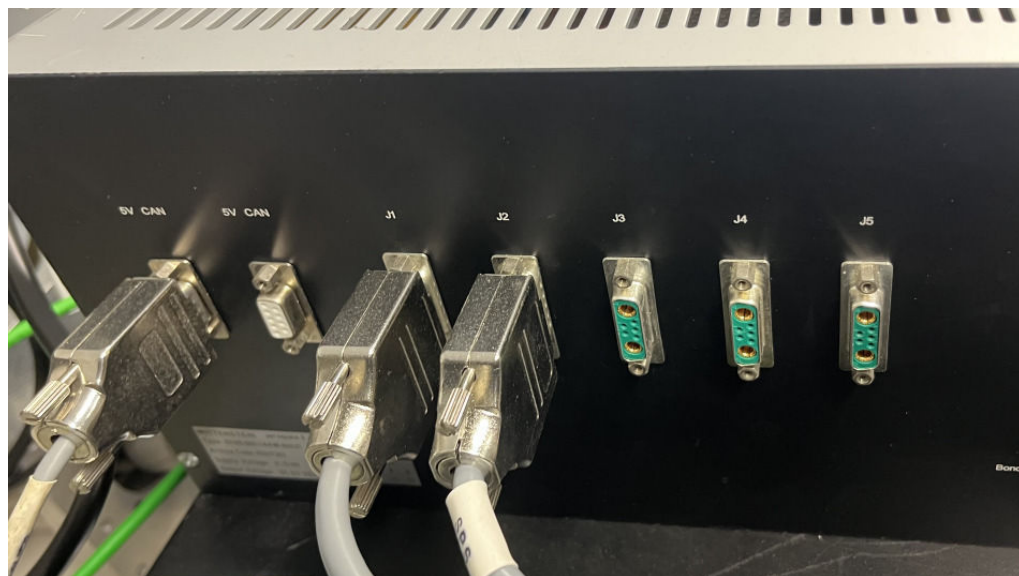
Das WCLS kann große Kräfte ausüben. Diese Kräfte können groß genug sein, um Verletzungen herbeizuführen. Aus diesem Grund ist die Sicherheit von Nutzenden eine Priorität in der Ausarbeitung der Einbindung des CLS in den Teststand. Im folgenden Abschnitt wird die wichtigste Sicherheitsmaßnahme, ein Not-Aus-Schalter für das System, vorgestellt.

Das WCLS soll die Steuerkräfte eines Tragschraubers im Flug möglichst realitätsnah abbilden. Daher ist das Verletzungsrisiko während des normalen Betriebs niedrig. Es könnte jedoch vorkommen, dass aus dem Modell vorgegebene Kräfte fehlerhaft sind oder falsch interpretiert werden. Weiterhin könnte durch eine Beschädigung der Hardware des WCLS das Steuerkraftsystem abnormales Verhalten aufweisen. Solche oder ähnliche mögliche Fehlerfälle bergen ein hohes Verletzungsrisiko für Piloten des Teststandes. Diese müssen daher in die Lage versetzt werden, selbst die Darstellung

von Steuerkräften durch das CLS unterbinden zu können. Dafür wäre es möglich, eine entsprechende Option in die Software des Simulators zu integrieren. Eine solche Lösung könnte die Verbindung zwischen dem Modell und dem WCLS unterbrechen. Zusätzlich könnte aktiv eine Kraft von null Newton als Vorgabe an das Steuerkraftsystem gesendet werden. So würde der erste beschriebene Fehlerfall abgedeckt werden können, jedoch nicht der Fehlerfall eines defekten Steuerkraftsystems selbst. Somit muss die Sicherheit von Piloten des Teststandes auf der Hardware-Ebene garantiert werden. Ein naheliegender Lösungsansatz dafür ist die Unterbrechung der Stromzufuhr an die Aktoren des Steuerkraftsystems.

Wittenstein bietet bei der Bestellung eines Steuerkraftsystems der hier verwendeten Baureihe die Möglichkeit, einen Not-Aus-Schalter in die SPS zu integrieren. Dafür wird ein Sicherheitsrelais des Typs EN945 Kat 4 in der SPS verbaut. Die Installation dieser Option ist daran zu erkennen, dass ein D-Sub Stecker für einen Not-Aus-Schalter an der Rückseite der SPS zu finden ist.[31]

Diese Ausstattungsoption ist bei dem verwendeten WCLS nicht verbaut. Ein Vergleich der Rückseiten der vorhandenen SPS und einer Power Supply mit Not-Aus-Schalter ist in Abbildung 4.10 dargestellt. Eine einfache alternative Möglichkeit für eine Not-Abschaltung ist, die SPS über eine Steckdosenleiste mit Sicherheitsschalter zu betreiben. Ist diese in Reichweite des Teststand-Sitzes platziert, so kann die Stromzufuhr der SPS mithilfe des Schalters von Testpersonen unterbrochen werden. Dies ist die zunächst verwendete Sicherheitsmaßnahme in dem Teststand des WCLS. Da der Sicherheitsschalter jedoch nicht sehr groß ist, könnte eine Testperson im Fehlerfall möglicherweise die Stromzufuhr nicht schnellstmöglich abschalten. Aus diesem Grund sind in industriellen Anwendungen Not-Aus-Schalter statt einfachen Sicherheitsschaltern verbaut. Eine Steckdosenleiste mit integriertem Not-Aus-Schalter wurde für den Teststand bestellt und wird, sobald möglich, statt der ursprünglichen Steckdosenleiste verwendet werden. Dadurch ist eine schnelle Abschaltung des Steuerkraftsystems durch Nutzer des Teststandes gewährleistet. Die besagte Steckdosenleiste ist in Abbildung 4.11 dargestellt.



(a) vorhandene SPS



(b) 5-Achsen SPS mit Not-Aus-Schalter (aus [31])

Abbildung 4.10.: Vergleich der Rückseiten zweier SPS



Abbildung 4.11.: Die Steckdosenleiste mit Not-Aus-Schalter

5. Ergebnisse

In diesem Kapitel wird die erarbeitete Implementierung und Konfiguration des Steuerkraftsystems evaluiert. Dabei werden technische Charakteristika des Systems anhand von Messdaten objektiv ermittelt. Einige der ermittelten Größen lassen sich aus den zu Beginn des Projektes formulierten Anforderungen ableiten. Zunächst findet jedoch eine qualitative Evaluierung der erarbeiteten Lösung statt. Dafür wurde gezielt Feedback von Experten eingeholt.

5.1. Subjektive Performance des Systems

Für die qualitative Evaluierung der Implementierung des WCLS wurde eine Testkampagne organisiert. Dabei wurden fünf Personen, die über Flugerfahrungen mit Tragschraubern verfügen, dazu eingeladen, den Teststand auszuprobieren. Jede Person, die an den Tests teilnahm, wurde darum gebeten, mindestens einen vollständigen simulierten Flug in dem Teststand durchzuführen. Mit einem vollständigen Flug ist gemeint, dass mit ausgeschaltetem Motor auf dem Boden gestartet wird, nach einem erfolgreichen Start eine improvisierte Platzrunde geflogen und der simulierte Tragschrauber anschließend gelandet wird. Für den Flug wurde keine Strecke vorgegeben. Stattdessen wurde den Probanden zuvor erklärt, dass sie sich auf das Verhalten des Steuerkraftsystems konzentrieren und dieses mit dem von ihnen erwarteten Verhalten vergleichen sollten. Zu diesem Zweck konnten sie frei wählen, welche Strecke und welche Manöver sie fliegen würden. Lediglich von extremen Fluglagen und Kunstflug sollte abgesehen werden. Während der Flüge wurde die Möglichkeit des 2SimCC genutzt, ausgewählte Datensignale der Simulation über der Zeit aufzuzeichnen. Bei den aufgezeichneten Signalen handelt es sich um die vom WCLS gemessenen Kräfte

und Auslenkungen der Achsen, die vom dynamischen Tragschrauber-Modell vorgegebenen Steuerkräfte sowie die barometrische Höhe des simulierten Tragschraubers. Diese zeitdiskreten Daten können dann für die Analyse einiger technischer Parameter der erarbeiteten Simulation verwendet werden.

Im Anschluss an die praktische Erprobung des Teststandes durch die Probanden wurden diese gebeten, einen Fragebogen auszufüllen. Dieser Fragebogen wurde spezifisch für diese Testkampagne entworfen und ist in Anhang C beigelegt.

Zu Beginn des Fragebogens werden Informationen über die fliegerischen Vorkenntnisse der Probanden erfasst. Mit den darauf folgenden acht Fragen werden die Teilnehmenden darum gebeten, einzelne Aspekte des Steuerkraftsystems zu bewerten. Bei sechs dieser Fragen beschränken sich die Antwortmöglichkeiten auf *sehr gut*, *gut*, *mittelmäßig* und *schlecht*. So ist es möglich die in diesen Fragen angesprochenen Aspekte direkt zu vergleichen. Es ist jedoch für alle Fragen, die sich mit der Bewertung des WCLS befassen, die Möglichkeit gegeben die jeweilige Bewertung schriftlich zu begründen. So können weitere Erkenntnisse gewonnen werden, die sonst nicht erfasst worden wären.

Zuletzt wird ermittelt, ob die Teilnehmenden das WCLS dem MAGSI gegenüber präferieren und welche konkreten Aspekte die Charakteristik der Steuerkräfte nach der Meinung der Teilnehmenden verbessern könnten. Die letzte Frage bietet die Möglichkeit, weitere Anmerkungen zu hinterlassen.

Die ausgefüllten Fragebögen aus der Testkampagne sind dieser Arbeit in Anhang D beigelegt. In Abbildung 5.1 sind die Beurteilungen der Teilnehmenden über sechs Charakteristika der Simulation in der Form eines Säulendiagramms anschaulich dargestellt. Hierbei wird deutlich, dass die Anzahl an Teilnehmenden zu gering ist, um definitive Aussagen formulieren zu können. Da es sich zusätzlich um subjektive Einschätzungen handelt und die Teilnehmenden über unterschiedlich umfangreiche und aktuelle Flugerfahrungen verfügen, können die ermittelten Antworten teilweise extrem voneinander abweichen.

Dennoch lassen sich einige Trends ableiten. So werden die Steuerkräfte während des Starts durchschnittlich schlechter als bei der Landung oder dem Geradeausflug bewertet. Die Intensität der Steuerkräfte über den gesamten Flug wird eher gut bewertet. Im Kurvenflug sind die Einschätzungen besonders breit gestreut. Außerdem

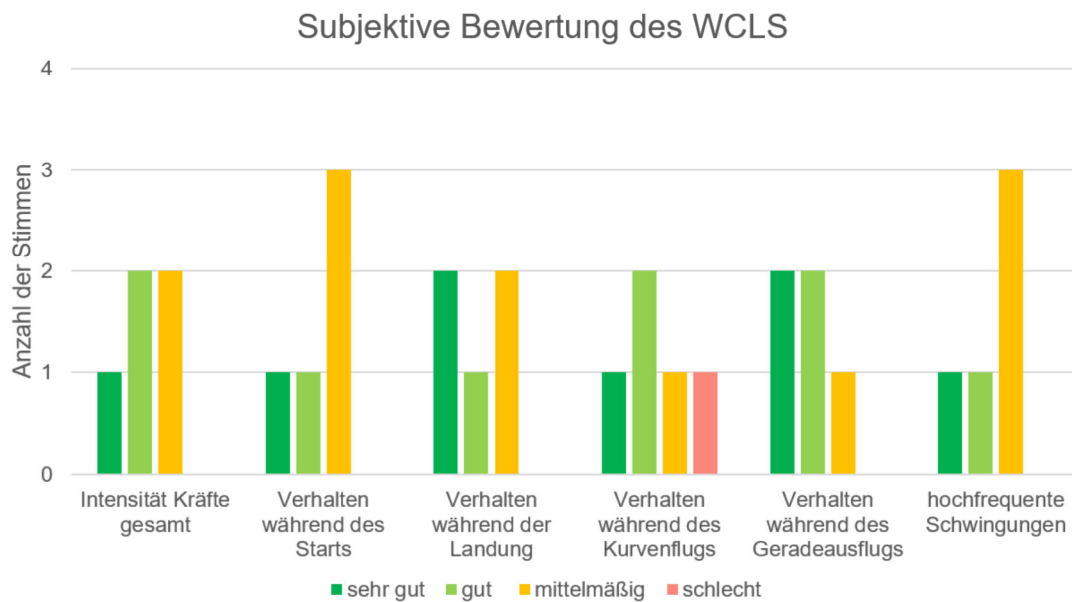


Abbildung 5.1.: Auswertung einiger Fragestellungen der Testkampagne

lässt sich behaupten, dass die hochfrequenten Schwingungen durchschnittlich als eher mittelmäßig dargestellt eingeschätzt werden. Allgemein wird die Intensität der Kräfte eher als etwas zu gering beschrieben, wobei eine teilnehmende Person diese eher allgemein als zu hoch bei größeren Steuerausschlägen einschätzte.

5.2. Darstellung großer Steuerkräfte

Die Validierung des Steuerkraftsystems hinsichtlich der maximal geforderten Kräfte erfolgte mithilfe des Testaufbaus für die Kalibrierung des WCLS, der in Abbildung 4.3 dargestellt ist. Dabei wurden, ähnlich wie bei der Kalibrierung, die Positionen der positiven und negativen Software-Endstops auf Null eingestellt. Außerdem wurden die gleichen Messmittel wie in Kapitel 4.3 beschrieben verwendet. Die Kraft wird mithilfe von Kabelbindern auf die Achse aufgebracht. Es wird angenommen, dass die Amplitude der maximal darstellbaren Kraft der Achsen des kalibrierten WCLS unabhängig von der Richtung dieser Kraft ist. Somit wurde pro Achse eine Messung durchgeführt. Bei diesen Messungen wird das System hinsichtlich der Anforderung

geprüft, dass es eine Spitzenlast von mindestens 150 N ausüben können muss (siehe Anhang A). Dabei wurde das 2SimCC verwendet, um die vom WCLS gemessene Kraft sowie die Auslenkung jeder Achse während der Messung aufzuzeichnen. Nach Beginn der Aufzeichnung wird die auf das WCLS ausgeübte Kraft durch das stufenweise Verstellen der Kabelbinder erhöht. Nachdem die geforderte Kraft erreicht wird, werden die Kabelbinder gekappt. So kann auch das Verhalten des Systems bei einem abrupten Abfall der Kraft beobachtet werden. Die aufgezeichneten zeitdiskreten Daten aus den Messungen wurden in Matlab dargestellt und analysiert. Sie sind in den Abbildungen 5.2 und 5.3 über der Zeit aufgezeichnet grafisch dargestellt.

