DLR-IB-FT-BS-2022-22

Optimierung eines Tactile Cues in Hinblick auf Präzision und Steuerkräfte

Interner Bericht
Hochschulschrift

Autorin: Anne-Marie Behrens

DLR Deutsches Zentrum für Luft- und Raumfahrt

Institutsbericht
IB 111-2022/22

Optimierung eines Tactile Cues in Hinblick auf Präzision und Steuerkräfte

Anne-Marie Behrens

Institut für Flugsystemtechnik
Braunschweig

116 Seiten
21 Abbildungen
13 Tabellen
66 Referenzen

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

Stufe der Zugänglichkeit: II, DLR intern zugänglich: analog "allgemein zugänglich", allerdings ist dieser in ELIB nur für intern zugänglich abzulegen.

Braunschweig, den 13.12.2022

Unterschriften:

Stellvertretender Institutsdirektor:	Prof. Dr.-Ing. C. Keßler	Digital signiert von Christoph Keßler DN: OU=DLR-FT, CN=Christoph Keßler, E=christoph.kessler@dlr.de Grund: Ich genehmige dieses Dokument Ort: Foxit PDF Editor Version: 12.0.2
Abteilungsleiter:	Dr.-Ing. K. Pahlke	Digital signiert von Klausdieter Pahlke DN: C=DE, OU=FT-HUB, O=DLR e.V., CN=Klausdieter Pahlke, E=klausdieter.pahlke@dlr.de Grund: Ich genehmige dieses Dokument Ort: Braunschweig Datum: 2022.12.15 17:18:46+01'00' Foxit PDF Editor Version: 12.0.2
Betreuer:	Dipl.-Ing. M. Müllhäuser	Mario Müllhäuser Digital signiert von Mario Müllhäuser DN: OU=FT-HUB, O=DLR, CN=Mario Müllhäuser, E=Mario.Muellhaeuser@dlr.de Grund: Ich habe dieses Dokument geprüft Ort: Braunschweig Datum: 2022.12.13 15:50:14+01'00' Foxit PDF Reader Version: 12.0.1
Autorin	cand. Ing. A. Behrens	bereits ausgeschieden

TECHNISCHE UNIVERSITÄT DRESDEN

Fakultät Verkehrswissenschaften „Friedrich List“, Institut für Luftfahrt und Logistik

Professur für Hubschraubertechnologie, Studiengang Verkehrsingenieurwesen

DIPLOMARBEIT

OPTIMIERUNG EINES TACTILE CUES IN HINBLICK AUF PRÄZISION UND STEUERKRÄFTE

eingereicht von Anne-Marie Behrens

geb. am: 16.01.1989 in: Ludwigslust

Betreuer/in:
- *Prof. Dr.-Ing. Christoph Keßler (TU Dresden und DLR e.V.)*
- *Mario Müllhäuser (DLR e.V.)*
- *Dr.-Ing. Klausdieter Pahlke (DLR e.V.)*

Dresden, den 26. November 2021

.....

Unterschrift der Diplomandin

TECHNISCHE UNIVERSITÄT DRESDEN

Fakultät Verkehrswissenschaften „Friedrich List“, Institut für Luftfahrt und Logistik
Professur für Hubschraubertechnologie

Aufgabenstellung für die Diplomarbeit

im Studiengang:	Verkehrsingenieurswesen
in der Studienrichtung:	Verkehrssystemtechnik und Logistik, Luftverkehr
Name der Studierenden:	**Anne-Marie Behrens**
Matrikelnummer:	3504243

Thema: Optimierung eines tactile Cues in Hinblick auf Präzision und Steuerkräfte

Subject: Optimization of a tactile cue with regard to precision and control force

Einleitung

Die Abteilung Hubschrauber des DLR Instituts für Flugsystemtechnik bearbeitet die Aspekte der Rotorsystem- und Flugsystemtechnik von Hubschraubern und weiteren Drehflüglerkonfigurationen. Zielrichtung der Aktivitäten ist die Unterstützung der Entwicklung neuer Technologien und deren Bewertung im Hinblick auf die Verbesserung der Flugeigenschaften, der Sicherheit, der Wirtschaftlichkeit, der Umweltverträglichkeit und der Missionseffektivität für die Fluggeräte. Eine Technologie im Forschungsfokus ist das aktive Steuerorgan (*Abbildung 1*) und dessen Verwendung für so genanntes tactile Cueing. Tactile Cueing beschreibt die Nutzung der Kraftwahrnehmung zur Übermittlung von Informationen. Dazu können die Kräfte des Steuerorgans situativ gezielt verändert werden, etwa in Form von Stickshakern, aber auch durch die lokale Veränderung der Kraftgradienten und somit Steuerlimits und Führungsinformationen übermittelt werden. Durch die haptische Informationsübermittlung soll der visuelle Wahrnehmungskanal entlastet und die Arbeitsbelastung der Piloten reduziert werden. Ein klassisches Anwendungsbeispiel ist die Torque Protection, bei der dem Piloten durch ein tactile Cue am Kollektivsteuer angezeigt wird, wann das Torque, bzw. Drehmomentenlimit des Hubschrauberantriebs erreicht wird. Das Ziel dieser Funktion ist es, die versehentliche Überschreitung zu verhindern, aber die willentliche Überschreitung im Notfall zuzulassen [1]. Gleichzeitig soll die limitierte Größe, d.h. der Torque, besser ausgenutzt werden können.

Abbildung 1 Aktiver Sidestick

TECHNISCHE UNIVERSITÄT DRESDEN

Fakultät Verkehrswissenschaften „Friedrich List“, Institut für Luftfahrt und Logistik
Professur für Hubschraubertechnologie

Beschreibung der Aufgabe

Derzeit wird erforscht, wie die optimalen Kraftmuster für verschiedene Intentionen aussehen. Die wichtigen Kriterien sind qualitativ die Pilotenbewertung (Systemakzeptanz, Arbeitsbelastung, Vertrauen, Flugeigenschaften) und quantitativ die erreichte Präzision in Bezug auf eine Limiteinhaltung. So wurden z.B. bereits qualitativ die Cue-Formen „Softstop“ und „Shaker“ verglichen [2], die quantitative Beurteilung steht aber noch aus. Ein übergeordnetes Interesse dieser Untersuchungen ist u.a. die Ermittlung der Anforderungen, die sich daraus an die aktiven Steuerorgane ergeben. So haben die bisherigen Untersuchungen gezeigt, dass die tatsächlich aufgetretenen Kräfte weit unter den Maximalkräften gängiger aktiver Steuer lagen. Diese Ergebnisse versprechen Potential für eine Reduktion der geforderten Maximalkräfte zukünftiger aktiver Steuerorgane und einer damit einhergehenden Reduktion von Masse, Bauraum und Leistungsaufnahme. Dies sind entscheidende Größen für die Integrierbarkeit in ein Luftfahrzeugcockpit. Ein Schwerpunkt dieser Arbeit ist daher zunächst die Ermittlung von bestehenden (behördlichen) Anforderungen an Steuerkräfte von Luftfahrzeugen, in erster Linie für Hubschrauber, sowie idealer Weise auch die Begründung für diese Werte. Hier lässt sich ggf. zwischen aktiv aufgebrachten Pilotenkräften und passiven Kräften, bzw. Lasten, etwa Crashlasten oder Force-Fight unterscheiden. Ein weiterer Schwerpunkt ist die Gegenüberstellung mit tatsächlich auftretenden Pilotenkräften, die etwa aus der Literatur, aber auch aus vorhandenen Flugmessdaten ermittelt werden sollen. Dabei soll auch untersucht werden, welche Kräfte durch tactile Cueing aufgetreten sind und welche Präzision dabei erreicht wurde. Der dritte Schwerpunkt liegt auf der Optimierung und Bewertung eines neuen tactile Cue Designs in Bezug auf spezifische Anforderungen, wie etwa die Erhöhung der Präzision, und dem Anwendungszweck, wie etwa zur Warnung oder Führung und der auftretenden Kräfte. Dazu soll ein Experiment in einem der Simulatoren am Standort Braunschweig, z.B. 2PASD (*Abbildung 2*), geplant und durchgeführt werden, in dem mindestens ein neues Design (=Form) für ein tactile Cue bewertet wird, siehe Beispiel-Design in

Abbildung 2 Entwicklungs- und Testumgebung Dual Pilot Active Sidestick Demonstrator (2PASD

Abbildung 3 Dazu sollen idealer Weise auch die Ausprägungen des Cues, wie etwa die Kraft-Intensität, die Weite des Cues insgesamt aber auch einzelner Cue Elemente zueinander optimiert werden. Außerdem sollen verschiedene repräsentative Konditionen betreffend der Cue-Piloten-Interaktion, wie etwa die Zeit, Bewegungsfrequenz und -Amplitude [3] des Cues variiert werden. Abschließend sollen die Ergebnisse dokumentiert und diskutiert werden.

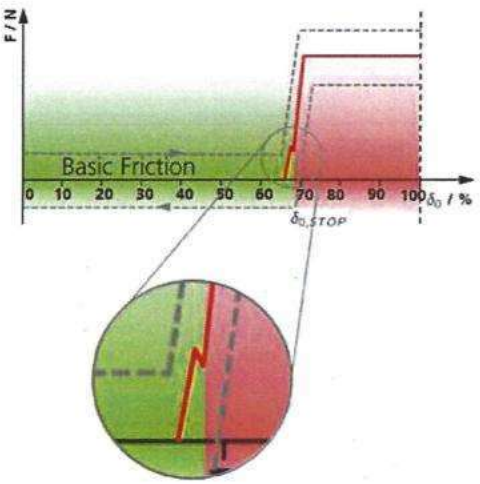


Abbildung 3 *Tactile Cue Design Beispiel*

Arbeitspakete

1) Literaturrecherche, insbesondere Anforderungen an und Annahmen für Steuerkräfte von Luftfahrzeugen und Begründung, bzw. Herkunft der Anforderung wenn möglich, sowie Beispiele für Cueing Kräfte [4, 5, 6, 7, 8, 9]
2) Bestimmung der Steuerkräfte und der Präzision aus vorliegenden Daten eines Simulatorexperiments
3) Gegenüberstellung der Kraftwerte aus der Literatur und der Datenauswertung auf einem Kraftstrahl
4) Optimierung und Bewertung eines tactile Cues in einem der DLR Simulatoren (2PASD [10] oder AVES)
    a. Aufstellen von Anforderungen und einer Versuchsmatrix aus Merkmalen und Ausprägungen, sowie Testkonditionen: Was soll warum wie untersucht werden?
    b. Versuchsvorbereitung und -Durchführung
    c. Datenauswertung
5) Sorgfältige Dokumentation der Ergebnisse gemäß den Vorgaben der prüfenden Fakultät

Literatur

Diese Liste dient der ersten Orientierung und ist nicht exklusiv.

[1] M. Müllhäuser and D. Leißling, “Development and In-Flight Evaluation of a Haptic Torque Protection,” *Journal of the American Helicopter Society*, vol. 64, no. 1, pp. 1–9, Jan. 2019, doi: 10.4050/JAHS.64.012003.

[2] M. Müllhäuser and J. Lusardi, “US-German Joint In-flight and Simulator Evaluation of Collective Tactile Cueing for Torque Limit Avoidance – Shaker vs. Soft Stop,” presented at the Vertical Flight Society’s 76th Annual Forum & Technology Display, online, Oct. 2020.

[3] M. Abildgaard, "Tactile cueing for Vortex Ring State avoidance," PhD Thesis, TU Braunschweig, Braunschweig and Germany, 2013.

[4] SAE International, "Aerospace Active Inceptor Systems for Aircraft Flight and Engine Controls," ARP5764, Feb. 2013.

[5] https://www.easa.europa.eu/regulations

[6] Deutsches Institut für Normung e.V., *Körperkräfte des Menschen - Maximale statische Aktionskräfte (Isodynen)*. Berlin: Beuth Verlag, 1987.

[7] Deutsches Institut für Normung e.V., *Körperkräfte des Menschen - Maximale statische Aktionskräfte (Werte)*. Berlin: Beuth Verlag, 1999.

[8] Deutsches Institut für Normung e.V., *Körperkräfte des Menschen - Begriffe, Zusammenhänge, Bestimmungsgrößen (Werte)*. Berlin: Beuth Verlag, 1982.

[9] R. S. dos Sampaio, "Influence of Variable Inceptor Coupling on Dual Pilot Helicopters using Active Sidesticks," PhD Thesis, Technische Universität Carolo-Wilhelmina zu Braunschweig, 2018.

[10] C. M. U. Dullo, M. Müllhäuser, and R. dos Santos Sampaio, "The Dual Pilot Active Sidestick Demonstrator (2PASD) for Development and Evaluation of Tactile Cueing Functions in a Multicrew Cockpit," in Luft- und Raumfahrt – technologische Brücke in die Zukunft, Darmstadt, Sep. 2019, p. 9.

Betreuer: Prof. Dr.-Ing. Christoph Keßler
Dr.-Ing. Klausdieter Pahlke

Umfang: fünf Monate
Ausgabe:
Abgabe:

Christoph Keßler

Digital signiert von christoph.kessler@dlr.de
DN: CN=christoph.kessler@dlr.de
Grund: Ich bin der Verfasser dieses Dokuments
Ort: Braunschweig
Datum: 2021.05.10 09:43:27+02'00'
Foxit PhantomPDF Version: 10.1.3

Prof. Dr.-Ing. Christoph Keßler

Anne-Marie Behrens

Unterschrift der Studierenden

Bibliographischer Nachweis

Behrens, Anne-Marie

Diplomarbeit

Titel: Optimierung eines tactile Cues in Hinblick auf Präzision und Steuerkräfte

Technische Universität Dresden

Fakultät Verkehrswissenschaften "Friedrich List"

Institut für Luftfahrt und Logistik

Studiengang Verkehrsingenieurwesen

73 Seiten, 21 Abbildungen, 16 Tabellen, 66 Quellengaben, 17 Seiten Anhang

Autorenreferat

In dieser Arbeit werden Ergebnisse zu haptischen Hinweisen (engl. tactile Cues) unter Verwendung aktiver Steuergeräte vorgestellt. Die Hinweise wurden für den Einsatz in Hubschraubern getestet. Zentrales Ziel der Untersuchungen war es, die Genauigkeit von haptischen Hinweisen unter Berücksichtigung bestimmter Anforderungen zu erhöhen. Ein weiteres Ziel war, die auf die aktiven Steuerorgane wirkenden Kräfte zu evaluieren, um diese optieren zu können.

Die auf das Steuersystem wirkenden Körperkräfte wurden mit einem Collective (Sidestick) in einem Hubschraubersimulator untersucht.

Es wird ein Überblick über die für die Flugsteuerung relevanten Hand- und Körperkräfte und deren Einflussfaktoren gegeben.

Die für die Auslegung der Steuersysteme zugrundeliegenden Körperkräfte, die sich aus den Vorschriften der Luftfahrtbehörden ableiten, werden vorgestellt. Ein Vergleich dieser Körperkräfte mit relevanten Messdaten, die im Vorfeld der vorliegenden Untersuchung erhoben wurden, ist enthalten. Neben einer Übersicht über internationale Hersteller werden bisherige und aktuelle Forschungsprojekte zu aktiven Sidesticks vorgestellt.

Weiterhin wird die Vorgehensweise bei der Entwicklung einer neuen tactile Cue Form diskutiert. Eine Studie zur Evaluierung von neuen tactile Cue Formen in einem Hubschraubersimulator wird in diesem Beitrag dokumentiert. Der Ablauf, die Ergebnisse und die Auswertung sind ebenfalls Bestandteil.

Abstract

This paper presents results on tactile cues using active control devices. The cues were tested for use in helicopters. The central aim of the investigations was to increase the accuracy of tactile cues while taking certain requirements into account. Another objective was to evaluate the forces acting on the active control devices in order to be able to optimise them.

The body forces acting on the control system were investigated using a Collective (Sidestick) in a helicopter simulator.

An overview of the hand and body forces relevant for flight control and their influencing factors is given.

The body forces on which the design of the control systems is based, which are derived from the regulations of the aviation authorities, are presented. A comparison of these body forces with relevant measurement data collected in advance of the present investigation is included. In addition, an overview of international manufacturers, previous and current research projects on active sidesticks are presented.

Furthermore, the procedure for the development of a new tactile cue form is discussed. A study on the evaluation of new tactile cue forms in a helicopter simulator is documented in this paper. The procedure, results and evaluation are also included.

Thesen

1. Die Fly-by-Wire Technologie wurde in Helikoptern aufgrund ihrer komplexeren Flugmechanik später eingeführt als bei Starrflüglern.

2. Die Einflussgrößen auf die Köperkräfte des Menschen sind umfangreich und sollten in der Entwicklung von Flugsteuerungssystemen der Zukunft berücksichtigt werden.

3. Die in den Dokumenten CS-27 und CS-29 der Agentur der Europäischen Union für Flugsicherheit, engl. European Union Aviation Safety Agency (EASA), geforderten Steuerkräfte konnten in Folge der Ergebnisse dieser Arbeit nicht reduziert werden.

4. Verschiedene Hersteller von aktiven Steuerorganen stellen für das Tactile Cueing verschiedene Kraftelemente bereit.

INHALTSVERZEICHNIS

Abbildungsverzeichnis xiii

Tabellenverzeichnis xv

Formelverzeichnis xvi

Abkürzungsverzeichnis xviii

1 Einleitung 1

2 Grundlagen 6

2.1 Die Körperkräfte des Menschen 6

2.1.1 Die Aktions- und Reaktionskräfte 8

2.1.2 Die verschiedenen Einflussgrößen auf die maximalen isometrischen Körperkräfte des Menschen 8

2.1.3 Spezifische Werte für Finger- und Handkräfte 14

2.1.4 Verschiedene Piloten-Wahrnehmungen von Handkräften 18

2.1.5 Die aktuellen rechtsgültigen Anforderungen an Helikopter-Steuersysteme (gem. EASA) 19

2.2 Arten der (Helikopter-)Flugsteuerung 22

2.3 Übersicht von Stick-Formen 22

2.4 Der Aktive Sidestick 24

2.4.1 Verschiedene Kraftelemente von aktiven Sidesticks 29

2.5 Hersteller und Luftfahrtforschung 38

3 Gegenüberstellung der rechtsgültigen Kraftwerte aus der Literatur mit aufgezeichneten Messdaten aus einschlägigen Vorexperimenten 41