In beiden Messungen ist bereits optisch zu erkennen, dass die maximal auftretenden

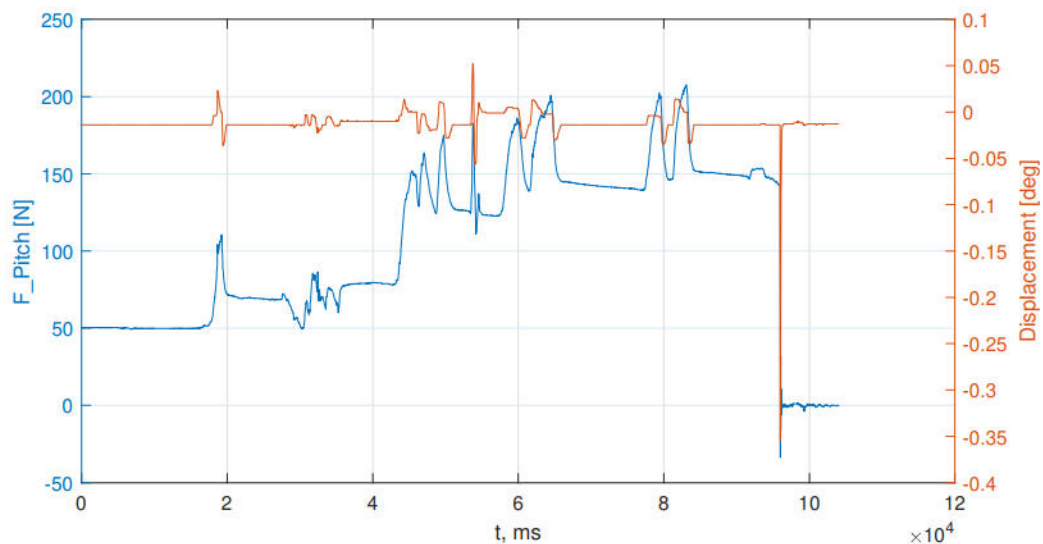


Abbildung 5.2.: Messung der maximalen Spitzenlast der Nickachse des WCLS

Spitzenlasten jeweils über 200 N betragen. Aus der Auswertung der Daten in Matlab folgt zudem, dass über einen Zeitraum von $37,5\text{ s}$ eine durchschnittliche Kraft von $155,9\text{ N}$ an der Nickachse gemessen wurde. An der Rollachse konnte über einen Zeitraum von $31,1\text{ s}$ eine durchschnittliche Kraft von $155,8\text{ N}$ gemessen werden. An den Graphen der Messdaten kann beobachtet werden, dass die gemessene Kraft mit der Zeit ungefähr linear abnimmt, sofern sie nicht erhöht worden ist. Dieser Effekt tritt besonders deutlich bei Kräften über 100 N auf. Da in diesen Abschnitten

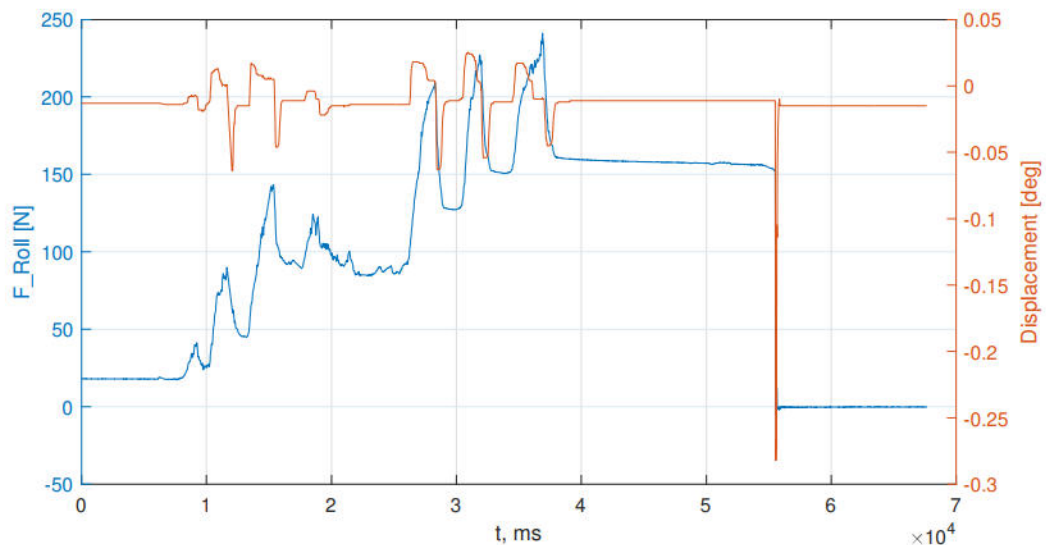


Abbildung 5.3.: Messung der maximalen Spitzenlast der Rollachse des WCLS

der Messung jedoch gleichzeitig die gemessene Auslenkung der Achsen konstant bleibt, lässt sich schlussfolgern, dass der Effekt nicht durch das CLS begründet ist. Es liegt die Vermutung nahe, dass hier stattdessen die elastische oder schon plastische Verformung der verwendeten Kabelbinder zu erkennen ist.

5.3. Performance der Simulation

Auf der Grundlage der in den Flügen der Testkampagne aufgezeichneten Daten kann die technische Performance der entwickelten Lösung evaluiert werden (siehe Kapitel 5.1). Es werden die Latenz zwischen vorgegebener und vom WCLS gemessener Kraft sowie die durchschnittliche Abweichung letzterer von ersterer Kraft ermittelt. In Abbildung 5.4 sind die aufgezeichneten zeitdiskreten Daten aus dem ersten Flug der Testkampagne über der Zeit dargestellt.

Es ist eine scheinbar große Differenz zwischen der vom WCLS gemessenen Auslenkung und der aus dem Modell übernommenen Auslenkung des Steuerknüppels in der Nickachse zu erkennen. Es ist unklar, weshalb dies auftritt. In der Rollachse des Steuerknüppels stimmen die Auslenkungen wesentlich besser überein. Weiterhin ist

fraglich, aus welchem Grund eine scheinbar so deutliche Abweichung nicht negativ in der qualitativen Evaluierung des Systems auffällt. Dabei ist diese Abweichung bei allen Flügen der Testkampagne zu erkennen. Die aufgezeichneten Messdaten aller Flüge der Testkampagne sind im Anhang E beigelegt. Es handelt sich um insgesamt acht simulierte Flüge, da die Teilnehmenden des zweiten und des fünften Tests der Kampagne mehrere Flüge absolvierten. Um das Einhalten der Anforderung, dass die von dem Steuerkraftsystem gemessenen Kräfte mit einem maximalen Fehler von $1,5\text{ N}$ den aus dem Modell vorgegebenen Kräften entsprechen, zu prüfen, werden die zeitdiskreten Messdaten der Testkampagne in Matlab ausgewertet. Außerdem kann die durchschnittliche zeitliche Verschiebung zwischen den vorgegebenen und den gemessenen Steuerkräften geschätzt werden. So kann eine Aussage über die durchschnittliche Latenz der entwickelten Lösung für die Implementierung des WCLS in eine Echtzeitsimulation getroffen werden. Im folgenden wird die Vorgehensweise bei der Datenverarbeitung in Matlab kurz erläutert. Die dafür entworfene Funktion *analyseData* wird für die zeitdiskreten Daten jedes Fluges der Testkampagne aufgerufen. Am Ende der Auswertung aller Flüge werden Mittelwerte gebildet, um einzelne Werte für die Auswertung der durchschnittlichen Performance des Systems zu erhalten. Zunächst wird jeder in der Funktion auszuwertende Datensatz auf den Zeitraum beschränkt, in dem sich der simulierte Tragschrauber in der Luft befindet. So werden große Abweichungen der Kräfte, die bei einem zu kraftvollen Auslenken des Steuerknüppels gegen einen Endstop des WCLS im Fall eines stationären Tragschraubers ausgeübt werden können, ausgeblendet. Die folgenden Operationen von *analyseData* werden jeweils für beide Achsen nacheinander ausgeführt. Zuerst wird die kleinste Frequenz der Änderung beider zu analysierenden Kraftsignale einer Achse ermittelt. Die Hälfte der kleineren der ermittelten Frequenzen wird als Grenzfrequenz für den folgend verwendeten Tiefpassfilter gewählt. Es wird ein Butterworth-Tiefpassfilter vierter Ordnung auf beide Signale angewandt. Durch diese Vorgehensweise wird der Rauschanteil der Signale reduziert. Mithilfe der Matlab-Methode *xcorr* wird eine lineare Korrelation der gefilterten Signale durchgeführt, um die zeitliche Verschiebung beider Kraftsignale zueinander zu schätzen. Somit ist die geschätzte Latenz der entwickelten Lösung ermittelt. Um den Fehler der dargestellten Kräfte unabhängig von der Latenz ermitteln zu können, werden die nicht gefilterten Signale um den

ermittelten Wert der Latenz verschoben. Daraufhin wird für jeden Zeitpunkt der Messdaten die Differenz zwischen gemessener und vorgegebener Steuerkraft gebildet. Schlussendlich wird aus diesen die durchschnittliche Differenz der um die Latenz korrigierten Kraftsignale ermittelt. Auch die Standardabweichung für die ermittelten Differenzen von der durchschnittlichen Differenz wird ermittelt. Weiterhin werden die Werte des 95., des 90. und des 68. Perzentils für die Kraftfehler dargestellt.

Die Resultate der soeben beschriebenen Analyse der Messdaten aus der Testkampagne sind in Tabelle 5.1 dargestellt. Es handelt sich dabei jeweils um die durchschnittlichen Werte aus allen Messungen. Die durchschnittliche Latenz des gesamten Systems beträgt $65,875\text{ ms}$. Die Werte der Perzentile stimmen ungefähr mit den bei einer leicht gestauchten Gauß'schen Normalverteilung der Fehler der dargestellten Kräfte erwarteten Werten überein.

	Nick-Achse	Roll-Achse
Latenz	$46,75\text{ ms}$	85 ms
gesamter absoluter Kraft-Fehler	$1,1408\text{ N}$	
Standardabweichung des Kraft-Fehlers	$1,3369\text{ N}$	$1,0595\text{ N}$
Kraft-Fehler: 95. Perzentil	$3,51\text{ N}$	$2,46\text{ N}$
Kraft-Fehler: 90. Perzentil	$2,59\text{ N}$	$1,73\text{ N}$
Kraft-Fehler: 68. Perzentil	$1,63\text{ N}$	$0,91\text{ N}$

Tabelle 5.1.: Auswertung der technischen Performance der entwickelten Lösung auf Basis der Messdaten der Testkampagne

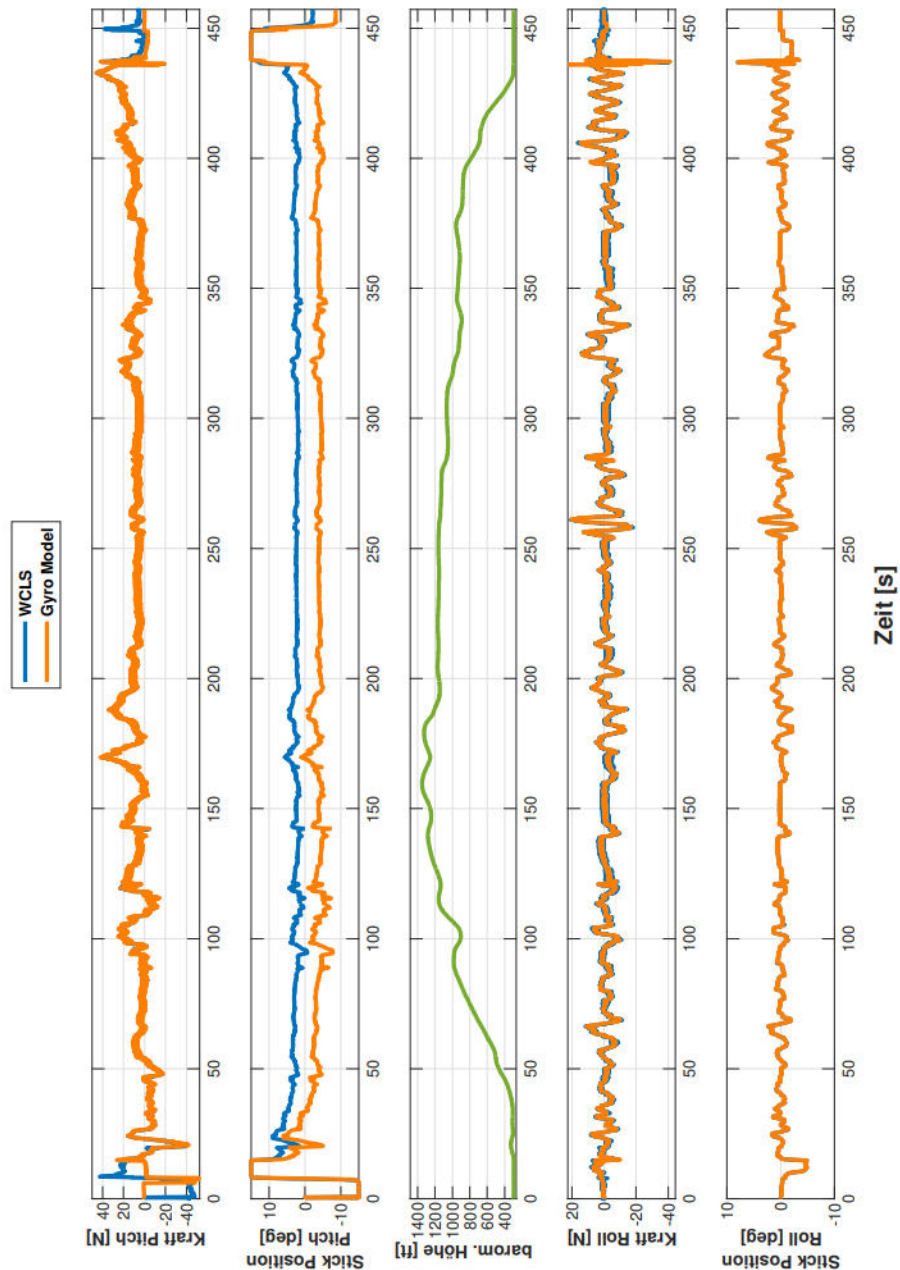


Abbildung 5.4.: Aufgezeichnete Daten aus dem ersten Testflug

5.4. Dynamische Systemantwort und Stabilität

Um die Stabilität des geregelten Systems nachzuweisen, wurden spezifische Messungen durchgeführt und in Matlab ausgewertet. Die Messdaten der zwei durchgeführten Messungen wurden, ähnlich wie in Kapitel 5.2, mithilfe von 2SimCC aufgezeichnet. Für den Nachweis der Stabilität wurde jede Achse mithilfe des Autopiloten-Kraft-Faktors maximal ausgelenkt (siehe Kapitel 4.7.2). Dabei wurde das WCLS in einer Konfiguration betrieben, die sich von der in der Simulation verwendeten Konfiguration lediglich durch einen QFeel-Faktor von zwei unterscheidet. Daher kehrt jede der

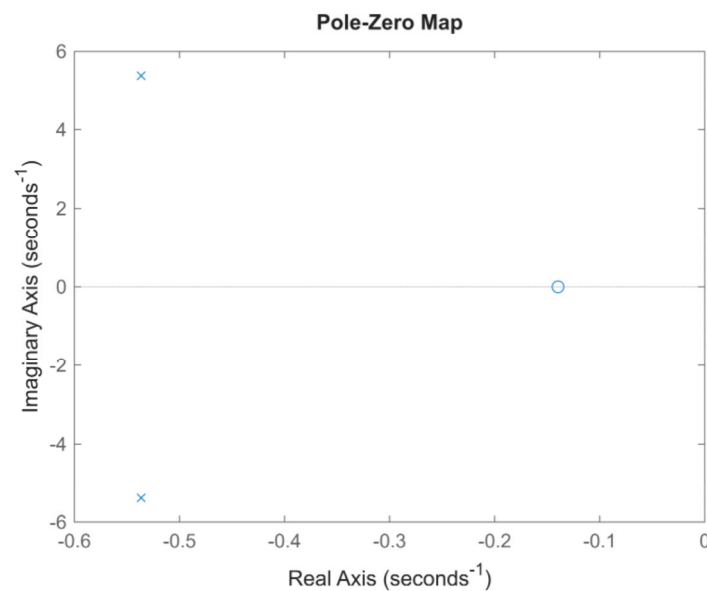


Abbildung 5.5.: Pol-Nullstellen-Diagramm der Übertragungsfunktion für die Nickachse

Achsen aktiv geregelt in ihren Trimpunkt zurück, wenn der Kraft-Faktor auf Null gesetzt wird. Bei diesem Auslenken der Achsen und dem darauf folgenden Einschwingen auf die jeweilige Mittelstellung wurden die gemessene Auslenkung der Achsen und der Kraft-Faktor aufgezeichnet. In Matlab wird dann auf Basis der beiden zeitdiskreten Datensignale ein Modells zweiter Ordnung geschätzt, welches das geregelte WCLS möglichst genau abbilden soll. Aus dem Signal des Kraft-Faktors wird ein Eingangssignal gebildet, das lediglich aus Einsen und Nullen besteht.

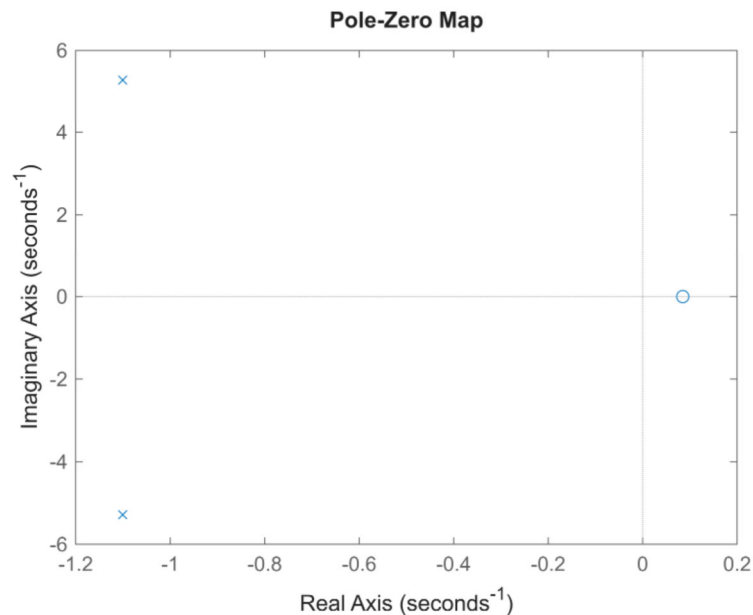


Abbildung 5.6.: Pol-Nullstellen-Diagramm der Übertragungsfunktion für die Rollachse

Das Signal der Auslenkung der Achse wird als Ausgangssignal verwendet. Diese beiden Signale werden im Aufruf der Matlab-Methode *tfest* für die Ermittlung einer Übertragungsfunktion eines Modells zweiter Ordnung genutzt. Es kann zuletzt ein Pol-Nullstellen-Diagramm auf Basis der Übertragungsfunktion erstellt werden, womit die Stabilität des Modells analysiert werden kann. Es wird die Annahme getroffen, dass das geregelte System mit hoher Wahrscheinlichkeit stabil ist, wenn das ermittelte Modell stabil ist. Die erstellten Pol-Nullstellen-Diagramme beider Achsen sind in Abbildung 5.5 und Abbildung 5.6 dargestellt. Alle Polstellen beider Übertragungsfunktion liegen in der offenen linken Halbebene des Pol-Nullstellen-Diagramms. Somit ist das geschätzte System stabil. Die komplexen Polstellen in der offenen linken Halbebene passen außerdem zu dem beobachteten Verhalten einer gedämpften Schwingung beider Achsen.

6. Diskussion

In diesem Kapitel werden die gesammelten Ergebnisse kritisch bewertet. Es wird eine Einschätzung bezüglich der zentralen Fragestellung dieser Arbeit, ob das WCLS für die Verwendung in einem Tragschrauber geeignet ist, formuliert.

Wie in Kapitel 5.2 bewiesen wurde, ist das WCLS imstande, Kräfte von über 200 N am GRP aufzubringen. Somit wird die Anforderung an die minimal zu leistenden Spitzenlast von 150 N erfüllt. Die gemessenen Zeiträume, in denen über 150 N ausgeübt wurden, übertreffen dabei sogar die Dauer der in den Messdaten des Tragschrauberflugs auftretenden Lastspitzen (siehe Kapitel 4.1). Auch die durchschnittliche Abweichung der vom WCLS gemessenen von der vorgegebenen Kraft (1,1408 N , siehe Tabelle 5.1) erfüllt die entsprechende Anforderung an das System (siehe Anhang A). Die in dieser Arbeit entwickelte Implementierung des WCLS kann in einer Echtzeitsimulation verwendet werden, die von der im GyroTrain verwendeten Simulation nur geringfügig abweicht. Obwohl es sich dabei um eine erste Version einer solchen Implementierung handelt, wurde das allgemeine Verhalten des Steuerkraftsystems während der Simulation von Experten grundsätzlich für gut befunden (siehe Kapitel 5.1).

Allerdings wird die Intensität der dargestellten Steuerkräfte vor allem für den Startvorgang als etwas zu gering beschrieben. Auch die hochfrequente Schwingung des Steuerknüppels wird von einigen Teilnehmenden nicht gut bewertet, da sie die Amplitude der Schwingung als zu gering empfinden. Beides sind wichtige Charakteristika in einer Tragschrauber-Simulation (siehe Kapitel 2). Da dem MFC nur geringe Eigenfrequenzen vorgegeben werden konnten (siehe Kapitel 4.4), ist unklar ob das WCLS selbst nach möglichen Modifikationen unfähig ist, Frequenzen von 11 Hz bis 12 Hz darzustellen.

Dass die dargestellten Steuerkräfte als zu gering während des Starts bewertet wurden, muss nicht unbedingt an dem Steuerkraftsystem liegen. Da der durchschnittliche Kraft-Fehler den Anforderungen genügt, ist davon auszugehen, dass die vom Modell vorgegebenen Steuerkräfte bereits zu gering sind. Dies könnte etwas mit der Begrenzung der Kräfte auf 100 N zu tun haben.

In Tabelle 5.1 ist außerdem zu erkennen, dass die Roll-Achse eine wesentlich höhere durchschnittliche Latenz als die Nick-Achse des WCLS aufweist. Diese ist höher als erwünscht und sollte sich eher auf dem Niveau der Latenz der Nick-Achse befinden. Sie ist möglicherweise dafür verantwortlich, dass einige Teilnehmende der Testkampagne leichte störende Verzögerungen empfanden (siehe Anhang D).

Gerade weil die erarbeitete Lösung Optimierungspotential aufweist ist dem WCLS zusätzlich negativ anzurechnen, dass es sich nicht um eine Entwicklung des DLR handelt. Dies führt dazu, dass einige Teile des Systems nicht unmittelbar einsehbar sind. Fehlen bei einer weiteren Entwicklung des Lösungsansatzes dieser Arbeit beispielsweise Informationen oder müssen Teilsysteme angepasst werden, auf die kein Zugriff möglich ist, so muss sich an den Hersteller, Wittenstein, gewendet werden. Dies kann zusätzliche Kosten in der Zukunft verursachen.

Dennoch birgt der in dieser Arbeit vorgestellte Lösungsansatz das Potential, die hohen Kräfte, die während eines Tragschrauber-Fluges entstehen, besser darzustellen als bisher verwendete Systeme. Da es sich um einen ersten Entwurf handelt, ist nicht verwunderlich dass einige Aspekte verbessert werden müssen. Wegen der großen Amplitude der darstellbaren Steuerkräfte und der vielfältigen Möglichkeiten der Konfiguration des WCLS ist es für die Verwendung in einem Tragschrauber-Simulator geeignet. Lediglich die Darstellung der hochfrequenten Schwingung kann möglicherweise nicht verbessert werden.

7. Zusammenfassung

Die Arbeit untersucht die Nutzbarkeit eines Steuerkraftsystems der Firma Wittenstein für die Nick- und Roll-Achsen eines Tragschrauber-Simulators. Um das System hinsichtlich dieses Anwendungsbereiches bewerten zu können, wird es in eine Echtzeitsimulation eingebunden, die zum größten Teil aus einem bestehenden Tragschrauber-Simulator stammt. Das Steuerkraftsystem wurde zuvor in einem für diese Arbeit konstruierten Teststand installiert, der im Rahmen der Arbeit für die Einbindung der Echtzeitsimulation erweitert wird. Zentrale Problemstellung der Implementierung des Steuerkraftsystems in die Simulation ist die Modalität der Darstellung von Steuerkräften. Dafür werden bekannte Ansätze vorgestellt. Da diese jedoch für die Steuerkräfte einer Tragschraubersimulation schlecht geeignet sind, wird ein neuartiger Ansatz entwickelt und implementiert.

Die erarbeitete Lösung wird qualitativ und quantitativ geprüft. Zu diesem Zweck wird eine Testkampagne veranstaltet, bei der Teilnehmende mit Flugerfahrung die Implementierung testen und subjektiv bewerten. Während dieser Kampagne sowie aus diversen weiteren Messungen erhobene Messdaten werden herangezogen, um technische Anforderungen an die Darstellung der Steuerkräfte zu evaluieren.

Obwohl alle wichtigen Anforderungen an die Implementierung erfüllt wurden, sind noch Optimierungen des Systems vonnöten. Es konnte jedoch insgesamt gezeigt werden, dass das zu untersuchende Steuerkraftsystem grundsätzlich für die Verwendung in einem Tragschrauber-Simulator geeignet ist.

8. Ausblick

In Zukunft müssen einige Aspekte der Implementierung dringend optimiert und überarbeitet werden, wenn das WCLS den MAGSI im Tragschrauber-Simulator ablösen sollte.

Hauptsächlich gilt es, die Darstellung der hochfrequenten Schwingung am Steuerknüppel und der Steuerkräfte während des Starts zu verbessern. Dafür kann es sinnvoll sein, eine vollständige Systemidentifizierung des WCLS durchzuführen und gegebenenfalls mit Wittenstein in Kontakt zu treten. Da in dieser Arbeit ein Steuerknüppel aus einem Hubschrauber verwendet wurde, der eine größere Länge und Masse als ein Tragschrauber-Steuerknüppel aufweist, sollte dieser durch einen passenderen Steuerknüppel ersetzt werden. Es ist anzunehmen, dass alleine dadurch die dynamischen Eigenschaften des Systems immens verbessert werden können. Weniger aufwändig aber dennoch notwendig ist voraussichtlich die Optimierung der Latenzen der dargestellten Steuerkraft, vor allem die der Roll-Achse.

Es könnte zudem vonnöten sein, das verwendete dynamische Tragschrauber-Modell geringfügig zu modifizieren, um höhere Steuerkräfte abbilden zu können.

Literaturverzeichnis

- [1] David John Allerton. *Principles of flight simulation*. John Wiley & Sons Ltd, 2009. ISBN: 978-0-470-75436-8.
- [2] David John Allerton. „The impact of flight simulation in aerospace“. In: *The Aeronautical Journal* 114.1162 (2010), S. 747–756.
- [3] National Center for Simulation. *Edwin Albert Link*. 2019. URL: <https://www.simulationinformation.com/hall-of-fame/members/edwin-albert-link/> (besucht am 21.09.2025).
- [4] Peter Hamel u. a. *Fliegende Simulatoren und Technologieträger: Braunschweiger Luftfahrtforschung im internationalen Umfeld*. Appelhans Verlag, 2014. ISBN: 978-3-944939-06-3.
- [5] Holger Duda und Jörg Seewald. *Flugphysik der Tragschrauber*. Springer, 2016.
- [6] Falk Sachs u. a. „Simulator Study on Pilot Performance in Different Takeoff Procedure Scenarios“. In: *Deutscher Luft-und Raumfahrtkongress*. 2017.
- [7] Insa Pruter. „Untersuchung der Trainingseffizienz von Simulatoren für Tragschrauber“. Diss. Deutsches Zentrum für Luft-und Raumfahrt e.V. (DLR), 2016.
- [8] Holger Duda u. a. „Design of the DLR AVES research flight simulator“. In: *AIAA Modeling and Simulation Technologies (MST) Conference*. American Institute of Aeronautics und Astronautics. Reston, Virginia, Aug. 2013. DOI: 10.2514/6.2013-4737.

-
- [9] Deutsches Zentrum für Luft-und Raumfahrt (DLR). *Air Vehicle Simulator (AVES)*. URL: <https://www.dlr.de/de/forschung-und-transfer/forschungsinfrastruktur/grossforschungsanlagen/aves-motion-simulator> (besucht am 02.10.2025).
 - [10] Deutsches Zentrum für Luft-und Raumfahrt e.V. (DLR). *Airbus Helicopter EC 135 ACT/FHS (D-HFHS)*. URL: <https://www.dlr.de/de/forschung-und-transfer/forschungsinfrastruktur/grossforschungsanlagen/airbus-helicopter-ec-135-act-fhs> (besucht am 02.10.2025).
 - [11] Deutsches Zentrum für Luft-und Raumfahrt e.V. (DLR). *Air Vehicle Simulator (AVES): Bewegungsplattform*. URL: <https://www.dlr.de/de/ft/ueber-uns/abteilungen/flugdynamik-und-simulation/fds-infrastruktur/aves-bewegungsplattform> (besucht am 02.10.2025).
 - [12] Peter Saager u. a. *Beschaffung eines Steuerkraftsystems für den FHS-Systemsimulator*. Abschlussbericht. Braunschweig: DLR - Institut für Flugsystemtechnik, 2008.
 - [13] WITTENSTEIN aerospace & simulation Inc. *TCL DLR Control Loading System Factory Acceptance & Site Acceptance Test Procedure and Record*. 8060-D017632. Juli 2008.
 - [14] WITTENSTEIN aerospace & simulation Inc. *Control Loading System: Generic Technical Manual*. 1. Aufl. 8050-D029229. März 2020.
 - [15] WITTENSTEIN aerospace & simulation Inc. *Wittenstein Control Loading Systems Manual*. 4. Aufl. A34022_D000107. Juli 2007.
 - [16] WITTENSTEIN aerospace & simulation Inc. *Wittenstein Aktiv Toolkit User Manual*. A34022-D000106. Jan. 2005.
 - [17] Lennart Halfbrodt. *Vorbereitung eines Teststandes für ein aktives Steuerkraftsystem in einem Tragschrauber-Simulator*. Projektarbeit. Braunschweig: DLR - Institut für Flugsystemtechnik, 2025.
 - [18] Eike Hillenbrand. *Tragschraubersimulator: HW-Struktur*. Vermerk/Mitteilung D22090901/MMT03. Braunschweig: DLR - Institut für Flugsystemtechnik, Nov. 2012.

-
- [19] Insa Pruter, Wulf Mönnich und Holger Duda. *Aufbau des Simulationsmodells für den Tragschrauber MTOsport*. Institutsbericht IB 111-2012/30. Braunschweig: DLR - Institut für Flugsystemtechnik, 2012.
- [20] Jürgen Gotschlich, Torsten Gerlach und Umut Durak. „2Simulate: A Distributed Real-Time Simulation Framework“. In: *Workshop der ASIM/GI-Fachgruppen STS und GMMS*. Reutlingen, Feb. 2014. ISBN: 978-3-901608-43-8. DOI: 10.13140/2.1.4976.2081.
- [21] Jürgen Gotschlich. *2Simulate User Guide*. Version 2.8.29. Braunschweig: DLR - Institut für Flugsystemtechnik, Aug. 2025.
- [22] Torsten Gerlach und Jürgen Gotschlich. *2Indicate Nutzerhandbuch*. Version 2.1.0 Revision A. Braunschweig: DLR - Institut für Flugsystemtechnik, Juli 2021.
- [23] Daniel Angermeier u. a. *V-Modell XT. Das deutsche Referenzmodell für Systementwicklungsprojekte*. 2.4. Verein zur Weiterentwicklung des V-Modell XT e.V. (Weit e.V.), 2006.
- [24] Kent Beck u. a. *Manifest für Agile Softwareentwicklung*. 2001. URL: <https://agilemanifesto.org/iso/de/manifesto.html> (besucht am 28.09.2025).
- [25] Klaus Pohl und Chris Rupp. *Requirements engineering fundamentals: a study guide for the certified professional for requirements engineering exam-foundation level-IREB compliant*. 2. Aufl. Rocky Nook, Inc., 2015. ISBN: 978-1-937538-77-4.
- [26] Horst Peterjohann. *Requirements Engineering: Anforderungen entwickeln und verwalten*. Mai 2021. URL: <https://www.peterjohann-consulting.de/requirements-engineering/> (besucht am 03.10.2025).
- [27] KERN & SOHN GmbH. *KERN CH 50K50*. https://www.kern-sohn.com/cosmoshop/default/pix/a/media/CH%2050K50/TD_CH+50K50_de.pdf. (Besucht am 10.09.2025).
- [28] FISCO Tools Ltd. *FISKO EN17 Digital Inclinator*. https://www.fisco.co.uk/pdfs/products/EN17_user_guide_web.pdf. (Besucht am 11.09.2025).

-
- [29] Henrik Wüstenberg, Jürgen Gotschlich und Umut Durak. „Anbindung eines aktiven Steuerkraftsystems an eine Echtzeitsimulation“. In: *Workshop der ASIM/GI-Fachgruppen STS und GMMS*. 51. Lippstadt: ARGESIM, März 2016, S. 142–147. ISBN: 978-3-901608-48-3.
 - [30] WITTENSTEIN aerospace & simulation Inc. *Wittenstein Control Loading Systems Communications Protocol Definition*. 4. Aufl. 34-22-300746-02. 2008.
 - [31] WITTENSTEIN aerospace & simulation Inc. *Wittenstein Control Loading System Power Supply Product Description*. 5. Aufl. 34-91-300708. Sep. 2004.

Anhang A.