4 Vorgehen zur Entwicklung neuer tactile Cue-Formen für aktive Sidesticks 45

4.1 Anforderungen an tactile Cues 45

4.1.1 Im Allgemeinen 45

4.1.2 Im Speziellen gem. Aufgabenstellung 46

5 2PASD-Flugsimulatorstudien 50

5.1 Vorbereitung 52
5.2 Fragebögen 52
5.3 Durchführung 54
5.3.1 Flugmanöver 55
5.4 Auswertung 56
5.4.1 Fragebögen 56
5.4.2 Die 2PASD-Datenaufzeichnungen 65
6 Ergebnisdiskussion 70
7 Zusammenfassung und Fazit 73
Literaturverzeichnis I
Anhang VII
* Vergleich von beidhändigen und einhändigen Maximalkräfte im Sitzen - Kapitel *2.1.4 Spezifische Werte für Finger- und Handkräfte* VII
*1. EASA CS-27 Small Rotorcraft Amendment 7 (24.06.2020) – Kapitel *2.1.6 Die aktuellen rechtsgültigen Anforderungen an Helikopter-Steuersysteme (gem. EASA)* VIII
*2. EASA CS-29 Large Rotorcraft Amendment 8 (24.06.2020) – Kapitel *2.1.6 Die aktuellen rechtsgültigen Anforderungen an Helikopter-Steuersysteme (gem. EASA)* XII
*Verwendete Fragebögen - Kapitel *5.2. Fragebögen* XVII

ABBILDUNGSVERZEICHNIS

Abbildung 1: Relativbewegungen von menschlichen Extremitäten 12
Abbildung 2: Legende für verwendete Kraftvektoren 18
Abbildung 3: Übersicht von Piloten-Wahrnehmungen von verschiedenen Handkraftstufen .. 19
Abbildung 4: Arten von Sticks 22
Abbildung 5: Typische mechanische Konfiguration für aktive Steuerorgane mit zwei Achsen 24
Abbildung 6: Piloten-Inceptor-System mit gekoppelten aktiven Sticks 25
Abbildung 7: Geschwindigkeits-Höhen Flug-Enveloppe eines konventionellen Helikopters gegenüber einem Design der Verbundkonstruktion, einem Starrflügel-Turboprop sowie einem Kipprotor 29
Abbildung 8: mechanisches Modell eines Sticks 30
Abbildung 9: Verschiedene Kraftelemente eines aktiven Sidesticks 35
Abbildung 10: Der Softstop als Kraft-Auslenkungs-Kurve und Ball-auf-der-Oberfläche-Analogie 36
Abbildung 11: Gegenüberstellung der Annahmen von Grenzsteuerkräften von Sidesticks in Helikoptern und erhobenen Handkräften aus Studien 41
Abbildung 12: Übersicht von maximalen Kraftwerten im Force Fight und maximalen Steuerkräften im Cockpit (gemäß Richtlinie ADS-33E-PRF) 42
Abbildung 13: Übersicht von erhobenen Handkräften aus Flugmanövern und evaluierten Piloten-Wahrnehmung von Handkräften 43
Abbildung 14: Der Dual Pilot Active Sidestick Demonstrator (2PASD 50
Abbildung 15: Beispiel eines integrierten elektrischen Kontroll-Ladesystems eines Helikoptersimulators 51
Abbildung 16: Übersicht der Antworten der Testpersonen 01 bis 04 für den Fragebogen "Tactile Cueing Quality" - Fragen 1 bis 3 56
Abbildung 17: Übersicht der Antworten der Testpersonen 01 bis 04 für den Fragebogen "Tactile Cueing Quality" - Fragen 4 und 5 57
Abbildung 18: Gegenüberstellung der Mittelwerte und Standardabweichungen aus den 2PASD-Untersuchungen in der Cueing-Variante „Einfacher Softstop“ 67
Abbildung 19: Gegenüberstellung der Mittelwerte und Standardabweichungen aus den 2PASD-Untersuchungen in der Cueing-Variante „Kombinierter Softstop“ 68

Abbildung 20: Gegenüberstellung der Mittelwerte und Standardabweichungen aus den 2PASD-Untersuchungen in der Cueing-Variante „Hardstop“ 69
Abbildung 21: Vergleich von beidhändigen und einhändigen Maximalkräfte im Sitzen..... VII

TABELLENVERZEICHNIS

Tabelle 1: Einflussgrößen auf maximale isometrische Körperkräfte 8
Tabelle 2: Zusammenfassung von Studien der Einflussgröße Alter auf die Körperkräfte 10
Tabelle 3: Dominante Körperhälfte als individuelle Einflussgröße auf die Körperkräfte 13
Tabelle 4: Zusammenfassung von Studien der Einflussgröße Anthropometrie auf die Körperkräfte 14
Tabelle 5: Finger-Hand-Kräfte für die linke und rechte Hand, in sitzender Körperposition 15
Tabelle 6: Tabelle mit empirischen Perzentilen für die Finger-Hand-Kräfte der rechten Hand 17
Tabelle 7: Resultierende Kräfte in sitzender Körperhaltung 17
Tabelle 8: Für Steuerkräfte relevante Kapitel aus den Certification Specifications (CS) 27 und 29 der EASA 20
Tabelle 9: Vor- und Nachteile verschiedener Cue-Formen 35
Tabelle 10: Auszug von Fragebögen zur Bewertung verschiedener (System-)Eigenschaften aus Luftfahrtstudien 53
Tabelle 11: Ergebnisse der System Acceptance Scale aller Testpersonen für den einfachen Softstop 59
Tabelle 12: Ergebnisse der System Acceptance Scale aller Testpersonen für den kombinierten Softstop 60
Tabelle 13: Ergebnisse der System Acceptance Scale aller Testpersonen für den Hardstop ... 60
Tabelle 14: Ergebnisse der System Acceptance Scale für die Cueing-Variante Einfacher Softstop 61
Tabelle 15: Ergebnisse der System Acceptance Scale für die Cueing-Variante Kombinierter Softstop 61
Tabelle 16: Ergebnisse der System Acceptance Scale für die Cueing-Variante Kombinierter Softstop 62

FORMELVERZEICHNIS

Formel 1.1.: Bewegungsgleichung für ein System zweiter Ordnung 29

ABKÜRZUNGSVERZEICHNIS

AFCS	Automatic Flight Control Systems
AIS	Active Inceptor System
ATIC	Advanced Technology Institute of Commuter-Helicopter, Ltd.
EASA	European Union Aviation Safety Agency, dt. Die Agentur der Europäischen Union für Flugsicherheit
EFCS	Electronic Flight Control System
FBW	Fly-by-Wire
FCC	Flight Control Computer
FCMC	Flight Control Mechanical Characteristics
FCS	Flight Control System
FGS	Flight Guidance System
FMS	Flight Management System
FRP	Finger Refernce Point
HACT	Helicopter Active Control Technology
PIO	Pilot Inducted Oscillations, dt. pilotenінduzierte Schwingungen
SCM	System Control Modul
SCS	System Acceptance Scale
TC	tactile Cue

1 EINLEITUNG

Das Wort „taktil", engl. tactile, bedeutet im deutschen Sprachgebrauch „die Berührung" oder „den Tastsinn betreffend". Das Wort „Tactilis" stammt ursprünglich aus dem Lateinischen und heißt übersetzt „berührbar".

Ein Hinweis, engl. „Cue", ist eine „Bemerkung oder Mitteilung, welche in eine bestimmte Richtung abzielt und einer Person etwas - eine Kenntnisnahme oder Handlung – nahelegen möchte." (DUDEN, 2021)

Beide Wörter ergeben den Begriff „tactile Cue" (TC), welcher in der folgenden Übersetzung beliebig zusammen gesetzt werden kann. Er beudetet „eine den Tastsinn betreffende Mitteilung oder einen auf Berührung beruhenden Hinweis". Ein Mensch nimmt diese(n) Hinweis(e) in fast jeder Arbeitssituation aus einem Medium auf, welches sie oder er mit einem oder mehreren Finger(n) bzw. der gesamten Hand berührt.

Um haptische Hinweise nutzen zu können ist ein verbautes aktives Steuersystem im Flächenflugzeug oder im Hubschrauber die Vorraussetzung. Das aktive Steuersystem ist mit einer sogennante Sidestick-Steuerung ausgestattet und kommt durch ein Fly-by-Wire (FBW) System zum Einsatz. Dieses bei Helikoptern erst später gegenüber Flächenflugzeugen verwendete Steuerprinzip ersetzt die mechanischen Verbindungen der Steuersysteme (Seilzüge, Hydraulik etc.) sowie die klassischen Steuerstangen durch elektrische Kabel und Glasfaser-Lichtleitkabel. Daraufhin entfällt der ursprünglich große Steuerknüppel im Cockpit und wird durch den Joystick-verwandten Sidestick durch aktive Steuerorgane, dem Cyclick und Collective, (rechts und links des Piloten- und Co-Pilotensitzes) ersetzt. Infolge reduzieren sich die Körperkräfte, welche von der Pilotin oder dem Piloten auf das Steuerorgan aufgebracht werden müssen. (Klußmann, et al., 2004)

Eine Reihe von weiteren Systeme sind für die Nutzung von FBW in diesem Zusammenhang wichtig. Die auf einen Sidestick übertragenen Steuersignale werden an das sogenannte Electronic Flight Control System (EFCS) weitergeleitet. Das EFCS bezeichnet die weiterentwickelte Form des Automatic Flight Control Systems (AFCS), dem Flugregler eines jeden Flugzeuges oder Helikopters. Ein EFCS besteht aus einem Flight Control Computer (FCC), einem Flight Guidance System (FGS) sowie dem Flight Management System (FMS).