Anforderungen

ID	Bezeichnung	Beschreibung	Anforderungs-Typ	Priorität
1001	Messaufbau Steuerhebel GRP	Der Teststand muss eine Möglichkeit zur Messung der Steuerkräfte am Grip Reference Point des Steuerhebels bieten.	Funktional	hoch
1002	Demontierbarkeit Messaufbau GRP	Die Möglichkeit zur Messung der Steuerkräfte soll demontiert werden können, ohne den restlichen Aufbau des Teststandes zu verändern.	Funktional	mittel

2001	Steuerkräfte max. Fehler	Die von dem Steuerkraftsystem angegebenen wirkenden Kräfte müssen mit einem maximalen Fehler von 1,5N den am Grip Reference Point des Steuerhebels tatsächlich wirkenden Kräften entsprechen	nicht Funktional	hoch
1003	mechanische Verbindungen	Der Steuerhebel muss mit zwei Achsen des Steuerkraftsystems mechanisch verbunden sein, sodass das Verhalten der Roll- und Nickachse abgebildet werden kann.	Funktional	hoch
1004	WCLS nutzen	Als Steuerkraftsystem muss das Steuerkraftsystem der Firma Wittenstein verwendet werden.	Funktional	hoch
3001	Kennlinien-Charakteristik	Die Kraft-Weg-Kennlinie des Steuerkraftsystems muss für die Roll- und die Nickachse die Charakteristik der beim Startvorgang an dem Steuerhebel eines Tragschraubers anliegenden Kräfte nachbilden	nicht Funktional	hoch

4001	Simulation mit Modell Echtzeit	Der Teststand mit dem Steuerkraftsystem muss in Verbindung mit dem bereits vorhandenen flugdynamischen Modell eines Tragschraubers im Betriebsmodus einer weichen Echtzeitsimulation verwendet werden können.	Funktional	hoch
5001	Dokumentierung	Es soll eine Dokumentation über die Bedienung und den Aufbau des Teststandes und der verwendeten Software geben.	nicht Funktional	gering
4002	Ansteuerungs-Arch. des Systems	Der Betrieb eines Simulators mit dem verwendeten Steuerkraftsystem soll mithilfe eines Host-Rechners, der per Ethernet-Verbindung das Steuerkraftsystem ansteuert, sowie eines Bildschirms möglich sein.	Funktional	mittel
3002	Stabilität Regelung	Das geregelte Steuerkraftsystem muss stabil sein und nicht durch den Regler zu Schwingungen angeregt werden können.	nicht Funktional	hoch

1005	Sicherheit: Not-Aus	Die Sicherheit von Nutzern des Aufbaus soll durch das Abtrennen der Stromzufuhr der Motoren mithilfe eines unmittelbar erreichbaren Schalters gewährleistet werden können.	nicht Funktional	optional
4003	Subjektive Ähnlichkeit testen	Das fertige System soll bezüglich seiner subjektiven Ähnlichkeit zum echten Flugverhalten eines Tragschraubers getestet werden können.	nicht Funktional	mittel
3003	Masse Steuerhebel kompensieren	Die größere Masse und Trägheit des Steuerhebels im Vergleich zum Steuerhebel eines Tragschraubers soll regelungstechnisch so kompensiert werden, dass sie subjektiv in Tests nicht auffällt.	nicht Funktional	mittel
1006	Halterung SCM und SPS	Der Teststand kann um eine kompakte Halterung des SCM und der SPS erweitert werden.	Funktional	optional

2002	Große Kräfte am GRP erzeugen	Das Steuerkraftsystem soll am Grip Reference Point des Steuerhebels Kräfte von mindestens 150N erzeugen können.	nicht Funktional	hoch
------	------------------------------	---	------------------	------

Tabelle A.1.: Anforderungen an das in dieser Arbeit entwickelte Produkt

Anhang B.

Quellcode der Callback-Routinen des WCLS-Tasks

B.1. dpWcls.cpp

Quellcode B.1: dpWcls.cpp

```
1  //
   #####
2  //
3  // dpWcls.cpp
4  // =====
5  //
6  // WCLS data processing functions. Based on dpWcls.cpp from A320IC Project.
7  //
8  // functions in this module:
9  // -----
10 // dpWclsPostInit()
11 // dpWclsPre()
12 // dpWclsPost()
13 // dpWclsIntermediate()
14 //
15 //
16 // revision history:
17 // -----
18 // 14.07.2025    L.H.    first version
19 //
20 //
   #####
21
22 //---- include files ----
23 #include "dpWcls.h"
24
25 using namespace MathLib;
26
27 //---- global variables ----
28 extern gyroCommon *com;
```

```

29
30 #define POLARITY_INVERSION -1.0 //!< polarity inversion
31 #define NUM_AXES          2    //!< nr. of axes
32
33 const int GYROMASTERCURVEID = 5;
34 const int GYROCONFIG_ID = 6; // aktuell nicht genutzt
35 const int GYRONROFCURVEPNTS = 3;
36
37 static bool bJoyStickAvailable = false;
38 static bool simInitCond = false;
39
40
41 //
42 // #####
43 // set initial values
44 // #####
45
46 void dpWclsPostInit(TSim *pAppl, TSimRtTask *pRtTask){
47     // set initial values for send buffer
48     fcast(com->o.c.wcls.BrkForcePit.dp) = 0.0; // disable
49     fcast(com->o.c.wcls.BrkForceRol.dp) = 0.0; // disable
50     fcast(com->o.c.wcls.PosOffPit.dp) = 0.0;
51     fcast(com->o.c.wcls.PosOffRol.dp) = 0.0;
52
53     com->c.wcls.statFrictPit = 0.0;
54     com->c.wcls.statFrictRol = 0.25;
55
56     com->c.wcls.dynFrictPit = 0.0;
57     com->c.wcls.dynFrictRol = 0.25;
58
59     com->c.wcls.curMasterCurvePit = 0;
60     com->c.wcls.curMasterCurveRol = 0;
61
62     fcast(com->o.c.wcls.qFeelFactPit.dp) = 0.0;
63     fcast(com->o.c.wcls.qFeelFactRol.dp) = 0.0;
64
65     com->c.wcls.trimMaxChangeRatPit = 10.0;
66     com->c.wcls.trimMaxChangeRatRol = 10.0;
67
68     com->c.wcls.modelDampingPit = 0.05;
69     com->c.wcls.modelDampingRol = 0.1;
70
71     com->c.wcls.modelFrequencyPit = 1.0;
72     com->c.wcls.modelFrequencyRol = 1.0;
73
74     // initialize Joystick
75     ckpSimInitCB();
76
77     simInitCond = true;
78     com->c.wcls.currentConfig = 0;
79 }
80 //
81 // #####
82 // WCLS pre processing
83 //
84 // Update Outputs

```

```

83  //
      #####

84  void dpWclsPre(TSim *pAppl, TSimRtTask *pRtTask) {
85
86      static int init = 0;
87      static Calib *PosOffPitCalib = NULL;
88      static Calib *PosOffRolCalib = NULL;
89      //---- init output calibration ----
90      if (!init) {
91          init = true;
92          PosOffPitCalib = new Calib(&com->o.r.wcls.PosOffPit, &com->o.c.wcls.
            PosOffPit.c.f, -15.0, 15.0, -15.0, 15.0);
93          PosOffRolCalib = new Calib(&com->o.r.wcls.PosOffRol, &com->o.c.wcls.
            PosOffRol.c.f, -10.0, 10.0, -10.0, 10.0);
94      }
95
96      //---- calibration of output signals ( [%] --> [deg] ) ----
97      PosOffPitCalib->calibOut();
98      PosOffRolCalib->calibOut();
99
100
101      //---- STICK POSITION ----
102      fcast(com->i.c.mgsi.co_stick_pitch.dp) = com->i.c.wcls.PosPit.c.f;
103      fcast(com->i.c.mgsi.co_stick_roll.dp) = (-1.0 * com->i.c.wcls.PosRol.c.f);
104
105      if (simInitCond){
106          com->o.c.wcls.PosOffPit.c.f = gcast(com->i.c.gyro.To_IC.theta_st.dp);
107          com->o.c.wcls.PosOffRol.c.f = gcast(com->i.c.gyro.To_IC.phi_st.dp);
108      }
109
110      //---- STICK FORCES ----
111      if (gcast(com->i.c.gyro.To_IC.Run.dp)){
112          simInitCond = false;
113          fcast(com->o.c.wcls.qFeelFactPit.dp) = 0.0;
114          fcast(com->o.c.wcls.qFeelFactRol.dp) = 0.0;
115
116          com->o.r.wcls.ForcePitCmd = (-1.0 * gcast(com->i.c.gyro.To_IC.
            R_Stick_Pitch.dp));
117          com->o.r.wcls.ForceRolCmd = (-1.0 * gcast(com->i.c.gyro.To_IC.
            R_Stick_Roll.dp));
118          fcast(com->o.c.gyro.From_IC.R_Stick_Roll_In.dp) = com->i.c.wcls.
            ForceRol.c.f;
119          fcast(com->o.c.gyro.From_IC.R_Stick_Pitch_In.dp) = com->i.c.wcls.
            ForcePit.c.f;
120
121          com->c.wcls.statFrictPit = 0.0;
122          com->c.wcls.statFrictRol = 0.0;
123
124          com->c.wcls.dynFrictPit = 0.0;
125          com->c.wcls.dynFrictRol = 0.0;
126
127          com->c.wcls.modelDampingPit = 0.8;
128          com->c.wcls.modelDampingRol = 0.5;
129      }
130      else {
131          fcast(com->o.c.wcls.qFeelFactPit.dp) = 2.0;
132          fcast(com->o.c.wcls.qFeelFactRol.dp) = 2.0;
133
134          com->c.wcls.statFrictPit = 0.25;
135          com->c.wcls.statFrictRol = 0.25;

```

```

136
137     com->c.wcls.dynFrictPit = 0.25;
138     com->c.wcls.dynFrictRol = 0.25;
139
140     com->c.wcls.modelDampingPit = 0.5;
141     com->c.wcls.modelDampingRol = 0.5;
142
143     com->o.r.wcls.ForcePitCmd = 0.0;
144     com->o.r.wcls.ForceRolCmd = 0.0;
145     fcast(com->o.c.gyro.From_IC.R_Stick_Roll_In.dp) = com->i.c.wcls.
        ForceRol.c.f;
146     fcast(com->o.c.gyro.From_IC.R_Stick_Pitch_In.dp) = com->i.c.wcls.
        ForcePit.c.f;
147 }
148
149
150
151 //---- JOYSTICK CB ----
152 ckpSimCB();
153
154
155
156 }
157
158 //
        #####
159 // WCLS post processing
160 //
161 // Update Inputs & Calibrate Inputs from WCLS
162 //
        #####
163 void dpWclsPost(TSim *pAppl, TSimRtTask *pRtTask) {
164
165     static int    init = 0;
166     static Calib *PosPitCalib = NULL;
167     static Calib *PosRolCalib = NULL;
168
169     //---- init input calibration ([DEG] --> [%]; input:RAW, output:COND )
170     ----
171     if (!init) {
172         init = true;
173         PosPitCalib = new Calib(&com->i.r.wcls.PosPit, &com->i.c.wcls.PosPit.c
            .f, -1.0, 1.0, -15.0, 15.0);
174         PosRolCalib = new Calib(&com->i.r.wcls.PosRol, &com->i.c.wcls.PosRol.c
            .f, -1.0, 1.0, -10.0, 10.0); // first param is raw input. Min
            and max for that are last two params. sec. par. is cond. output,
            min and max are next 2 params
175     }
176
177     //---- calibration of input signals [DEG] --> [%] ----
178     PosPitCalib->calibInp();
179     PosRolCalib->calibInp();
180
181     //---- at the time copy forces from RAW to COND without calibration ----
182     fcast(com->i.c.wcls.ForcePit.dp) = com->i.r.wcls.ForcePit;
183     fcast(com->i.c.wcls.ForceRol.dp) = com->i.r.wcls.ForceRol;
184 }
185

```

```

186 //
187 // intermediate data processing
188 // =====
189 //
190 void dpWclsIntermediate(TSim *pAppl, TSimUdpTask *pUdpTask) {
191
192     TSimWclsTaskGyro* pWclsTask = (TSimWclsTaskGyro*)pUdpTask;
193     static dpWclsController wclsController(pAppl);
194     static int init = 0;
195
196     if (fcast(com->i.c.disp.o_ic.dp)){
197         simInitCond = true;
198     }
199
200     //---- automatically activate WCLS axes (on startup) ----
201     static int startUpCls = 0;
202     if (com->c.simctrl.wcls.autoTravFlag){
203         if (startUpCls && (com->i.r.wcls.AxisStatPit == WCLS_AXIS_STAT_PASSIVE
204             ) && (com->i.r.wcls.AxisStatRol == WCLS_AXIS_STAT_PASSIVE)){
205             // Passive => Active
206             com->c.simctrl.wcls.userCmd = WCLSTASK_USERCMD_START;
207             startUpCls = 0;
208         }
209         if ((com->i.r.wcls.AxisStatPit == WCLS_AXIS_STAT_UNINITIALISED) && (
210             com->i.r.wcls.AxisStatRol == WCLS_AXIS_STAT_UNINITIALISED)) {
211             // Uninitialized => Initializing
212             com->c.simctrl.wcls.userCmd = WCLSTASK_USERCMD_INIT;
213             startUpCls = 1;
214         }
215     }
216
217     //---- manual WCLS axis state manipulation in IC ----
218     if (com->c.simctrl.wcls.initialize){ com->c.simctrl.wcls.userCmd =
219         WCLSTASK_USERCMD_INIT; com->c.simctrl.wcls.initialize = 0; }
220     else if (com->c.simctrl.wcls.setNeutral){ com->c.simctrl.wcls.userCmd =
221         WCLSTASK_USERCMD_STOP; com->c.simctrl.wcls.setNeutral = 0; }
222     else if (com->c.simctrl.wcls.setActive){ com->c.simctrl.wcls.userCmd =
223         WCLSTASK_USERCMD_START; com->c.simctrl.wcls.setActive = 0; }
224
225     //---- update WCLS state with wclsController ----
226     static int iCtrUpdates = 0;
227     iCtrUpdates += wclsController.updateQFeel(pWclsTask, !init);
228     iCtrUpdates += wclsController.updateAutoPilotForce(pWclsTask);
229     iCtrUpdates += wclsController.updateFrictions(pWclsTask);
230     iCtrUpdates += wclsController.updateTrim(pWclsTask);
231     iCtrUpdates += wclsController.updateRestoreConfiguration(pWclsTask);
232     iCtrUpdates += wclsController.updateModel(pWclsTask);
233
234     if (!init){
235         init = true;
236     }
237 }
238
239 void ckpSimCB(){
240 #ifdef WIN32
241     const float CKPEMUL_JOYSTICK_CALIB_CEN = 32767.0f;

```

```

238     if (bJoyStickAvailable) {
239         JOYINFOEX j;
240         j.dwFlags = JOY_RETURNALL;
241         j.dwSize = sizeof(j);
242         MMRESULT joyResult = joyGetPosEx(JOYSTICKID1, &j);
243
244         float fThrustLever = 0.0;
245         float fRudder = 0.0;
246
247         fThrustLever = ((-1.0 * ((j.dwZpos - CKPEMUL_JOYSTICK_CALIB_CEN) /
248             CKPEMUL_JOYSTICK_CALIB_CEN)) + 1) / 2; //Thrust only positive in
249             the range from 0 to 1
250         fRudder = -0.5 * ((j.dwRpos - CKPEMUL_JOYSTICK_CALIB_CEN) /
251             CKPEMUL_JOYSTICK_CALIB_CEN);
252         fcast(com->i.c.can.Throttle.dp) = fThrustLever;
253         fcast(com->i.c.can.Pedal.dp) = fRudder;
254
255         //! One Button was pushed
256         if (j.dwButtonNumber){
257             // Check Buttons
258             if (j.dwButtons & JOY_BUTTON1) {
259
260             }
261             if (j.dwButtons & JOY_BUTTON2) {
262                 fcast(com->i.c.disp.o_mast.dp) = 1.0;
263             }
264             if (j.dwButtons & JOY_BUTTON3) {
265
266             }
267             if (j.dwButtons & JOY_BUTTON4) {
268                 fcast(com->i.c.disp.o_maoff.dp) = 1.0;
269             }
270             if (j.dwButtons & JOY_BUTTON5){
271                 fcast(com->i.c.disp.o_mag1.dp) = 1.0;
272             }
273             if (j.dwButtons & JOY_BUTTON6) {
274                 fcast(com->i.c.disp.o_mag2.dp) = 1.0;
275             }
276             if (j.dwButtons & JOY_BUTTON7) {
277                 fcast(com->i.c.disp.o_pum2.dp) = 1.0;
278             }
279             if (j.dwButtons & JOY_BUTTON8) {
280
281             }
282             if (j.dwButtons & JOY_BUTTON9) {
283                 wcast(com->i.c.can.GripSwitchUpperButton.dp) = 1.0;
284             }
285             if (j.dwButtons & JOY_BUTTON10) {
286                 fcast(com->i.c.can.Brake.dp) = 1.0;
287             }
288             if (j.dwButtons & JOY_BUTTON11) {
289                 if (gcast(com->i.c.gyro.To_IC.Flight_Brake.dp) > 0.5){ //
290                     Transition from BRAKE to FLIGHT
291                     fcast(com->i.c.disp.o_brak.dp) = 1.0;
292                 }
293             }
294             if (j.dwButtons & JOY_BUTTON12) {
295                 if (gcast(com->i.c.gyro.To_IC.Flight_Brake.dp) < 0.5){ //
296                     Transition from FLIGHT to BRAKE
297                     fcast(com->i.c.disp.o_brak.dp) = 1.0;
298                 }
299             }
300         }
301     }

```

```

294         }
295     }
296
297     }
298     else {
299         wcast(com->i.c.can.GripSwitchUpperButton.dp) = 0.0;
300         fcast(com->i.c.can.Brake.dp) = 0.0;
301     }
302     ///! Joystick POV Hat is not in center
303     if (j.dwPOV != JOY_POVCENTERED){
304
305         if (j.dwPOV == JOY_POVFORWARD) {
306             wcast(com->i.c.can.GripSwitchCoolieHatUp.dp) = 1.0;
307         }
308         if (j.dwPOV == JOY_POVRIGHT) {
309             wcast(com->i.c.can.GripSwitchCoolieHatRight.dp) = 1.0;
310         }
311
312         if (j.dwPOV == JOY_POVBACKWARD) {
313             wcast(com->i.c.can.GripSwitchCoolieHatDown.dp) = 1.0;
314         }
315
316         if (j.dwPOV == JOY_POVLEFT) {
317             wcast(com->i.c.can.GripSwitchCoolieHatLeft.dp) = 1.0;
318         }
319     }
320 }
321 else {
322     wcast(com->i.c.can.GripSwitchCoolieHatUp.dp) = 0.0;
323     wcast(com->i.c.can.GripSwitchCoolieHatDown.dp) = 0.0;
324     wcast(com->i.c.can.GripSwitchCoolieHatRight.dp) = 0.0;
325     wcast(com->i.c.can.GripSwitchCoolieHatLeft.dp) = 0.0;
326 }
327 }
328 }
329
330 #endif
331 }
332 void ckpSimInitCB(){
333 #ifdef WIN32
334     ///! Check for Joystick
335     JOYINFOEX j;
336     j.dwFlags = JOY_RETURNALL;
337     j.dwSize = sizeof(j);
338     MMRESULT joyResult = joyGetPosEx(JOYSTICKID1, &j);
339     if (joyResult != JOYERR_NOERROR) {
340         cout << "CKP-SIM Error reading joystick! Error code= " << joyResult << endl;
341         bJoyStickAvailable = false;
342     }
343     else {
344         bJoyStickAvailable = true;
345     }
346 }
347 #endif
348 }

```

B.2. dpWcls.h

Quellcode B.2: dpWcls.h

```
1  //
    #####

2  //
3  // dpWcls.h
4  // =====
5  //
6  // Header file for dpWcls functions. Based on dpWcls.h from A320IC Project.
7  //
8  // revision history:
9  // -----
10 // 14.07.2025    L.H.    first version
11 //
12 //
    #####

13
14 #ifndef _DPWCLS_H_
15 #define _DPWCLS_H_
16
17 //---- include ----
18 #include <string.h>
19 #include <math.h>
20 #include <stdio.h>
21 #include <stdlib.h>
22
23 #include "TSim.h"
24 #include "TSimSimpleTask.h"
25 #include "TSimUdpTask.h"
26 #include "TSimWclsTaskGyro.h"
27
28 #include "Calib.h"
29
30 using namespace std;
31
32 #include "GyroMain.h"
33 #include "gyroCommon.h"
34 #include "gyroDatabase.h"
35 #include "dpWclsController.h"
36
37 //---- axes numbering ----
38 const int WCLS_PITCH_AXIS_ID = 0;
39 const int WCLS_ROLL_AXIS_ID = 1;
40 //---- axes statuses ----
41 const int WCLS_AXIS_STAT_UNINITIALISED = 1;
42 const int WCLS_AXIS_STAT_INITIALISING = 2;
43 const int WCLS_AXIS_STAT_PASSIVE = 4;
44 const int WCLS_AXIS_STAT_ACTIVE = 8;
45 const int WCLS_AXIS_STAT_NORESPONSE = 16;
46 const int WCLS_AXIS_STAT_UNRECOVERRR_TERM = 64;
47
48 //---- Number of Data Codes for Query Messages ----
49 const int WCLS_NUM_VAR_QUERY_MSG = 12;
50
```



```
51 //---- function prototypes ----
52 void dpWclsPre(TSim *appl, TSimRtTask *rtTask);
53 void dpWclsIntermediate(TSim *appl, TSimUdpTask *rtTask);
54 void dpWclsPost(TSim *appl, TSimRtTask *rtTask);
55 void dpWclsPostInit(TSim *appl, TSimRtTask *rtTask);
56
57 void ckpSimCB();
58 void ckpSimInitCB();
59
60
61 #endif
```

Anhang C.

Fragebogen für Probanden der Testkampagne

Auswertung der Eignung des Steuerkraftsystems WITTENSTEIN Control Loading System für den Einsatz in einem Tragschrauber-Simulator

Sehr geehrte Teilnehmer/innen,

Sie nahmen an Tests eines Steuerkraftsystems der Firma Wittenstein teil. Ziel dieser Tests ist die Evaluierung der möglichen Verwendung dieses Systems in einem Tragschrauber-Simulator. Bei der Konstruktion, in dem das Steuerkraftsystem zurzeit verbaut ist, handelt es sich lediglich um einen Teststand. Um beurteilen zu können, wie stark das Verhalten des Systems subjektiv von dem erwarteten haptischen Feedback eines Tragschraubers abweicht, werden alle Teilnehmenden bezüglich ihrer Einschätzung des Systems befragt. Bitte fokussieren Sie sich in der Beantwortung der folgenden Fragen auf das Verhalten und die erbrachten Leistungen des verwendeten Steuerkraftsystems. Die Simulationsgüte des gesamten Teststandes soll nicht bewertet werden.

1. **Besitzen Sie eine Lizenz für das Fliegen von Tragschraubern?**
☐ ja ☐ nein
2. **Besitzen Sie andere fliegerische Vorkenntnisse (bspw. Lizenzen)? Wenn ja, welche?**
☐ keine anderen Vorkenntnisse
☐ fliegerische Vorkenntnisse:
Klicken oder tippen Sie hier, um Text einzugeben.
3. **Wie viele Tragschrauber-Flugstunden absolvierten Sie schätzungsweise im letzten Jahr?**
Klicken oder tippen Sie hier, um Text einzugeben.
4. **Sind Sie bereits im Tragschrauber-Simulator des DLR (Steuerkraftsystem MAGSI) geflogen?**
☐ ja ☐ nein

Technische Fragen zum WCLS:

5. **Wie bewerten Sie die Intensität der vom WCLS dargestellten Steuerkräfte?**
☐ sehr gut ☐ gut ☐ mittelmäßig ☐ schlecht
Begründung: Klicken oder tippen Sie hier, um Text einzugeben.
6. **Haben Sie störende Verzögerungen/Latenzen empfunden?**
☐ ja, starke ☐ ja, wenig ☐ nein
7. **Wie bewerten Sie die höherfrequenten Schwingungen des Steuerknüppels?**
☐ sehr gut ☐ gut ☐ mittelmäßig ☐ schlecht
Begründung: Klicken oder tippen Sie hier, um Text einzugeben.

8. Wie bewerten Sie die Steuerauslenkung?

☐ realistisch ☐ zu empfindlich ☐ nicht empfindlich genug

Begründung: Klicken oder tippen Sie hier, um Text einzugeben.

9. Wie bewerten Sie das allgemeine Verhalten des Steuerkraftsystems während des Starts?

☐ sehr gut ☐ gut ☐ mittelmäßig ☐ schlecht

Begründung: Klicken oder tippen Sie hier, um Text einzugeben.

10. Wie bewerten Sie das allgemeine Verhalten des Steuerkraftsystems während des Geradeausfluges?

☐ sehr gut ☐ gut ☐ mittelmäßig ☐ schlecht

Begründung: Klicken oder tippen Sie hier, um Text einzugeben.

11. Wie bewerten Sie das allgemeine Verhalten des Steuerkraftsystems während des Kurvenflugs?

☐ sehr gut ☐ gut ☐ mittelmäßig ☐ schlecht

Begründung: Klicken oder tippen Sie hier, um Text einzugeben.

12. Wie bewerten Sie das allgemeine Verhalten des Steuerkraftsystems während der Landung?

☐ sehr gut ☐ gut ☐ mittelmäßig ☐ schlecht

Begründung: Klicken oder tippen Sie hier, um Text einzugeben.

13. Würden Sie das WCLS im aktuellen Stand dem MAGSI vorziehen? (Falls Sie beide Systeme kennen)

☐ ja ☐ nein, ich würde keines dem anderen gegenüber vorziehen
☐ nein, ich würde das MAGSI dem WCLS vorziehen

Begründung: Klicken oder tippen Sie hier, um Text einzugeben.

14. Welche Aspekte könnten die Charakteristik der erbrachten Steuerkräfte verbessern? (Mehrfachnennung möglich)

☐ bessere Darstellung hochfrequenter Schwingungen

☐ höhere Intensität der Steuerkräfte

☐ geringere Latenz

☐ keine Verbesserungen nötig

☐ andere Aspekte: Klicken oder tippen Sie hier, um Text einzugeben.

15. Haben Sie noch weitere Anmerkungen oder Verbesserungsvorschläge?

Klicken oder tippen Sie hier, um Text einzugeben.

Vielen Dank für Ihre Mitarbeit!

Anhang D.

Von Probanden der Testkampagne ausgefüllte Fragebögen

D.1. Fragebogen von Test 1

Auswertung der Eignung des Steuerkraftsystems WITTENSTEIN Control Loading System für den Einsatz in einem Tragschrauber-Simulator

Sehr geehrte Teilnehmer/innen,

Sie nahmen an Tests eines Steuerkraftsystems der Firma Wittenstein teil. Ziel dieser Tests ist die Evaluierung der möglichen Verwendung dieses Systems in einem Tragschrauber-Simulator. Bei der Konstruktion, in dem das Steuerkraftsystem zurzeit verbaut ist, handelt es sich lediglich um einen Teststand. Um beurteilen zu können, wie stark das Verhalten des Systems subjektiv von dem erwarteten haptischen Feedback eines Tragschraubers abweicht, werden alle Teilnehmenden bezüglich ihrer Einschätzung des Systems befragt. Bitte fokussieren Sie sich in der Beantwortung der folgenden Fragen auf das Verhalten und die erbrachten Leistungen des verwendeten Steuerkraftsystems. Die Simulationsgüte des gesamten Teststandes soll nicht bewertet werden.

1. **Besitzen Sie eine Lizenz für das Fliegen von Tragschraubern?**
☒ ja ☐ nein
2. **Besitzen Sie andere fliegerische Vorkenntnisse (bspw. Lizenzen)? Wenn ja, welche?**
☒ keine anderen Vorkenntnisse
☐ fliegerische Vorkenntnisse:
Klicken oder tippen Sie hier, um Text einzugeben.
3. **Wie viele Tragschrauber-Flugstunden absolvierten Sie schätzungsweise im letzten Jahr?**
10
4. **Sind Sie bereits im Tragschrauber-Simulator des DLR (Steuerkraftsystem MAGSI) geflogen?**
☒ ja ☐ nein

Technische Fragen zum WCLS:

5. **Wie bewerten Sie die Intensität der vom WCLS dargestellten Steuerkräfte?**
☐ sehr gut ☐ gut ☒ mittelmäßig ☐ schlecht
Begründung: sehr (unnatürlich) kräftig bei üblichen Ausschlägen, um die Mittellage zu indifferent schwamig
6. **Haben Sie störende Verzögerungen/Latenzen empfunden?**
☐ ja, starke ☒ ja, wenig ☐ nein
7. **Wie bewerten Sie die höherfrequenten Schwingungen des Steuerknüppels?**
☐ sehr gut ☒ gut ☐ mittelmäßig ☐ schlecht

Begründung: vorhanden, nicht störend, in der Realität etwas präsenter als im Simulator

8. Wie bewerten Sie die Steuerauslenkung?

- ☐ realistisch ☐ zu empfindlich ☒ nicht empfindlich genug

Begründung: im echten Flugsystem gelingt die Steuerung etwas präziser. Kann nicht genau sagen, ob das an der Empfindlichkeit oder an der fehlenden Motion im Sim. liegt.

9. Wie bewerten Sie das allgemeine Verhalten des Steuerkraftsystems während des Starts?

- ☐ sehr gut ☐ gut ☒ mittelmäßig ☐ schlecht

Begründung: die Kraft war eher (stark) vorhanden, hat aber nicht gut zu den Bewegungen des Tragschraubers gepasst.

10. Wie bewerten Sie das allgemeine Verhalten des Steuerkraftsystems während des Geradeausfluges?

- ☐ sehr gut ☐ gut ☒ mittelmäßig ☐ schlecht

Begründung: Rollachse schwammig, Nickachse einigermaßen präzise, Kräfte sehr hoch

11. Wie bewerten Sie das allgemeine Verhalten des Steuerkraftsystems während des Kurvenflugs?

- ☐ sehr gut ☐ gut ☐ mittelmäßig ☒ schlecht

Begründung: sehr starkes/kräftiges Ziehen erforderlich, um Höhe zu halten

12. Wie bewerten Sie das allgemeine Verhalten des Steuerkraftsystems während der Landung?

- ☐ sehr gut ☐ gut ☒ mittelmäßig ☐ schlecht

Begründung: starke Kräfte (zu kräftig)

13. Würden Sie das WCLS im aktuellen Stand dem MAGSI vorziehen? (Falls Sie beide Systeme kennen)

- ☐ ja ☐ nein, ich würde keines dem anderen gegenüber vorziehen
☒ nein, ich würde das MAGSI dem WCLS vorziehen

Begründung: momentan auf Grund der Kräfte, besserer Sichteindruck beim MAGSI-Simulator beeinflusst den Gesamteindruck möglicherweise

14. Welche Aspekte könnten die Charakteristik der erbrachten Steuerkräfte verbessern? (Mehrfachnennung möglich)

- ☒ bessere Darstellung hochfrequenter Schwingungen
☐ höhere Intensität der Steuerkräfte
☒ geringere Latenz
☐ keine Verbesserungen nötig
☒ andere Aspekte: geringe Intensität der Steuerkräfte bei großen Ausschlägen, ohne die Kraft bei kleinen Ausschlägen zu verringern

15. Haben Sie noch weitere Anmerkungen oder Verbesserungsvorschläge?

Durch den kleinen Monitor und die schlechte Auflösung des Weltmodells ist das Situationsbewusstsein/ die Orientierung sehr schwer. Das könnte man für die Tests verbessern?

Vielen Dank für Ihre Mitarbeit!