Letzteres stellt ein übergeordnetes System für den Flugregler dar und unterstützt die Pilotin oder den Piloten bei den zentralen Aufgaben der Flugführung. (Klußmann, et al., 2004)

Das zentrale Ziel von aktiven Steuerorganen ist die Pilotinnen und Piloten in ihrer Arbeit in verschiedener Weise und mit verschiedenen Anwendungszwecken zu unterstützen. Beispielsweise sollen mit einem Einsatz die Arbeitsbelastung (engl. Workload) reduziert und die Sicherheit von Mensch und Maschine erhöht werden. Weitere Faktoren sind ebenfalls von Bedeutung.

Die über 15 Jahre spätere Einführung von FBW in Helikoptern begründet sich in ihrer deutlich komplexeren Flugmechanik. Ein Hubschrauber kann im übertragenen Sinne als ein gekoppeltes Flächenflugzeug angesehen werden und verfügt über eine deutlich höhere Komplexität an Wechselwirkungen zwischen Rotor, Rumpf, Lufströmung und Triebwerken. Diese Wechselwirkungen waren zu Forschungsbeginn der FBW-Technologie in verfügbaren mathematischen Modellen nicht vollständig verstanden oder ungenügend berücksichtigt worden. In Folge kann es zu unerwarteten Kopplungen zwischen den hochbandigen Dynamiken des flexiblen Rotor-Körper-Systems kommen. Deswegen sollte die Modellierung von Hochfrequenzcharakteristiken der Rotor- und Rumpfdynamik und darüberhinaus ihrer Kopplungseffekte sowie der Sensor- und Aktordynamik stets umfangreich untersucht werden. Die Begründung für die spätere Einführung ist somit ein höherer Forschungs- und Entwicklungsaufwand. (Zammali, et al., 2015) (Postlethwaite, 1999) (Hamel, 2017 S. 78)

Die Vorteile von Fly-by-Wire-Systemen sind vielfältig. Zum einen benötigen sie weniger Gewicht im Helikopter, was zusätzlich zu einem höheren Leistungsniveau des Helikopters führt, zum anderen verfügen sie über bessere Bedingungen für die Instandhaltung. Außerdem entsteht eine geringere Umweltbelastung sowie eine bessere Benutzerfreundlichkeit für die Pilotinnen und Piloten aufgrund geringerer Krafteinwirkung. Bei bestimmten Flugzeugmustern, z.B. der A380 und A320-Familie, konnten Aus- und Fortbildungstrainings von Pilotinnen und Piloten aufgrund der übereinstimmenden Technologie minimiert werden. Das bedeutet, dass Pilotinnen und Piloten eines A380 auch Flugzeuge aus der A320-Familie fliegen können. (AIRBUS, 2021)

Der erste Flug eines Flugzeugs, welches mit einem digitalen FBW-Flugkontrollsystem ausgestattet war, wurde am 12.Juni 1967 mit einer Do 27 (des Typs YA 913) durchgeführt. (Hamel, 2017 S. 111)

Ein weiteres weltweit erstes auf eine FBW-Technologie basierte Flugkontrollsystem wurde von dem französischen Luft- und Raumfahrtkonzern Aerospatiale entwickelt und in der Concorde verbaut. Das System war für die Flugführung der Concorde essentiell, da es dafür Sorge trug die Flug-Envelope und ihre Geschwindigkeitslimits einzuhalten. Die ersten elektrischen Flugkontrollsysteme mit digitalen Technologien kamen zu Beginn der 1980er Jahre auf. Sie wurden in verschiedenen zivilen Flugzeugmustern eingesetzt und waren – aus Sorge auf welche Art das Flugzeug bei einem Ausfall der neuen elektrischen Systeme zu steuern wäre – mit einem mechanischen Backup-Kontrollsystem versehen. (Traverse, et al., 2005) (AIRBUS, 2021)

Die FBW-Technologie als Steuerprinzip mit voller Steuer-Autorität wurde in Hubschraubern später eingesetzt als in Starrflüglern. Für den Forschungsbeginn ist die Erprobung in einem modifizierten Forschungs-Helikopter des Typs Bell 205 ab dem Jahr 1997 an der englischen University of Leicester ein anerkanntes Beispiel. (Postlethwaite, 1999)

Das Forschungsprogramm Helicopter Active Control Technology (HACT) der Firmen Boeing und Bell sowie der US Army hatte sich zum Ziel gesetzt, die Interaktion zwischen Pilotinnen und Piloten neu zu bestimmen und aktive Steuersysteme mit einer haptischen Sensorik und das Flight Control System (FCS) zu entwickeln. Bezogen war das Programm auf den Kampfhubschrauber des Typs RAH-66 Comanche von Boeing. Leider wurde es gestrichen. (Müllhäuser, 2016) (Abildgaard, 2013)

Die Ergebnisse aus dem HACT-Programm gingen jedoch nicht verloren. Sie flossen stattdessen in die Entwicklung der Boeing-Vertol Modelle CH-47 F und G – beides aufgerüstete Versionen des CH-47 Chinook – und der UH-60M Upgrade Black Hawk ein. Die Boeing-Vertol Modelle CH-47 F und G, welche beide einen verbesserten Transport-Hubschrauber darstellen, verfügten infolge über ein digitales Glascockpit mit einer FBW-Steuerung sowie einer vereinfachten Rumpfstruktur und stärkeren Triebwerken. Sie wurden dafür während eines Retrofits umgerüstet. Der Erstflug der CH-47F wurde 2001 durchgeführt; eine Erst-Auslieferung erfolgte im Jahr 2006. (Irwin, et al., 2007) Die Sikorsky UH-60M

Upgrade Black Hawk – ebenfalls eine Weiterentwicklung/Aufrüstung seines Mutter-Typs, der UH-60 Black Hawk – zeichnet sich durch eine moderne Avionik und eine FBW-Steuerung aus, welche in einem Glascockpit verbaut ist. Ihr Erstflug erfolgte im Jahr 2008. (Abildgaard, 2013) (Arterburn, 2008)

Auch gibt es weitere Hubschrauber, welche heute mit einer FBW-Steuerung ausgestattet sind. Für den militärischen Einsatz sind das der MH-92 Superhawk (eine von zwei militärischen Varianten der Sikorsky S-92), die Sikorsky CH-53 K, die von NH Industries produzierte NH90, der Bell-Augusta BA-609 Kipprotor, der chinesische Harbin Z-20 und der Vell Boeing V-22 Osprey. (Aerospace Technology, 2021) (Sommerfeld, 2020) (defenseworld.net, 2019)

Für den zivilen Einsatz werden derzeit die zwei ersten kommerziellen Helikopter-Modelle mit einer Fly-by-Wire Steuerung entwickelt. Zum einen handelt es sich um den Bell 525 Relentless, zum anderen um den AugustaWestland des Typs AW609. (Schelling, 2021)

Diese Entwicklung zeigt das breite Interesse an aktiven Steuerorganen und deren Bedeutung für zukünftige Verkehrs- und Einsatzkonzepte; im Besonderen beim Einsatz von Helikoptern.

Die Entwicklung von Tactile Cueing in aktiven Steuerorganen nimmt ebenfalls eine zentrale Rolle ein. Typische Cues, aus welchen im nächsten Schritt eine Cue Form, welche aus einem oder mehreren Cues bestehen kann, sind: die Raste (engl. Detent), der Softstop, der Endstop (engl. Hardstop), die Reibung (engl. Friction), der Breakout und der Shaker.

Eine hohe Zahl an nationalen und internationalen Herstellern beschäftigt sich mit der Entwicklung und Erprobung von Cueing Formen. Im Rahmen dieser Entwicklung wurde auch die vorliegende Arbeit am Deutschen Zentrum für Luft- und Raumfahrt e.V. in Braunschweig konzipiert.

Das Ziel der Arbeit ist die Entwicklung einer oder mehrere TC-Formen nach spezifischen Anforderungen und Ausprägungen. Das Hauptinteresse liegt auf der Eindeutigkeit und Verständlichkeit der neunen Tactile Cue Formen; die auch als Kraftsignale bezeichnet werden. Für die Anforderungen sind u.a. Faktoren wie Kraft-Intensität, die Cue-Weite, das Hinzufügen und Kombinieren von Cue-Elementen, Faktoren aus der Mensch-Maschine-Interaktion, die Zeit, die Bewegungsfrequenz und -amplitude zu berücksichtigen. Die Erhöhung der Präzision

der Steuerkräfte und der Anwendungszweck, beispielsweise Warnung oder Führung mit Hilfe von Tactile Cueing, sind als zentrale Anforderungen miteinzubeziehen.

Für die Erstellung von Neuentwürfen der TC-Formen müssen zunächst folgende Fragen beantwortet werden: Wie sieht eine Situation aus, in welcher die Pilotin oder der Pilot das Drehmomenten-Limit erreicht? In welchen Szenarien treten diese Situationen gehäuft auf? Wie lange dauern sie i.d.R.?

Das erste Arbeitspaket umfasst die Recherche der rechtlichen Anforderungen an die Steuerkräfte von Pilotinnen und Piloten, welche für die Helikopter-Steuerung zugrundegelegt werden. Diese von den zuständigen Luftfahrtbehörden herausgegebenen Vorgaben sollen darüberhinaus, wenn möglich, begründet und nach Steuerkräften und Lasten unterschieden werden.

Im nächsten Arbeitsschritt soll eine grafische Gegenüberstellung der ermittelten Werte aus der Literatur mit aufgezeichneten Messdaten aus Vorexperimenten, in welchen ebenfalls Kraftwerte evaluiert wurden, durchgeführt werden.