D.2. Fragebogen von Test 2

Auswertung der Eignung des Steuerkraftsystems WITTENSTEIN Control Loading System für den Einsatz in einem Tragschrauber-Simulator

Sehr geehrte Teilnehmer/innen,

Sie nahmen an Tests eines Steuerkraftsystems der Firma Wittenstein teil. Ziel dieser Tests ist die Evaluierung der möglichen Verwendung dieses Systems in einem Tragschrauber-Simulator. Bei der Konstruktion, in dem das Steuerkraftsystem zurzeit verbaut ist, handelt es sich lediglich um einen Teststand. Um beurteilen zu können, wie stark das Verhalten des Systems subjektiv von dem erwarteten haptischen Feedback eines Tragschraubers abweicht, werden alle Teilnehmenden bezüglich ihrer Einschätzung des Systems befragt. Bitte fokussieren Sie sich in der Beantwortung der folgenden Fragen auf das Verhalten und die erbrachten Leistungen des verwendeten Steuerkraftsystems. Die Simulationsgüte des gesamten Teststandes soll nicht bewertet werden.

1. **Besitzen Sie eine Lizenz für das Fliegen von Tragschraubern?**
☒ ja ☐ nein
2. **Besitzen Sie andere fliegerische Vorkenntnisse (bspw. Lizenzen)? Wenn ja, welche?**
☒ keine anderen Vorkenntnisse
☐ fliegerische Vorkenntnisse:
Klicken oder tippen Sie hier, um Text einzugeben.
3. **Wie viele Tragschrauber-Flugstunden absolvierten Sie schätzungsweise im letzten Jahr?**
Nur mitgeflogen und in der Luft gesteuert, ca. 2h
4. **Sind Sie bereits im Tragschrauber-Simulator des DLR (Steuerkraftsystem MAGSI) geflogen?**
☒ ja ☐ nein

Technische Fragen zum WCLS:

5. **Wie bewerten Sie die Intensität der vom WCLS dargestellten Steuerkräfte?**
☐ sehr gut ☐ gut ☒ mittelmäßig ☐ schlecht
Begründung: Klicken oder tippen Sie hier, um Text einzugeben.
6. **Haben Sie störende Verzögerungen/Latenzen empfunden?**
☐ ja, starke ☒ ja, wenig ☐ nein
7. **Wie bewerten Sie die höherfrequenten Schwingungen des Steuerknüppels?**
☐ sehr gut ☐ gut ☒ mittelmäßig ☐ schlecht
Begründung: Klicken oder tippen Sie hier, um Text einzugeben.

8. Wie bewerten Sie die Steuerauslenkung?

☐ realistisch ☐ zu empfindlich ☒ nicht empfindlich genug

Begründung: Klicken oder tippen Sie hier, um Text einzugeben.

9. Wie bewerten Sie das allgemeine Verhalten des Steuerkraftsystems während des Starts?

☐ sehr gut ☐ gut ☒ mittelmäßig ☐ schlecht

Begründung: Klicken oder tippen Sie hier, um Text einzugeben.

10. Wie bewerten Sie das allgemeine Verhalten des Steuerkraftsystems während des Geradeausfluges?

☐ sehr gut ☒ gut ☐ mittelmäßig ☐ schlecht

Begründung: Klicken oder tippen Sie hier, um Text einzugeben.

11. Wie bewerten Sie das allgemeine Verhalten des Steuerkraftsystems während des Kurvenfluges?

☐ sehr gut ☐ gut ☒ mittelmäßig ☐ schlecht

Begründung: Klicken oder tippen Sie hier, um Text einzugeben.

12. Wie bewerten Sie das allgemeine Verhalten des Steuerkraftsystems während der Landung?

☐ sehr gut ☐ gut ☒ mittelmäßig ☐ schlecht

Begründung: Klicken oder tippen Sie hier, um Text einzugeben.

13. Würden Sie das WCLS im aktuellen Stand dem MAGSI vorziehen? (Falls Sie beide Systeme kennen)

☐ ja ☐ nein, ich würde keines dem anderen gegenüber vorziehen
☒ nein, ich würde das MAGSI dem WCLS vorziehen

Begründung: Klicken oder tippen Sie hier, um Text einzugeben.

14. Welche Aspekte könnten die Charakteristik der erbrachten Steuerkräfte verbessern? (Mehrfachnennung möglich)

☐ bessere Darstellung hochfrequenter Schwingungen
☐ höhere Intensität der Steuerkräfte
☐ geringere Latenz
☐ keine Verbesserungen nötig
☒ andere Aspekte: Insgesamt noch nicht ganz stimmig, dynamische Bewegungen werden noch nicht gut abgebildet

15. Haben Sie noch weitere Anmerkungen oder Verbesserungsvorschläge?

Klicken oder tippen Sie hier, um Text einzugeben.

Vielen Dank für Ihre Mitarbeit!

D.3. Fragebogen von Test 3

Auswertung der Eignung des Steuerkraftsystems WITTENSTEIN Control Loading System für den Einsatz in einem Tragschrauber-Simulator

Sehr geehrte Teilnehmer/innen,

Sie nahmen an Tests eines Steuerkraftsystems der Firma Wittenstein teil. Ziel dieser Tests ist die Evaluierung der möglichen Verwendung dieses Systems in einem Tragschrauber-Simulator. Bei der Konstruktion, in dem das Steuerkraftsystem zurzeit verbaut ist, handelt es sich lediglich um einen Teststand. Um beurteilen zu können, wie stark das Verhalten des Systems subjektiv von dem erwarteten haptischen Feedback eines Tragschraubers abweicht, werden alle Teilnehmenden bezüglich ihrer Einschätzung des Systems befragt. Bitte fokussieren Sie sich in der Beantwortung der folgenden Fragen auf das Verhalten und die erbrachten Leistungen des verwendeten Steuerkraftsystems. Die Simulationsgüte des gesamten Teststandes soll nicht bewertet werden.

1. **Besitzen Sie eine Lizenz für das Fliegen von Tragschraubern?**
☒ ja ☐ nein
2. **Besitzen Sie andere fliegerische Vorkenntnisse (bspw. Lizenzen)? Wenn ja, welche?**
☐ keine anderen Vorkenntnisse
☒ fliegerische Vorkenntnisse:
PPL-C, UL
3. **Wie viele Tragschrauber-Flugstunden absolvierten Sie schätzungsweise im letzten Jahr?**
20
4. **Sind Sie bereits im Tragschrauber-Simulator des DLR (Steuerkraftsystem MAGSI) geflogen?**
☒ ja ☐ nein

Technische Fragen zum WCLS:

5. **Wie bewerten Sie die Intensität der vom WCLS dargestellten Steuerkräfte?**
☐ sehr gut ☒ gut ☐ mittelmäßig ☐ schlecht
Begründung: Klicken oder tippen Sie hier, um Text einzugeben.
6. **Haben Sie störende Verzögerungen/Latenzen empfunden?**
☐ ja, starke ☐ ja, wenig ☒ nein
7. **Wie bewerten Sie die höherfrequenten Schwingungen des Steuerknüppels?**
☐ sehr gut ☐ gut ☒ mittelmäßig ☐ schlecht
Begründung: Intensität zu gering (Kraft und Weg)

8. Wie bewerten Sie die Steuerauslenkung?

☒ realistisch ☐ zu empfindlich ☐ nicht empfindlich genug

Begründung: Klicken oder tippen Sie hier, um Text einzugeben.

9. Wie bewerten Sie das allgemeine Verhalten des Steuerkraftsystems während des Starts?

☐ sehr gut ☐ gut ☒ mittelmäßig ☐ schlecht

Begründung: Die Schwingung am Boden bei noch stillstehendem Rotor ist zu stark; beim Aufnicken ist die Steuerkraft zu gering.

10. Wie bewerten Sie das allgemeine Verhalten des Steuerkraftsystems während des Geradeausfluges?

☐ sehr gut ☒ gut ☐ mittelmäßig ☐ schlecht

Begründung: Klicken oder tippen Sie hier, um Text einzugeben.

11. Wie bewerten Sie das allgemeine Verhalten des Steuerkraftsystems während des Kurvenfluges?

☐ sehr gut ☒ gut ☐ mittelmäßig ☐ schlecht

Begründung: Klicken oder tippen Sie hier, um Text einzugeben.

12. Wie bewerten Sie das allgemeine Verhalten des Steuerkraftsystems während der Landung?

☒ sehr gut ☐ gut ☐ mittelmäßig ☐ schlecht

Begründung: Klicken oder tippen Sie hier, um Text einzugeben.

13. Würden Sie das WCLS im aktuellen Stand dem MAGSI vorziehen? (Falls Sie beide Systeme kennen)

☐ ja ☒ nein, ich würde keines dem anderen gegenüber vorziehen

☐ nein, ich würde das MAGSI dem WCLS vorziehen

Begründung: Klicken oder tippen Sie hier, um Text einzugeben.

14. Welche Aspekte könnten die Charakteristik der erbrachten Steuerkräfte verbessern? (Mehrfachnennung möglich)

☒ bessere Darstellung hochfrequenter Schwingungen

☒ höhere Intensität der Steuerkräfte

☐ geringere Latenz

☐ keine Verbesserungen nötig

☐ andere Aspekte: Klicken oder tippen Sie hier, um Text einzugeben.

15. Haben Sie noch weitere Anmerkungen oder Verbesserungsvorschläge?

Die Intensität der Steuerkräfte sollte hauptsächlich/nur im Start höher sein. Der Simulator könnte durch eine bessere Anordnung der Knöpfe verbessert werden.

Vielen Dank für Ihre Mitarbeit!

D.4. Fragebogen von Test 4

Auswertung der Eignung des Steuerkraftsystems WITTENSTEIN Control Loading System für den Einsatz in einem Tragschrauber-Simulator

Sehr geehrte Teilnehmer/innen,

Sie nahmen an Tests eines Steuerkraftsystems der Firma Wittenstein teil. Ziel dieser Tests ist die Evaluierung der möglichen Verwendung dieses Systems in einem Tragschrauber-Simulator. Bei der Konstruktion, in dem das Steuerkraftsystem zurzeit verbaut ist, handelt es sich lediglich um einen Teststand. Um beurteilen zu können, wie stark das Verhalten des Systems subjektiv von dem erwarteten haptischen Feedback eines Tragschraubers abweicht, werden alle Teilnehmenden bezüglich ihrer Einschätzung des Systems befragt. Bitte fokussieren Sie sich in der Beantwortung der folgenden Fragen auf das Verhalten und die erbrachten Leistungen des verwendeten Steuerkraftsystems. Die Simulationsgüte des gesamten Teststandes soll nicht bewertet werden.

1. **Besitzen Sie eine Lizenz für das Fliegen von Tragschraubern?**
☒ ja ☐ nein
2. **Besitzen Sie andere fliegerische Vorkenntnisse (bspw. Lizenzen)? Wenn ja, welche?**
☒ keine anderen Vorkenntnisse
☐ fliegerische Vorkenntnisse:
Klicken oder tippen Sie hier, um Text einzugeben.
3. **Wie viele Tragschrauber-Flugstunden absolvierten Sie schätzungsweise im letzten Jahr?**
0
4. **Sind Sie bereits im Tragschrauber-Simulator des DLR (Steuerkraftsystem MAGSI) geflogen?**
☒ ja ☐ nein

Technische Fragen zum WCLS:

5. **Wie bewerten Sie die Intensität der vom WCLS dargestellten Steuerkräfte?**
☐ sehr gut ☒ gut ☐ mittelmäßig ☐ schlecht
Begründung: Die Kraft in der Rollachse wirkt etwas hoch.
6. **Haben Sie störende Verzögerungen/Latenzen empfunden?**
☐ ja, starke ☐ ja, wenig ☒ nein
7. **Wie bewerten Sie die höherfrequenten Schwingungen des Steuerknüppels?**
☐ sehr gut ☐ gut ☒ mittelmäßig ☐ schlecht
Begründung: Die Amplitude könnte höher sein. Frequenz ist gut.

8. Wie bewerten Sie die Steuerauslenkung?

☒ realistisch ☐ zu empfindlich ☐ nicht empfindlich genug

Begründung: Der Hebel ist etwas gewöhnungsbedürftig. Die Sitzposition ist zu weit weg.

9. Wie bewerten Sie das allgemeine Verhalten des Steuerkraftsystems während des Starts?

☐ sehr gut ☒ gut ☐ mittelmäßig ☐ schlecht

Zu Begründung: Zu starke Schwingung im Stand ohne Motor.

10. Wie bewerten Sie das allgemeine Verhalten des Steuerkraftsystems während des Geradeausfluges?

☒ sehr gut ☐ gut ☐ mittelmäßig ☐ schlecht

Begründung: Klicken oder tippen Sie hier, um Text einzugeben.

11. Wie bewerten Sie das allgemeine Verhalten des Steuerkraftsystems während des Kurvenflugs?

☐ sehr gut ☒ gut ☐ mittelmäßig ☐ schlecht

Begründung: Klicken oder tippen Sie hier, um Text einzugeben.

12. Wie bewerten Sie das allgemeine Verhalten des Steuerkraftsystems während der Landung?

☐ sehr gut ☒ gut ☐ mittelmäßig ☐ schlecht

Begründung: Klicken oder tippen Sie hier, um Text einzugeben.

13. Würden Sie das WCLS im aktuellen Stand dem MAGSI vorziehen? (Falls Sie beide Systeme kennen)

☒ ja ☐ nein, ich würde keines dem anderen gegenüber vorziehen

☐ nein, ich würde das MAGSI dem WCLS vorziehen

Begründung: Klicken oder tippen Sie hier, um Text einzugeben.

14. Welche Aspekte könnten die Charakteristik der erbrachten Steuerkräfte verbessern? (Mehrfachnennung möglich)

☒ bessere Darstellung hochfrequenter Schwingungen

☐ höhere Intensität der Steuerkräfte

☐ geringere Latenz

☐ keine Verbesserungen nötig

☐ andere Aspekte: Klicken oder tippen Sie hier, um Text einzugeben.

15. Haben Sie noch weitere Anmerkungen oder Verbesserungsvorschläge?

Ein anderer Steuerknüppel mit kürzerem Hebel würde mehr Realismus bringen.

Andere Sitzposition wäre besser.

Vielen Dank für Ihre Mitarbeit!

D.5. Fragebogen von Test 5

Auswertung der Eignung des Steuerkraftsystems WITTENSTEIN Control Loading System für den Einsatz in einem Tragschrauber-Simulator

Sehr geehrte Teilnehmer/innen,

Sie nehmen an Tests eines Steuerkraftsystems der Firma Wittenstein teil. Ziel dieser Tests ist die Evaluierung der möglichen Verwendung dieses Systems in einem Tragschrauber-Simulator. Bei der Konstruktion, in dem das Steuerkraftsystem zurzeit verbaut ist, handelt es sich lediglich um einen Teststand. Um beurteilen zu können, wie stark das Verhalten des Systems subjektiv von dem erwarteten haptischen Feedback eines Tragschraubers abweicht, werden alle Teilnehmenden bezüglich ihrer Einschätzung des Systems befragt. Bitte fokussieren Sie sich in der Beantwortung der folgenden Fragen auf das Verhalten und die erbrachten Leistungen des verwendeten Steuerkraftsystems. Die Simulationsgüte des gesamten Teststandes soll nicht bewertet werden.

1. **Besitzen Sie eine Lizenz für das Fliegen von Tragschraubern?**
☒ ja ☐ nein
2. **Besitzen Sie andere fliegerische Vorkenntnisse (bspw. Lizenzen)? Wenn ja, welche?**
☐ keine anderen Vorkenntnisse
☒ fliegerische Vorkenntnisse:
Drohnen Sicherheitspilot-Modellflug in allen Sparten
3. **Wie viele Tragschrauber-Flugstunden absolvierten Sie schätzungsweise im letzten Jahr?**
Zur Zeit keine
4. **Sind Sie bereits im Tragschrauber-Simulator des DLR (Steuerkraftsystem MAGSI) geflogen?**
☒ ja ☐ nein

Technische Fragen zum WCLS:

5. **Wie bewerten Sie die Intensität der vom WCLS dargestellten Steuerkräfte?**
☒ sehr gut ☐ gut ☐ mittelmäßig ☐ schlecht
Begründung: Klicken oder tippen Sie hier, um Text einzugeben.
6. **Haben Sie störende Verzögerungen/Latenzen empfunden?**
☐ ja, starke ☐ ja, wenig ☒ nein
7. **Wie bewerten Sie die höherfrequenten Schwingungen des Steuerknüppels?**
☒ sehr gut ☐ gut ☐ mittelmäßig ☐ schlecht
Begründung: Klicken oder tippen Sie hier, um Text einzugeben.