Die Optimierung und Bewertung von mindestens einem neuen Tactile Cue Design in einem Flugsimulator umfasst den dritten Arbeitsschritt. Die Untersuchungen sollen in einem der DLR-eigenen Flugsimulatoren am Standort Braunschweig anhand einer Pilotenstudie durchgeführt werden. Die Wahl fiel auf das Dual Pilot Active Sidestick Demonstrator Cockpit (2PASD). Die durchgeführten Studien sollen mit Fragebögen und Voruntersuchungen vorbereitet, durchgeführt und mit geeigneten Programmen ausgewertet werden.

2 GRUNDLAGEN

2.1 DIE KÖRPERKRÄFTE DES MENSCHEN

Wakula, et al. definieren die Körperkräfte eines Menschen wie folgt: „Körperkräfte im Sinne von DIN 33411-1 sind Kräfte, die im Zusammenhang mit dem menschlichen Körper entstehen. Körperkräfte sind Vektoren, die durch die Bestimmungsgrößen „Betrag der Kraft", „Lage des Kraftangriffspunktes relativ zum Körper", „Richtung der Wirkungslinie der Kraft relativ zum Körper" und „Kraftrichtungssinn" festgelegt werden." (Wakula, et al., 2009) (DIN 33411-1, 1982)

Eine Unterteilung der Körperkräfte in Aktions-, Massen-, Muskelkräfte und -momente wurde in der DIN 33411-1 im Jahr 1982 anhand von Reihenmessungen menschlicher Kräfte durchgeführt. Sie dient der Unterscheidung von im Körper wirkenden äußeren und inneren Kräften. (DIN 33411-1, 1982) Die entsprechenden Definitionen von Aktions-, Massen-, Muskelkräften und -momenten können in Wakula et al. nachgeschlagen werden.

Für biomechanische Betrachtungen werden zusätzlich Reaktionskräfte und -momente hinzugezogen. Die Biomechanik definiert sich als „die Anwendung mechanischer Prinzipien auf biologische Systeme […]". Die Aufgabe der Biomechanik ist unter anderem die Reaktion eines Organismus auf mechanische Belastungen zu betrachten. Die Reaktionen des Organismus auf diese Belastungen äußern sich in Folge in Form von Anpassungsprozessen. (Chaffin, et al., 2006) (Richard, et al., 2013)

Gemäß der vorliegenden Untersuchung sollen aus dem Gebiet der Körperkräfte spezifische Fragestellungen untersucht werden. Diese sind: Welche Muskelgruppen werden durch die Bewegung einer Stick-Steuerung aktiviert? Welche Anteile haben jeweils die haltende Kraft und welche die bewegende Kraft während einer Sidestick-Steuerung? Welche Kräfte – in Bezug auf Häufigkeit und Kraftausdauer – kann ein erwachsener Mensch generell ausüben? Welche Muskelkräfte kann ein Mensch maximal ausüben? Welche Sensibilitäten der Kraftausübung werden benötigt?

Schlussfolgernd aus diesen Fragestellungen soll in dieser Arbeit überprüft werden, ob nur maximale Körperkräfte benötigt werden oder ob diese gegebenenfalls nur einen Teilbereich der benötigten Kräfte einer Pilotin oder eines Piloten ausmachen. Studienergebnisse und

Forschungen wurden bisher vor allem für maximale Körperkräfte durchgeführt, weswegen eine höhere Anzahl an konkreten Studienergebnissen dazu vorliegen. Dabei ist eine zentrale Annahme, dass die Bedienung eines Steuerelements in einem Cockpit vor allem das Einwirken von Körperkräften mit geringerer Kraftintensität erfordert. Die Bedienung eines Helikopters wird mit Hilfe von verschiedenen Intensitäten von Krafteinwirkungen einer Bedienerin oder eines Bedieners durchgeführt. Diese Kräfte werden als Kraft-Sensitivität bezeichnet.

Um die Kraftintensitäten und Körperkräfte von Menschen zu messen, gibt es verschiedene Arten Menschen zu vermessen. Eine der bekanntesten Formen ist die Reihenmessung, welche für die Erhebung von Körpermaßen verwendet wird. Das Ziel einer Reihenmessung ist es, repräsentative Werte von Größe und Gewicht von Körperbereichen des Menschen sowie des gesamten Körpers zu evaluieren. Hierfür wird eine hohe Anzahl an Personen aus dem Querschnitt der Bevölkerung vermessen. In Deutschland führt beispielsweise die Firma Avalution GmbH, welche in der sogenannten Unternehmenssparte iSize das internationale Körpermaßportal SizeGERMANY entwickelte, diese spezifische Reihenmessung durch. Auf der Plattform werden in Zusammenarbeit mit dem Institut Francais du Textile et de l'Habillement (IFTH) und den Hohenstein Instituten Körpermaße und weitere Daten in erster Linie für die Bekleidungsindustrie zur Verfügung gestellt. (iSize, 2021)
Die gewonnenen anthropometrischen Daten werden auch entsprechend für Untersuchungen der Ergonomie genutzt. Die Firma Human Solutions GmbH verwendet diese Daten für die Erstellung des RAMSIS-Modells, welches ein digitales 3D-Menschenmodell für die virtuelle Produktentwicklung darstellt. RAMSIS steht für „Rechnergestütztes Anthropometrisch-Mathematisches System zur Insassen-Simulation". Die zugrunde liegende Software analysiert die Ergonomie von Arbeits- und Lebensräumen anhand von CAD-Modellen und eröffnet die Möglichkeit die Ergebnisse für verschiedene Branchen digital zu nutzen. (Human Solutions GmbH, 2021)

Für die spezifische Ergonomie in der Luftfahrt bietet die TU München Vorlesungen an und verfolgt verschiedene Forschungsfelder. Die Ergebnisse der Forscherinnen und Forscher der TU München werden in das RAMSIS-Modell integriert. (TU München, 2021)

2.1.1 Die Aktions- und Reaktionskräfte

Die Aktionskraft ist nach DIN-Richtlinie 33411-1 (1982) als Körperkraft definiert, welche nach außen wirkt.
Dagegen wird Reaktionskraft, geben von Dankert & Dankert und Kaiser, wie folgt definiert: „Eine Reaktionskraft im Sinne der technischen Mechanik beschreibt eine Kraft, die durch Bewegungseinschränkung hervorgerufen wird." (Dankert, et al., 2013) (Kaiser, 2018)

2.1.2 Die verschiedenen Einflussgrößen auf die maximalen isometrischen Körperkräfte des Menschen

In der Tabelle 1 sind verschiedene Einflussfaktoren auf Körperkräfte vorgestellt. Diese sind in Einflüsse des Versuchsaufbaus während einer Studie, in methodische Einflussgrößen während der Studie und in individuelle Einflussgrößen der Versuchspersonen einteilbar.

Einflüsse des Versuchsaufbaus	methodische Einflussgrößen	individuelle Einflussgrößen
Abstützungen	Messmethode	Alter
Aktive / Passive Kraftaufbringung	Messwiederholungen	Anthropometrie
Anzahl frei beweglicher Gelenke	Pausenzeiten	dominante Körperhälfte
Körperstellung und Körperhaltung		Geschlecht
Krafteinleitung (z. B. Greifart)		Gesundheitszustand
Kraftrichtung		Übungsgrad
Verletzungsgefahr		Vorermüdung

Tabelle 1: Einflussgrößen auf maximale isometrische Körperkräfte (Kaiser, 2018)

Die individuellen Einflussgrößen in der dritten Spalte werden nun genauer betrachtet.

Der Gesundheitszustand bei Berufspilotinnen und Berufspiloten ist im Allgemeinen als überdurchschnittlich gut einzustufen. Dieser wird in spezifischen Berufsanforderungen, welche in Auswahlprozessen umgesetzt werden, gewährleistet. Das gilt entsprechend für einen psychischen wie physischen Zustand. Weiterhin ist von einer hohen Belastbarkeit und dem Willen diese zu entwickeln und während der Berufslaufbahn weiterauszubauen (in einem höheren Alter mit Veränderungen), in dieser Berufsgruppe überwiegend auszugehen.

Die Einflussgrößen von Übungsgrad und Vorermüdung. Ein gewisses Maß an Flug-Übung ist vor einer Mission mit einem Helikopter vorauszusetzen. Eventuell auftretende Formen von Vorermüdung können durch eine regelmäßige und vollständige Erholung sowie durch eine eintretende Gewöhnung von spezifischen Belastungen nach einer bestimmten Zeit reduziert werden.

Die genannten drei Einflussfaktoren können natürlich naturgemäß nicht vollständig ausgeschlossen werden.

Auf die vier Einflussgrößen Alter, Geschlecht, Dominante Körperhälfte und Anthropometrie wird im nächsten Kapiteln genauer eingegangen und Ergebnisse auf Grundlage von einschlägigen Studien vorgestellt.

2.1.2.1 Das Alter als Einflussgröße

Die Tabelle 2 zeigt eine Übersicht über relevante Studien für das Alter als Einflussgröße auf die maximalen isometrischen Körperkräfte.