8. Wie bewerten Sie die Steuerauslenkung?

☒ realistisch ☐ zu empfindlich ☐ nicht empfindlich genug

Begründung: Klicken oder tippen Sie hier, um Text einzugeben.

9. Wie bewerten Sie das allgemeine Verhalten des Steuerkraftsystems während des Starts?

☒ sehr gut ☐ gut ☐ mittelmäßig ☐ schlecht

Begründung: Klicken oder tippen Sie hier, um Text einzugeben.

10. Wie bewerten Sie das allgemeine Verhalten des Steuerkraftsystems während des Geradeausfluges?

☒ sehr gut ☐ gut ☐ mittelmäßig ☐ schlecht

Begründung: Klicken oder tippen Sie hier, um Text einzugeben.

11. Wie bewerten Sie das allgemeine Verhalten des Steuerkraftsystems während des Kurvenflugs?

☒ sehr gut ☐ gut ☐ mittelmäßig ☐ schlecht

Begründung: Klicken oder tippen Sie hier, um Text einzugeben.

12. Wie bewerten Sie das allgemeine Verhalten des Steuerkraftsystems während der Landung?

☒ sehr gut ☐ gut ☐ mittelmäßig ☐ schlecht

Begründung: Klicken oder tippen Sie hier, um Text einzugeben.

13. Würden Sie das WCLS im aktuellen Stand dem MAGSI vorziehen? (Falls Sie beide Systeme kennen)

☐ ja ☒ nein, ich würde keines dem anderen gegenüber vorziehen
☐ nein, ich würde das MAGSI dem WCLS vorziehen

Begründung: Klicken oder tippen Sie hier, um Text einzugeben.

14. Welche Aspekte könnten die Charakteristik der erbrachten Steuerkräfte verbessern? (Mehrfachnennung möglich)

☐ bessere Darstellung hochfrequenter Schwingungen

☐ höhere Intensität der Steuerkräfte

☐ geringere Latenz

☒ keine Verbesserungen nötig

☐ andere Aspekte: Klicken oder tippen Sie hier, um Text einzugeben.

15. Haben Sie noch weitere Anmerkungen oder Verbesserungsvorschläge?

Es fehlen die Seitenruderpedale.

Vielen Dank für Ihre Mitarbeit!

Anhang E.