Körperteil	Ergebnisse der Studie bezogen auf das Alter	Erhebungs-Methode (und Anzahl der Probanden)	Quelle
Arm	Abnahme ab 30 Jahre um ca. 15 % bis 60 Jahre	Messung (n=610)	Assmussen und Heeboll-Nielson (1962)
Griffkraft	Ab 65 Jahren Abnahme ca. 16 % nach 7 Jahren	Längsschnitt (n=23)	Aniansson et al. (1962)
	Abnahme ab 20 Jahre (Regressionsgeraden)	Messung (n=99)	Chatterjee und Chowdhuri (1991)
	Abnahme in zwei Phasen (Regressionsgeraden)	Messung (n=541)	Stoll et al. (2000, 2002)

Finger, Hand	Abnahme bewegungsspezifisch bis ca. 37 %	Messung (n=153)	Bemben et a. (1991)
Ellenbogen	Abnahme im Alter um etwa 20 %	Messung (n=302)	Goebels (2002)
Finger, Hand	Abnahme um 19 % bis 30 %	Messung (n=24)	Shinohara, Latash u. Zatsiorsky (2003)
Finger	Abnahme ab 22 Jahre	Messung (n=32)	Oliveira et al. (2008)

Tabelle 2: Zusammenfassung von Studien der Einflussgröße Alter auf die Körperkräfte. In Anlehnung an (Kaiser, 2018)

Die Ergebnisse werden speziell nach den Kraftwerten bezogen auf das Alter wiedergegeben. Zusammenfassend steigen die Kraftwerte bis etwa zum 30. Lebensjahr an, bleiben dann konstant und fallen danach populationsübergreifend ab dem 50. Lebensjahr ab. In den Untersuchung sind auch Unterschiede zwischen den einzelnen Probanden in dieser Abnahme erkennbar. Der Abfall ist abhängig von der Gelenk- und Bewegungsrichtung unterschiedlich, was auf die beteiligte Muskulatur zurückgeführt wird. Die Abnahme von Typ-2 Muskulatur* ist hierbei signifikant. (Aniansson, et al., 1982)

2.1.2.2 Das Geschlecht als Einflussgröße

In verschiedenen Studien zu Körperkräften sind zusammenfassend die Kräfte von Frauen im Mittel geringer als die Kraft-Mittelwerte von Männern evaluiert worden. Die Ergebnisse zeigen dabei ein gelenk- und bewegungsübergreifendes Resultat, das sich bei ca. 66%

* Allgemein baut sich eine Bewegungsmuskulatur aus Typ-1- und Typ-2-Fasern auf. Die Typ-2 Muskulatur bezeichnet eine Art der Halte- und Bewegungsmuskulatur. Da die Fasern auf eine Aktion mit einzelnen Zuckungen reagieren, werden sie auch als Zuckungsfasern, engl. Twitch fibres, bezeichent. Die Dauer und der Verlauf von Muskelzuckungen unterschieden sich beträchtlich, weswegen zwei Arten innerhalb eines Muskels unterschieden werden: Die langsam zuckenden Muskelfasern (Typ-1-Fasern) sind durch eine Zuckungsdauer von etwa 100 ms (sogen. slow-twitch- oder ST-Fasern) charakterisiert. Die schnell zuckenden Muskelfasern (Typ-2-Fasern) zeichnen sich mit einer Zuckungsdauer von etwa 30 ms (fast-twitch-oder FT-Fasern) aus. (Schünke, 2014)

Körperkraft von Frauen gegenüber einem Referenzwert bei Männern darstellt. (Mital, et al., 1998) (Kumar, 1991)
Das Verhältnis von Muskelkraft zu Muskelquerschnitt ist als geschlechtsunabhängig beschrieben. Dadurch sind die Differenzen der Ergebnisse anhand von Muskelmassenunterschieden zu erklären. Daraus folgt, dass eine Frau mit größerer Muskelmasse als ein Mann auch höhere Kräfte als dieser generieren wird und andersrum. (Kaiser, 2018)

In der Praxis der Arbeitswissenschaft findet der montagespezifische Kraftatlas als die aktuellste Reihenmessung Anwendung. Die Kraftwerte von Frauen werden hierbei mit einem Faktor von 0,5 - was einer Reduzierung um 50 % gegenüber den Kraftwerten von Männern entspricht - angegeben. In dieser Messung von Aktionskräften sind auch die Oberarme involviert, wodurch der Faktor als sinnvoll einzuordnen ist. (Wakula, et al., 2009)

2.1.2.3 Die dominante Körperhälfte als Einflussgröße

Von einer dominanten zu einer nicht dominanten Körperhälfte liegt der Unterschied von Körperkräften bei rund 10%. (Kroemer, 1977) Die Abweichungen wurden im Einzelnen auch in Abhängigkeit der beteiligten Muskeln untersucht. Die Differenz für jedes Gelenk und Richtung der Bewegung fallen unterschiedlich aus.

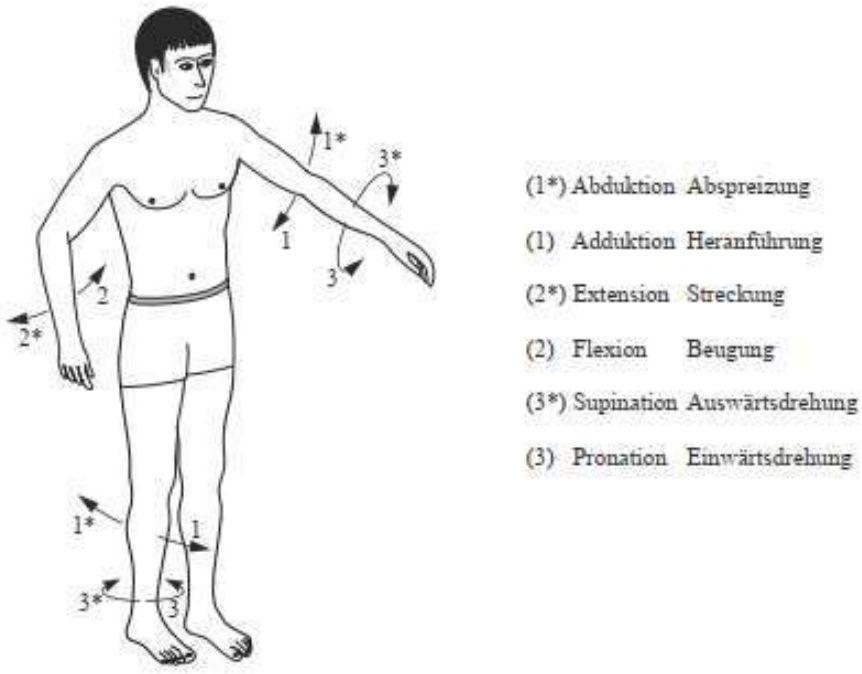


Abbildung 1: Relativbewegungen von menschlichen Extremitäten (Richard, et al., 2013)

Für die Beugung (Flexion) eines Ellenbogens wird ein Unterschied von etwa 3 % angenommen, bei der Streckung von rund 4 % (Extension), bei der Einwärtsdrehung sind es 7 % (Pronation), die Auswärtsdrehung (Supination) weist einem Unterschied von 8 % auf. (Askew, et al., 1987)

Einige Studien konnten im Gegensatz dazu keine oder nur teilweise signifikante Unterschiede feststellen. (Otis, et al., 1990) (Neumann, et al., 1988)

Die folgende Tabelle zeigt Ergebnisse aus ausgewählten Studien.

Körperteil	Ergebnisse bez. Auf die Körperhälfte (KH)	Erhebungs-Methode	Quelle
Gelenkübergreifend	Abnahme nicht dominante KH etwa 10 %	Literaturreview	(Kroemer, 1977)
Ellenbogen	Abnahme nicht dominanter KH etwa 6 %	Messung (n=104)	(Askew, et al., 1987)
Griffkraft	Abnahme der linken KH etwa 2 %	Messung (n=541)	(Stoll, et al., 2000) (Stoll, et al., 2002)

Tabelle 3: Dominante Körperhälfte als individuelle Einflussgröße auf die Körperkräfte. In Anlehnung an (Kaiser, 2018)

Das Fliegen eines Helikopters ist eine komplexe Aufgabe und erfordert das Nutzen beider Arme und beider Beine. Das oft während der gesamten Flugzeit. Eine geringere Körperkraft in einer der Körperseiten, in diesem Zusammenhang in der nicht dominanten Körperhälfte, kann zu einer geringeren Kraftintensität während der Steuerung und in Folge zu einer unausgeglichenen Flugführung führen. Durch eine bewusste oder unbewusste Kompensierung der Kräfte durch die jeweils andere Körperhälfte des Piloten, kann darüber hinaus ein Gesundheits- und Sicherheitsrisiko entstehen.

Eine stärkere Kraftausprägung in einer der Körperseiten sollte bei der Systemauslegung eines aktiven Steuerorgans und dem tactile Cueing berücksichtigt werden. Eine automatische Erkennung des Systems könnte, als Ziel eines neuen Forschungsthemas, unterschiedliche Kraftausprägungen der Arme erkennen und kompensieren.

2.1.2.4 Die Anthropometrie als Einflussgröße

Die Körperkraft wird auch durch die Körperhöhe, einzelne Körpersegmentlängen als auch das Körpergewicht beeinflusst. Dabei haben das Körpergewicht und die Körperhöhe nur mittlere

bis kleine Effekte (siehe Tabelle 4). Im Gegensatz dazu sind in den Studien die Körpersegmentlänge, der Segmentdurchmesser oder das Segmentgewicht als höhere Effektstärken evaluiert worden.