Messdaten aus den Testflügen

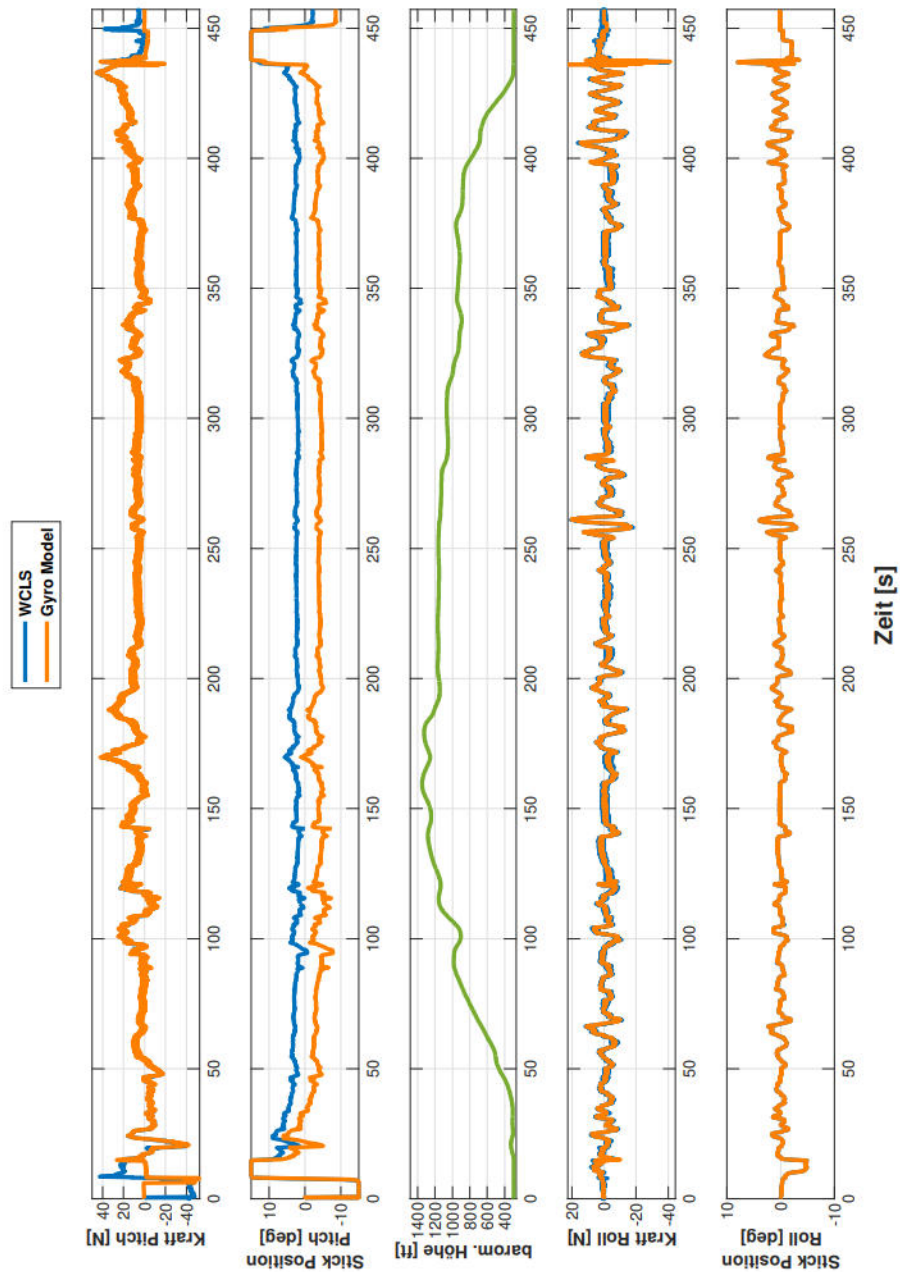


Abbildung E.1.: Aufgezeichnete Daten aus dem ersten Test

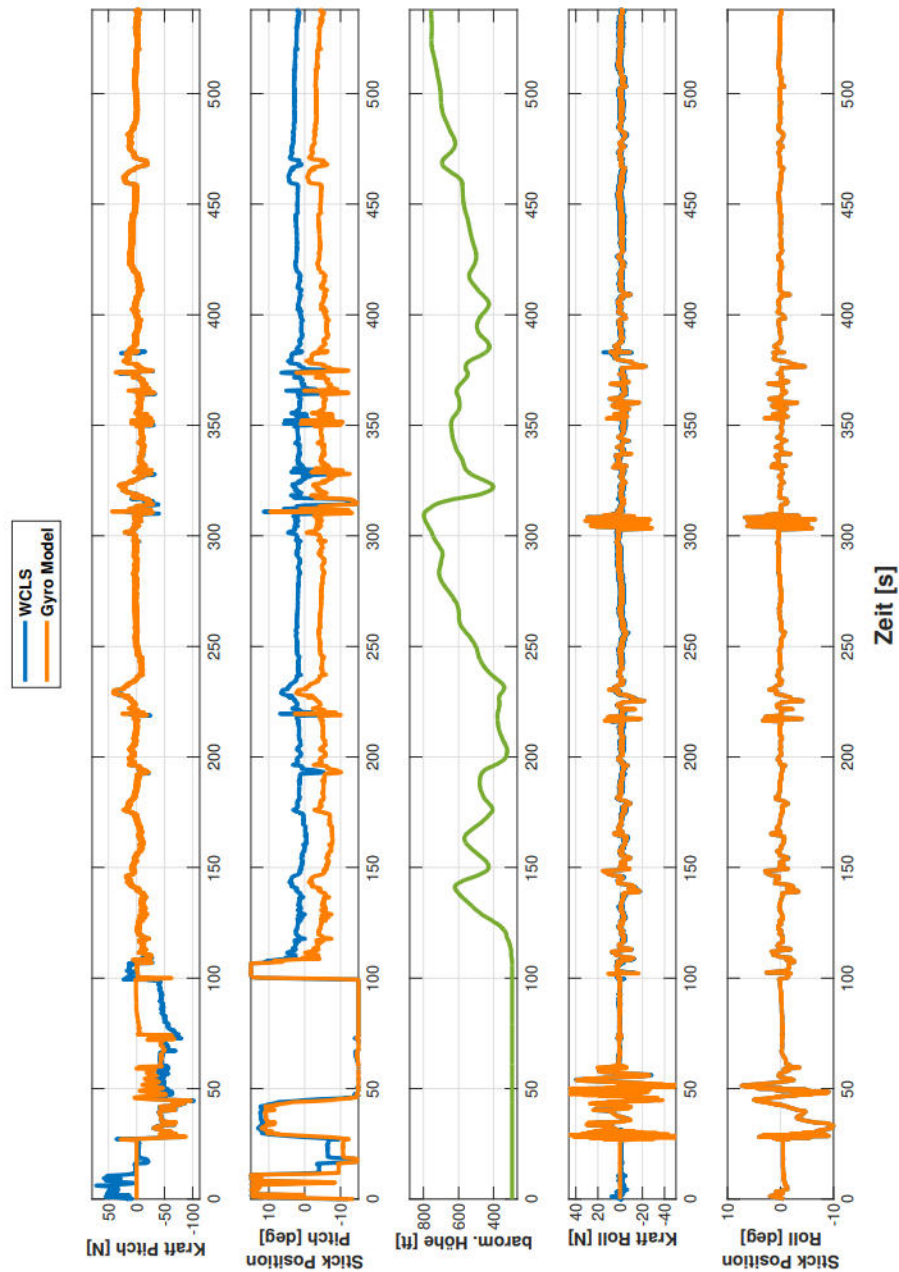


Abbildung E.2.: Aufgezeichnete Daten aus dem zweiten Test: erster Flug

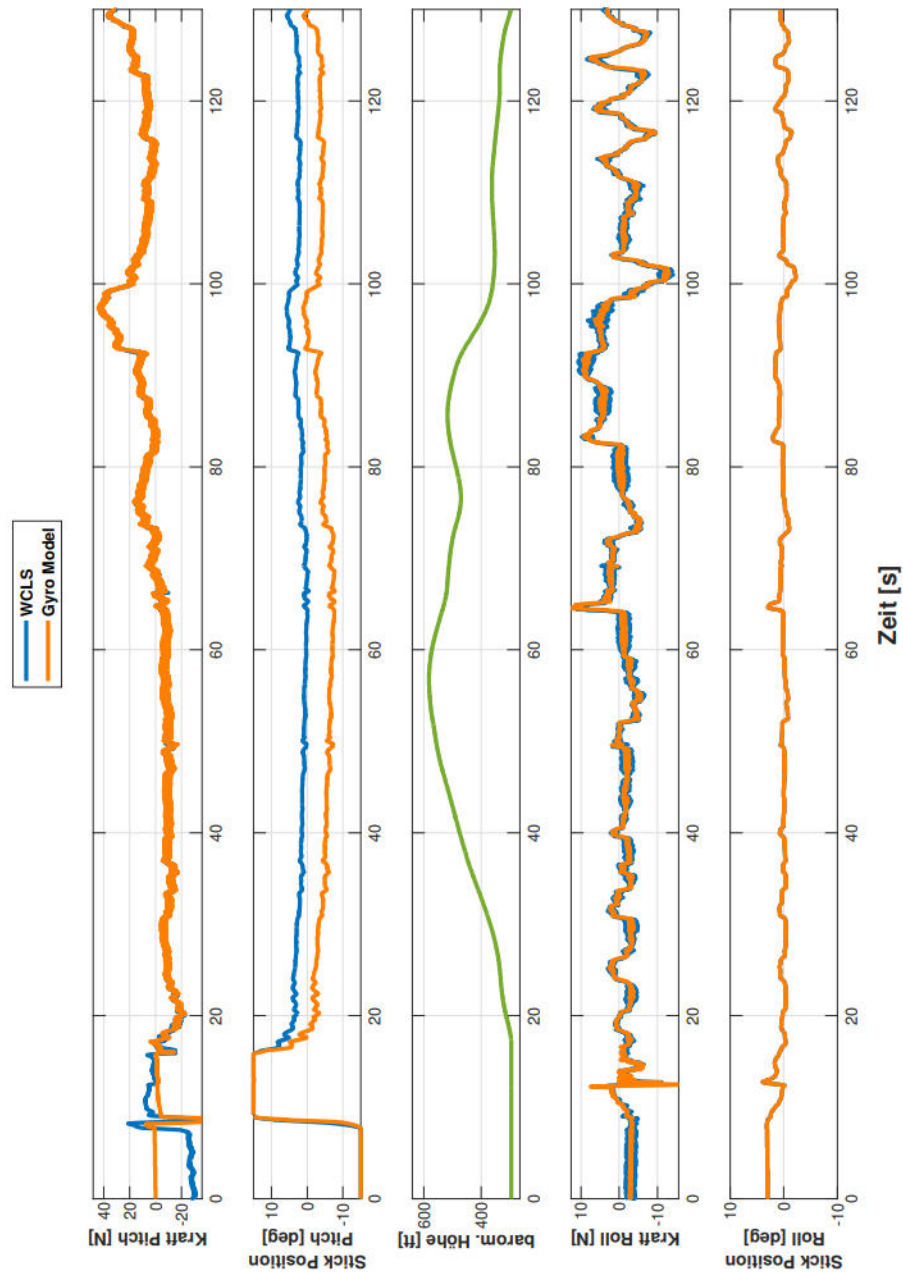


Abbildung E.3.: Aufgezeichnete Daten aus dem zweiten Test: zweiter Flug

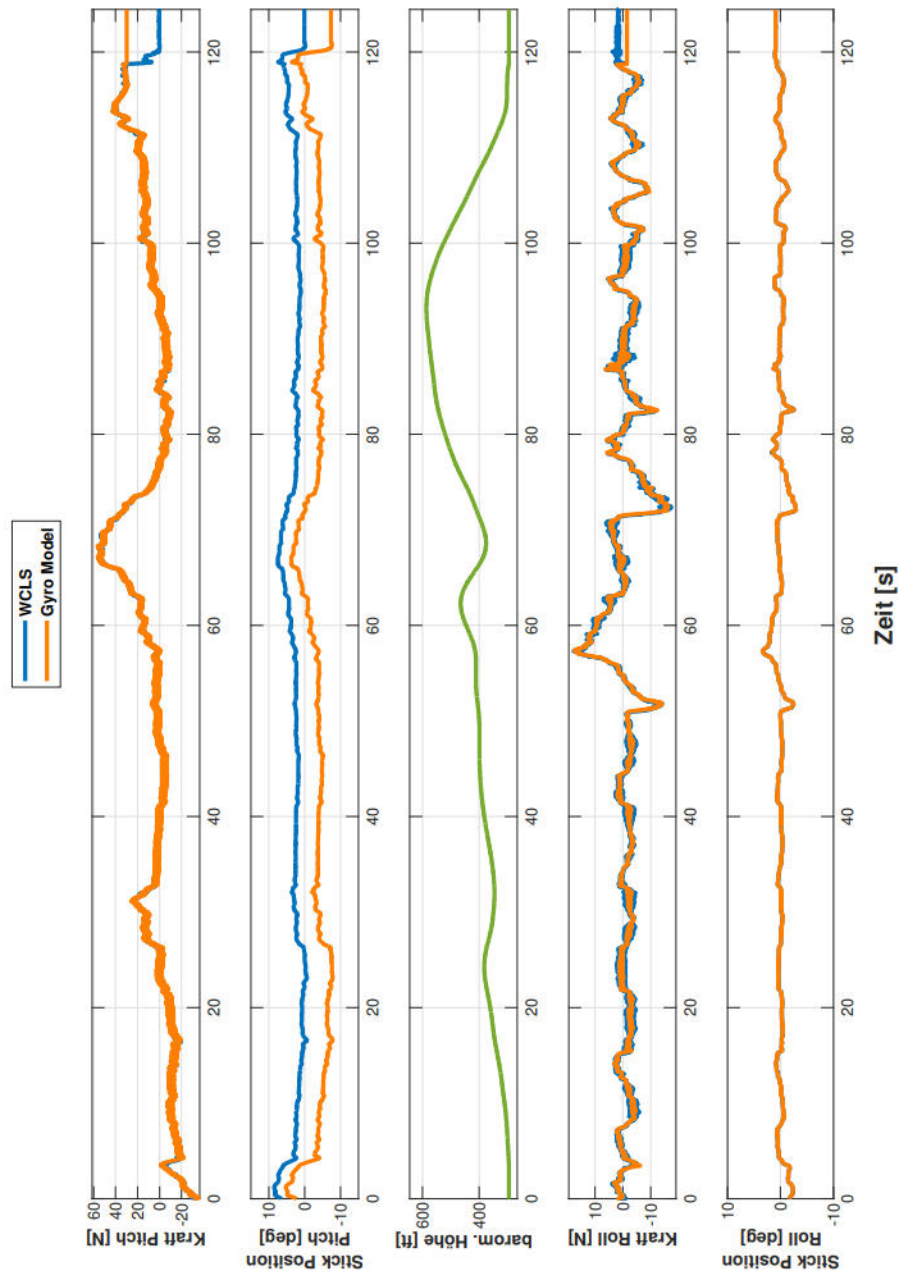


Abbildung E.4.: Aufgezeichnete Daten aus dem zweiten Test: dritter Flug

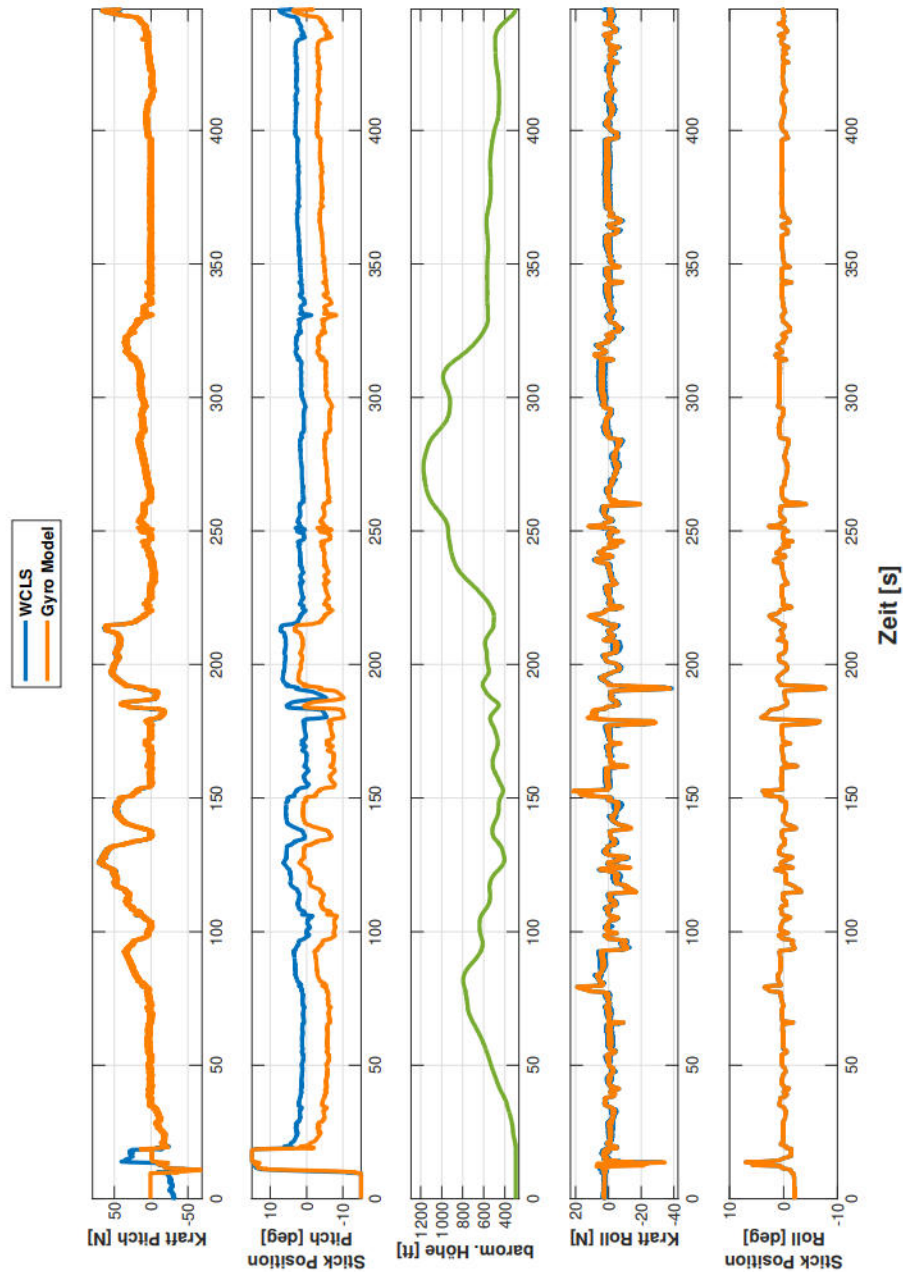


Abbildung E.5.: Aufgezeichnete Daten aus dem dritten Test

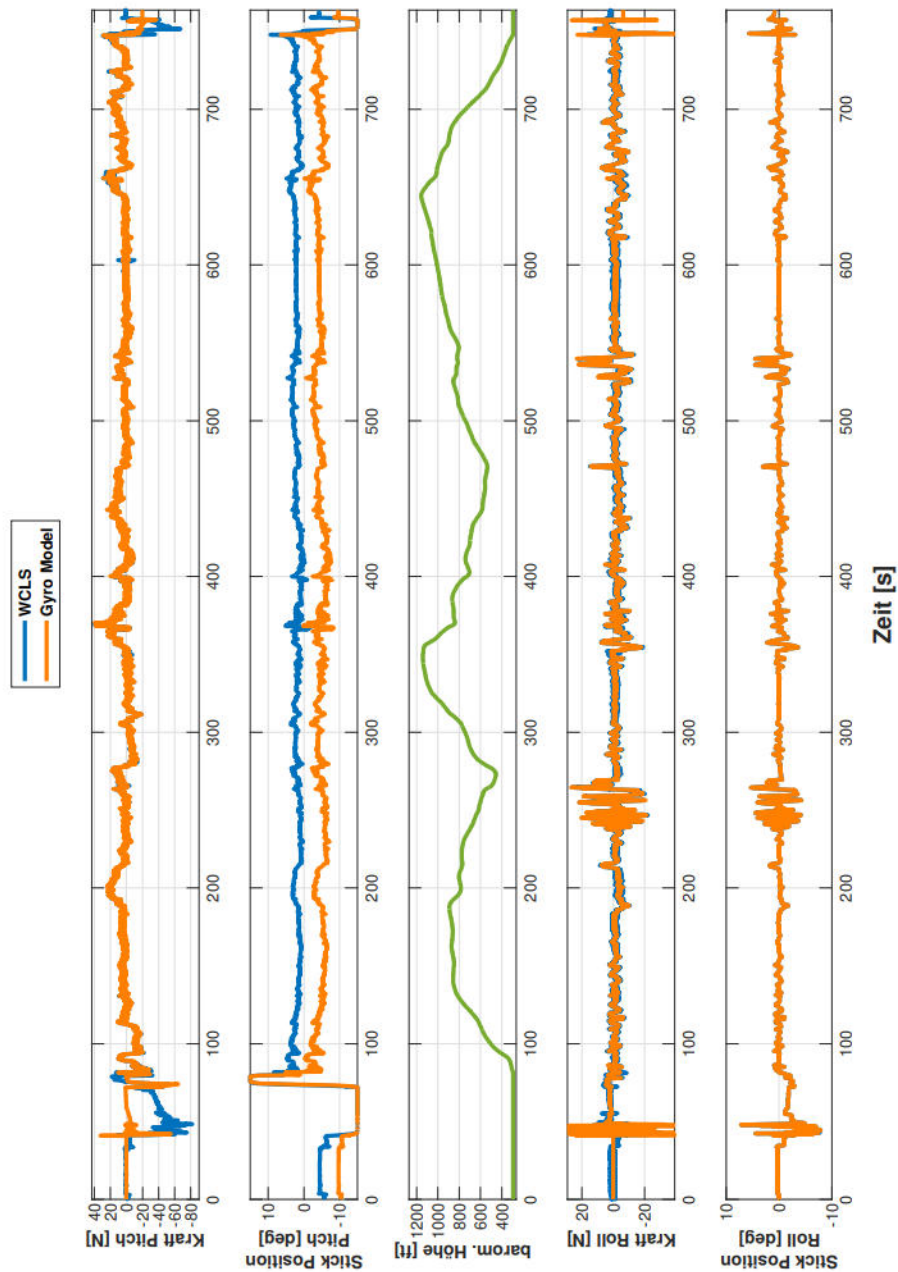


Abbildung E.6.: Aufgezeichnete Daten aus dem vierten Test

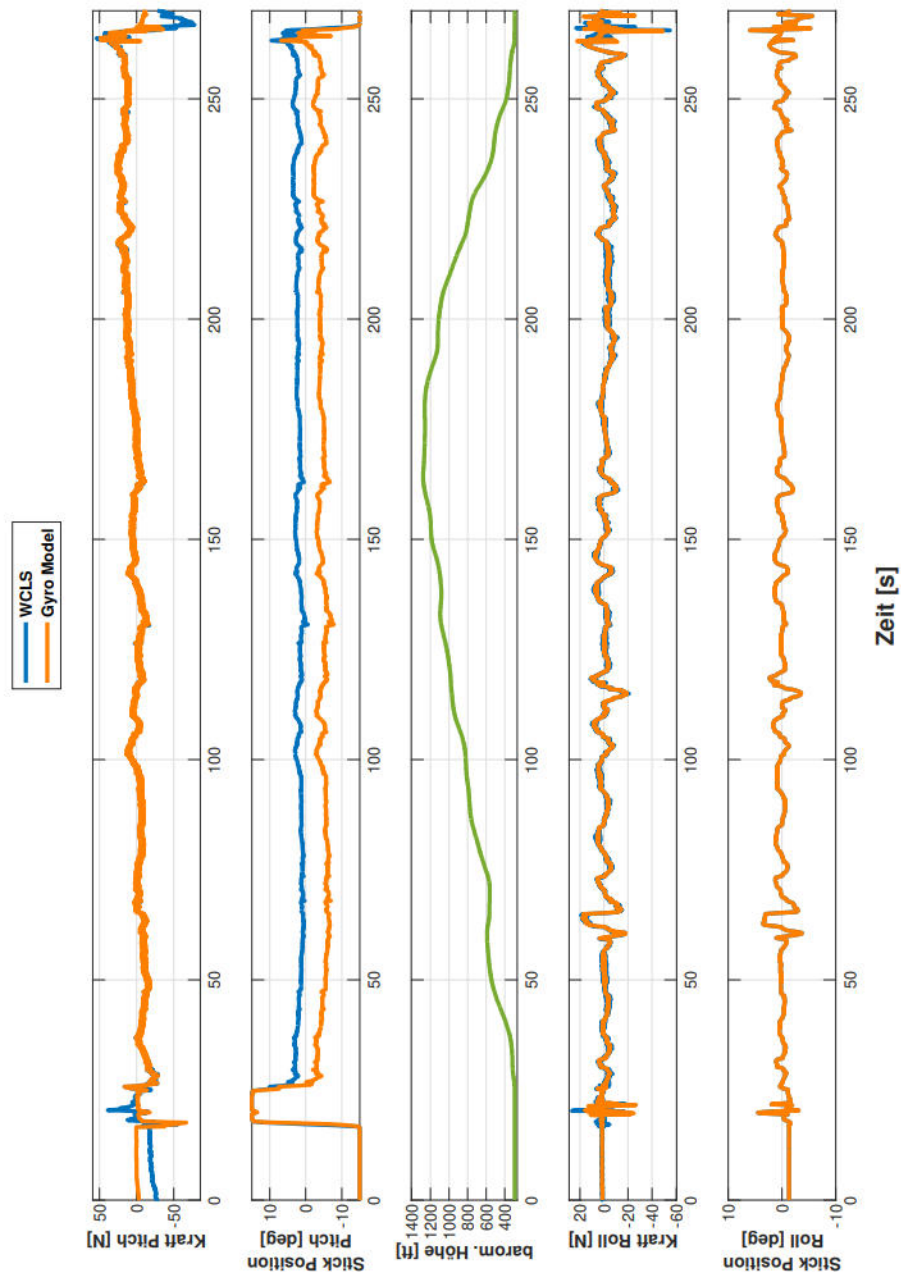


Abbildung E.7.: Aufgezeichnete Daten aus dem fünften Test: erster Flug

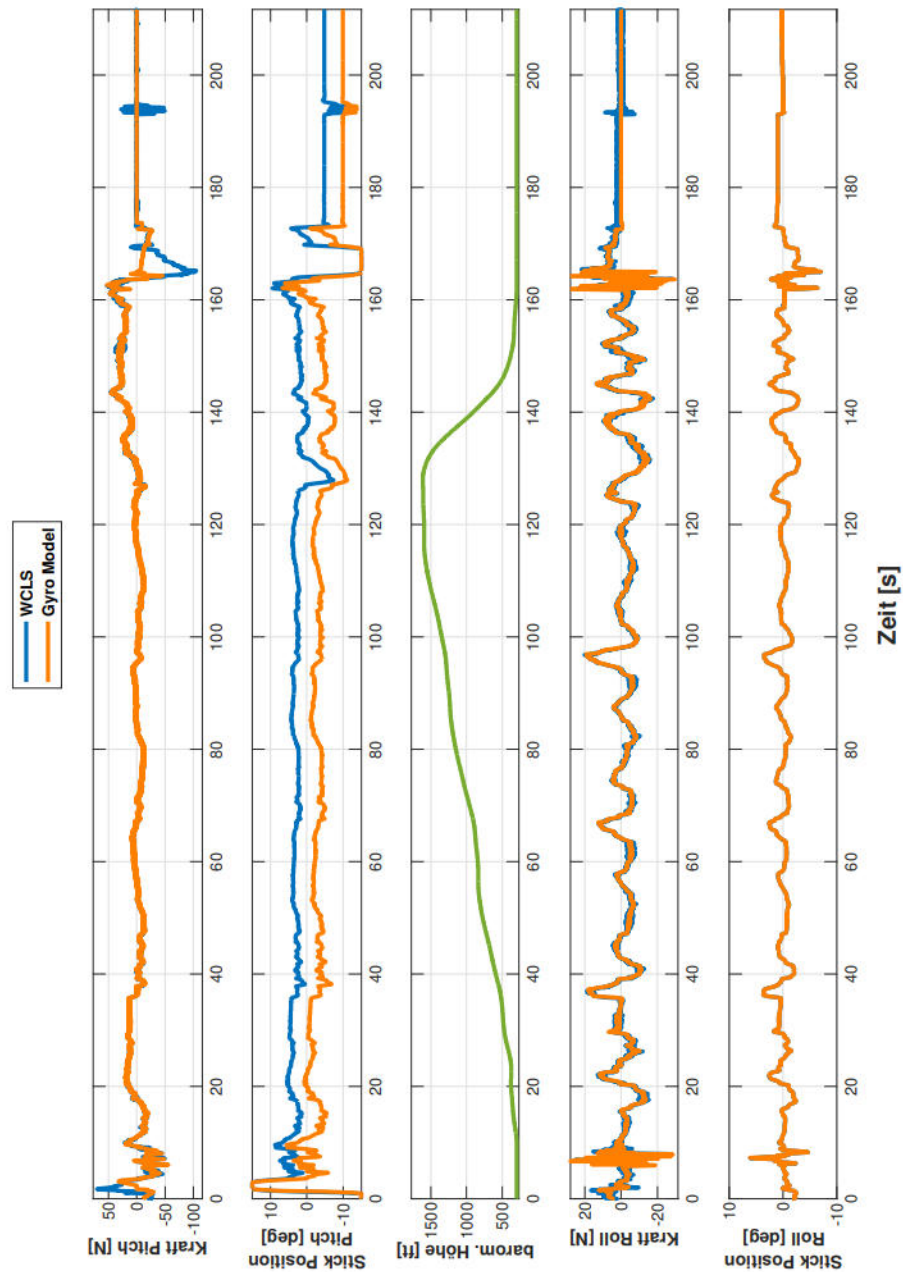


Abbildung E.8.: Aufgezeichnete Daten aus dem fünften Test: zweiter Flug