In sportwissenschaftlichen Untersuchungen wurde das Gewicht als größter Einflussfaktor dargestellt. Zum Beispiel sind aus einer fettfreien Körpermasse bzw. fettfreien Körpersegment-Querschnitten höhere Effekte auf die Körperkraft ableitbar. Die Studien ergeben darüber hinaus unterschiedliche Ergebnisse zu Geschlecht und Alter als Einflussfaktoren. Einige Studien weisen auf Effekte hin, andere zeigen dagegen keinerlei Unterschiede. (Wang, et al., 2005) (Kaiser, 2018)

Körperteil	Ergebnisse bez. auf Anthropometrie	Erhebungs-Methode	Quelle
Gelenkübergreifend	Anthropometrische Größen (Regressionsmodell)	Messung (n=146)	(Mital, et al., 1980)
Gelenkübergreifend	Geschlechtsunabhängig FFC & FFCSA zur Kraft	Messung (n=48)	(Bishop, et al., 1987)
Schulter	0.12 – 0.41 Nm / kg Gewicht (Regressionsmodell)	Messung (n=120)	(Hughes, et al., 1999)
3 Gelenke, Griffkraft	Korrelationen Gewicht, Körperhöhe etc.	Messung (n=193)	(Xiao, et al., 2005)

Tabelle 4: Zusammenfassung von Studien der Einflussgröße Anthropometrie auf die Körperkräfte (Kaiser, 2018)

2.1.3 Spezifische Werte für Finger- und Handkräfte

Die Tabelle 5 zeigt Werte für Finger-Hand-Kräfte aus dem montagespezifischen Kraftatlas von Wakula, et al.. Die Zahlen wurden während einer Studie für verschiedene Handbereiche evaluiert. Dabei werden Werte für die rechte und linke Hand unterschieden. Werte werden

jeweils als Mittelwert, als Standardabweichung sowie in Form des Minimal- und Maximalwert gegeben. Die Anzahl der Messungen waren zwischen 530 bis 580 Messungen.

Alle Werte in N	**Linke Hand**					**Rechte Hand**				
Handbereich	Mittelwert	Standardabweichung	Minimalwert (Wakula,	Maximalwert	Anzahl der Messungen	Mittelwert	Standardabweichung	Minimalwert	Maximalwert	Anzahl der Messungen
Daumen und zwei Finger	90	26	13	253	546	93	27	16	269	544
Daumen und vier Finger	113	31	26	298	557	112	31	23	268	556
Daumen	149	51	41	331	530	152	52	15	344	530
Daumen und Zeigefinger	101	23	14	270	533	102	24	19	259	532
Faust	348	99	86	637	548	360	103	30	677	548
Handballen	268	86	27	544	549	267	87	62	620	549
Zange	314	90	9	594	578	340	96	30	824	580
Zeigefinger	81	24	23	168	542	90	28	21	195	545

Tabelle 5: Finger-Hand-Kräfte für die linke und rechte Hand, in sitzender Körperposition (Wakula, et al., 2009)

Die Verteilung der Kraftwerte in dem Bevölkerungsteil dieser Stichprobe zeigt Tabelle 6. Die Angaben sind in Perzentile im Abstand von 5%, ausgenommen der erste und der letzte Wert, angegeben.

Perzentil	1%	5%	10 %	15 %	20 %	25 %	30 %	35 %	40 %	45%	50%
Daumen und zwei Finger	33	54	64	68	73	77	80	83	87	90	92
Daumen und vier Finger	35	64	74	83	90	95	99	102	105	108	113
Daumen	49	74	88	102	110	116	123	128	135	140	147
Daumen und Zeigefinger	30	60	75	82	85	89	93	96	99	101	104
Faust	96	183	219	254	279	289	309	323	338	350	364
Handballen	95	144	163	176	190	200	213	227	236	245	260
Zange	101	177	222	246	266	279	295	307	319	328	341
Zeigefinger	35	51	57	64	67	70	74	77	79	84	87

Perzentil	55 %	60 %	65 %	70 %	75 %	80 %	85 %	90 %	95 %	99%
Daumen und zwei Finger	93	96	98	102	105	111	115	120	137	180
Daumen und vier Finger	116	120	123	126	130	134	139	147	159	188
Daumen	153	160	165	175	184	194	203	216	239	306
Daumen und Zeigefinger	106	109	111	114	116	120	123	128	135	150
Faust	378	394	405	419	436	450	471	494	521	559
Handballen	272	288	298	309	325	342	359	383	413	499

Zange	350	361	372	384	401	419	436	456	493	558	
Zeigefinger	91	93	97	101	105	111	117	126	135	174	

Tabelle 6: Tabelle mit empirischen Perzentilen für die Finger-Hand-Kräfte der rechten Hand (Werte in N)

Die Tabelle 7 zeigt die sogenannten resultierenden Kraftwerte der Hand, welche jeweils im aufrechten und gebeugten Sitzen erhoben wurden. Die Werte spiegeln die auf die Systeme, Helikopterrumpfstruktur und den (Co-)Pilotensitz wirkenden Kräfte von Pilotinnen und Piloten wieder. Sie beinhalten laut Versuchsaufbau der Studie von Wakula, et al., die Kraft, welche mit Hilfe des gesamten Körpers über die Hände max. aufgebracht werden können. Die Bewegungsrichtungen A, B und C werden in der Grafik in Abbildung 2 erläutert.

Aufrechtes Sitzen (Werte in N)					
A+	**A-**	**B+**	**B-**	**C+**	**C-**
249	300	280	240	144	131
287	351	315	293	171	155
313	373	330	316	188	173
437	465	433	411	270	260
535	543	491	475	331	318
681	646	594	596	415	420

Gebeugtes Sitzen (Werte in N)					
A+	**A-**	**B+**	**B-**	**C+**	**C-**
232	235	331	260	164	122
278	278	357	298	180	139
296	301	379	327	204	155
424	401	483	448	301	229
529	460	569	564	365	286
232	235	331	260	164	122

Tabelle 7: Resultierende Kräfte in sitzender Körperhaltung, in Anlehnung an (Wakula, et al., 2009)

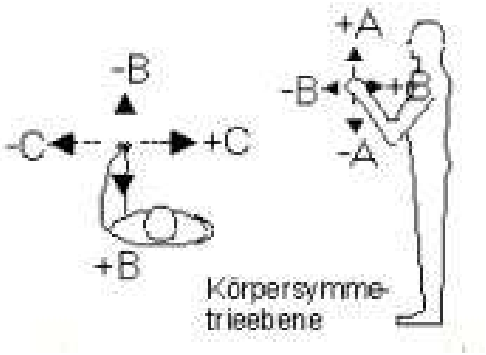


Abbildung 2: Legende für verwendete Kraftvektoren (Wakula, et al., 2009)

Die Bewegungsrichtungen einer Hand in der Abb. 2, welche sich in die Richtungen A (oben und unten), B (vor und zurück) und C (rechts und links) unterteilen, sind equivalent mit der Bewegungsausführung von Sidestick-Steuerungen. Die Richtungen A+ und A- sind für die Bedienung des Collectives relevant. Die Kombination aus den Kraftvektoren B (B+ und B-) sowie C (C+ und C-) ergeben die Hauptanteile der Bewegung des Cyclic.

Eine Gegenüberstellung von beidhändigen und einhändigen Maximalkräfte im Sitzen (aufrecht sitzend, gebeugt sitzend und überkopf sitzend) ist im Anhang zu finden.

2.1.4 Verschiedene Piloten-Wahrnehmungen von Handkräften

In der folgenden Tabelle sind die Piloten-Eindrücke von der Durchführbarkeit von verschiedenen Handkraftstufen aus einer DLR-Studie darstellt. Die am Standort Braunschweig durchgeführte Studie wurde mit einem haptischen Assistenzsystem des Herstellers Wittenstein durchgeführt.

Handkraft (Werte in N)	Beschreibung
5	Fast keine Kraft. Der Stick wird von den Fingerspitzen des Piloten geschoben. Das ist zu filigran und unnatürlich. Man neigt dazu, die Kraft zu erhöhen, um auch ein deutlicheres Feedback vom Softstop zu bekommen.

10	Am unteren Ende dessem, was in einem Helikopter gesteuert werden kann. Unnatürlich aus den gleichen Gründen wie oben angegeben.
15	Mäßige und normale Kraft. Klare Rückmeldung vom Softstop. Diese Kraft wird als diejenige wahrgenommen, die im normalen Betrieb verwendet werden könnte.
20	Klare Rückmeldung, aber auf der starken Seite des Normalen.
25	Ermüdend und unpraktisch. Der Pilot nutzt die Armlehne als Ankerpunkt, um die Kraft zu halten. Es entsteht der Eindruck Einer hohen Steifigkeit oder Versteifung im Arm, was zu einer verminderten Präzision der Cueing-Schleife führt.
30	Auf oder jenseits der typischen Übersteuerungsschwelle. Übertragung von Softstop auf Knüppelbewegung() bricht ab.

Abbildung 3: Übersicht von Piloten-Wahrnehmungen von verschiedenen Handkraftstufen (Abildgaard, 2013 S. 63/64)

2.1.5 Die aktuellen rechtsgültigen Anforderungen an Helikopter-Steuersysteme (gem. EASA)

Dieses Kapitel gibt eine Übersicht über die Dokumente der EASA, welche für die Steuerkräfte von Helikoptern von Bedeutung sind und entsprechend als Anforderungen für die Steuersystem-Auslegung gelten. Es werden die derzeit gültigen Werte für Steuerkräfte der Stick-Steuerung genannt.

Das Dokument CS-27 mit der Bezeichnung „Small Rotorcraft Amendment 7" wurde am 01.07.2020 veröffentlicht und stellt die aktuellste Version dieser Zulassungsspezifikation dar. Die Vorschrift enthält die gültigen Anforderungen für Steuerflächen- und Systemlasten für kleine Drehflügler (siehe Seite 1-C-3).
Das Dokument CS-29 Large Rotorcraft Amendment 8 wurde am ebenfalls am 01.07.2020 veröffentlicht. Es enthält alle Zulassungsspezifikationen für Steuerflächen- und Systemlasten entsprechend für große Drehflügler. Die Abgrenzungen zwischen kleinen und großen Drehflüglern gehen aus dem Anwendungsbereich aus der Vorschrift CS-27 Small Rotorcraft

hervor. Darin ist festgelegt, dass „die Zertifizierungsvorgaben […] für kleine Drehflügler mit einem Höchstgewicht von 3175 kg oder weniger und neun oder weniger Passagiersitzen [gelten]."

CS-27 Small Rotorcraft Amendment 7 (Veröffentlichung am 01.07.2020)	**CS-29 Large Rotorcraft Amendment 8** (Veröffentlichung am 01.07.2020)
Chapter "Control Surface and system loads"	**Chapter "Control Surface and system Loads"**
CS 27.391 General	**CS 29.391 General**
(CS 27.392 bis 394 sind nicht vorhanden)	(CS 29.392 bis 394 sind nicht vorhanden)
CS 27.395 Control system	**CS 29.395 Control system**
(CS 27.396 ist nicht vorhanden)	(CS 29.396 ist nicht vorhanden)
CS 27.397 Limit pilot forces and torques	**CS 29.397 Limit pilot forces and torques**
(CS 27.398 ist nicht vorhanden)	(CS 29.398 ist nicht vorhanden)
CS 27.399 Dual control system	**CS 29.399 Dual control system**
(CS 27.400 bis 410 nicht vorhanden)	(CS 29.400 bis 410 nicht vorhanden)
CS 27.411 Ground clearance: tail rotor guard	**CS 29.411 Ground clearance: tail rotor guard**
Chapter "Personnel and Cargo accomodations" (Seite 1-D-9)	**Chapter "Personnel and Cargo accomodations" (Seite 1-D-10)**
CS 27.785 Seats, berths, safety belts, and harnesses	**CS 29.785 Seats, berths, safety belts, and harnesses**

Tabelle 8: Für Steuerkräfte relevante Kapitel aus den Certification Specifications (CS) 27 und 29 der EASA

Die Tabelle 8 zeigt eine Übersicht über die relevanten Kapitel der beiden EASA-Vorschriften.

Die geltenden Grenzsteuerkräfte für kleine und große Drehflügler lauten:

CS 27.397 Grenzsteuerkräfte und Drehmomente

(a) Mit Ausnahme der Bestimmungen in Unterabsatz (b) sind die Grenzsteuerkräfte wie folgt:

(1) Für Fußsteuerung: 578 N bzw. 130 lbs

(2) Für Stick-Steuerung: 445 N bzw. 100 lbs vor und zurück, und 298 N bzw. 67 lbs seitlich/lateral

[…]

Das Kapitel "Personnel and Cargo accomodations" (Seite 1-D-9) beinhaltet unter den Kapiteln CS 27.785 und 29.785 unter anderem die Anforderungen für Sitze, Liegeplätze, Sicherheitsgurte sowie Gurtzeug für Piloten (und andere Crew-Mitglieder). Diese Anforderungen sind im Hinblick auf die Auswirkungen von Steuerkräften und einer entsprechenden Gestaltung der Sitze, Sicherheitsgurte, Gurtzeug und weitere angegeben. Sie werden an dieser Stelle für eine vollständige Betrachtung für die vorliegende Untersuchung und für interdisziplinäre Forschungsfelder genannt.

Kommentar: Wenn eine Reduzierung der Kräfte auf Grundlage der Ergebnisse dieser Arbeit denkbar werden würde, würde sich die Auslegung des Pilotensitz möglicherweise ebenfalls verändern. Wenn es zu diesem Ergebnis kommt, müssen die Bedingungen in Kapitel CS 29.785 Absatz (f) (2) vorher einer Prüfung unterzogen werden.

Eine vollständige Übersetzung der in Tabelle 8 aufgeführten Kapitel aus den Richtlinie EASA CS-27 und EASA CS-29 kann dem Anhang entnommen werden.

Weiterhin sind weitere internationale Richtlinien für den Designprozess und die Leistung von Helikoptern zu nennen. Die Unites States Army Aviation and Missile Command Aviation Engineering Directorate (AMCOM) gibt die ADS-33E-PRF heraus.
Die von SAE International herausgegebene Richtlinie ARP4754, welche sich mit der Entwicklung von zivilen Flugzeugen und Flugzeugsystemen befasst und die Zertifizierung von Flugzeugsystemen unterstützen. Sie deckt den gesamten Flugzeugentwicklungszyklus von Systemanforderungen bis zur Systemprüfung ab.
Die ebenfalls von SAE International herausgegebenen „Leitlinien und Methoden für die Durchführung des Sicherheitsbewertungsprozesses für zivile Luftfahrtsysteme und -ausrüstungen" sind darüber hinaus zu nennen. Sie sind unter der Bezeichnung ARP4761 zu finden.

2.2 ARTEN DER (HELIKOPTER-)FLUGSTEUERUNG

Die Pilotinnen und Piloten von Helikoptern verwenden drei Arten der Flugsteuerung. Zum einen ist der Collective Stick zu nennen, welcher die Nickbewegungen (Pitch) des Hauptrotors kontrolliert. Das System steuert den Auftrieb (Lift) und den Schub (Thrust) an. Als zweites System ist der Cyclic Stick zentraler Bestandteil der Helikoptersteuerung. Er kontrolliert die Neigung des Hauptrotors. Eine Ansteuerung des Cyclic Stick bewirkt das Nicken (Pitch) und das Rollen (Roll). Die Seitenruder-Pedale übernehmen als drittes System das Gieren (engl. yaw) des Helikopters. Ihre Aufgaben sind die Steuerung und Kontrolle des Gegen-Drehmoments des Heckrotors. (Zammali, et al., 2015)

2.3 ÜBERSICHT VON STICK-FORMEN

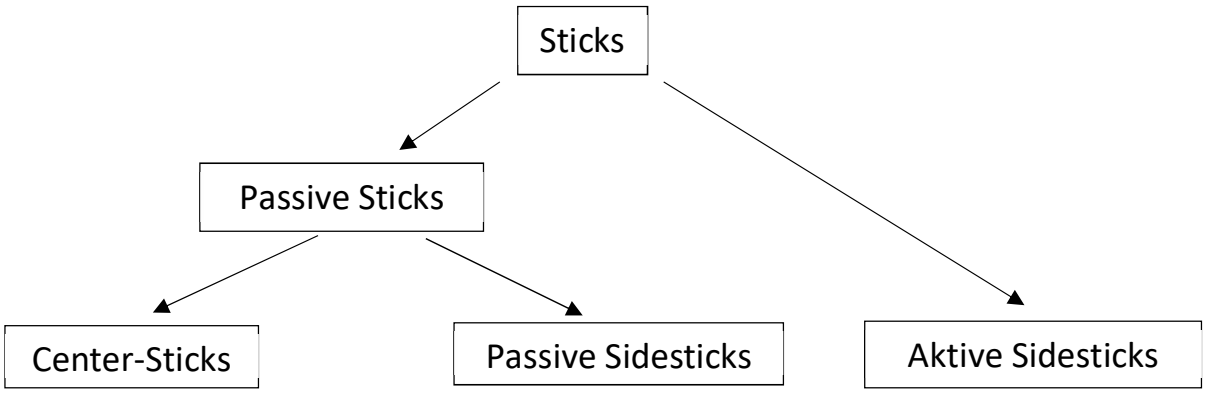


Abbildung 4: Arten von Sticks

Center-Sticks

Die Ursprünge des Helikopter-Steuersystems in Form des Center-Sticks im Cockpitraum sind im Beginn der Luftfahrt zu finden. Die Steuerung wird durch einen langen Stick durchgeführt, welcher einen langen Weg zurücklegen muss, um die Steuerflächen zu bewegen. In diesem Fall sind die Steuerflächen nicht motorisiert. (Abildgaard, 2013)

Passive Sidestick

Bei einem passiven Sidestick simuliert das Servosystem als Steuerbelastungssystem eines Flugsimulators oder Flugzeugs die dynamischen Eigenschaften eines mechanischen Masse-Feder-Dämpfer-Steuerungssystems. (Hosman, et al., 1990)

Er wird als passiv bezeichnet, weil er nur durch ein Anstoßen in Bewegung gebracht werden kann. Von allein bewegt er sich dagegen nicht.

Aktive Sidesticks

Ein aktiver Sidestick wird als die motorisierte Version des Sidesticks bezeichnet. Er gibt ein visuelles und taktiles Feedback an die Pilotinnen und Piloten aus. Das Feedback stützt sich auf die Steuereingaben des Systems oder auf die Steuereingaben, welche durch die Co-Pilotin/Piloten ausgeführt wird. Dadurch kann die Pilotin kann die Steuereingaben der Co-Pilotin/Piloten nachvollziehen und andersrum.

Im Fall eines aktiven Sidesticks wird die aufgebrachte Stick-Kraft als Steuersignal für den Helikopter verwendet. Die Zustandsgrößen des Flugzeugs wie Nick- und Roll-Lage oder -geschwindigkeit werden auf die Stick-Position zurückgeführt. (Hosman, et al., 1990)

2.4 DER AKTIVE SIDESTICK

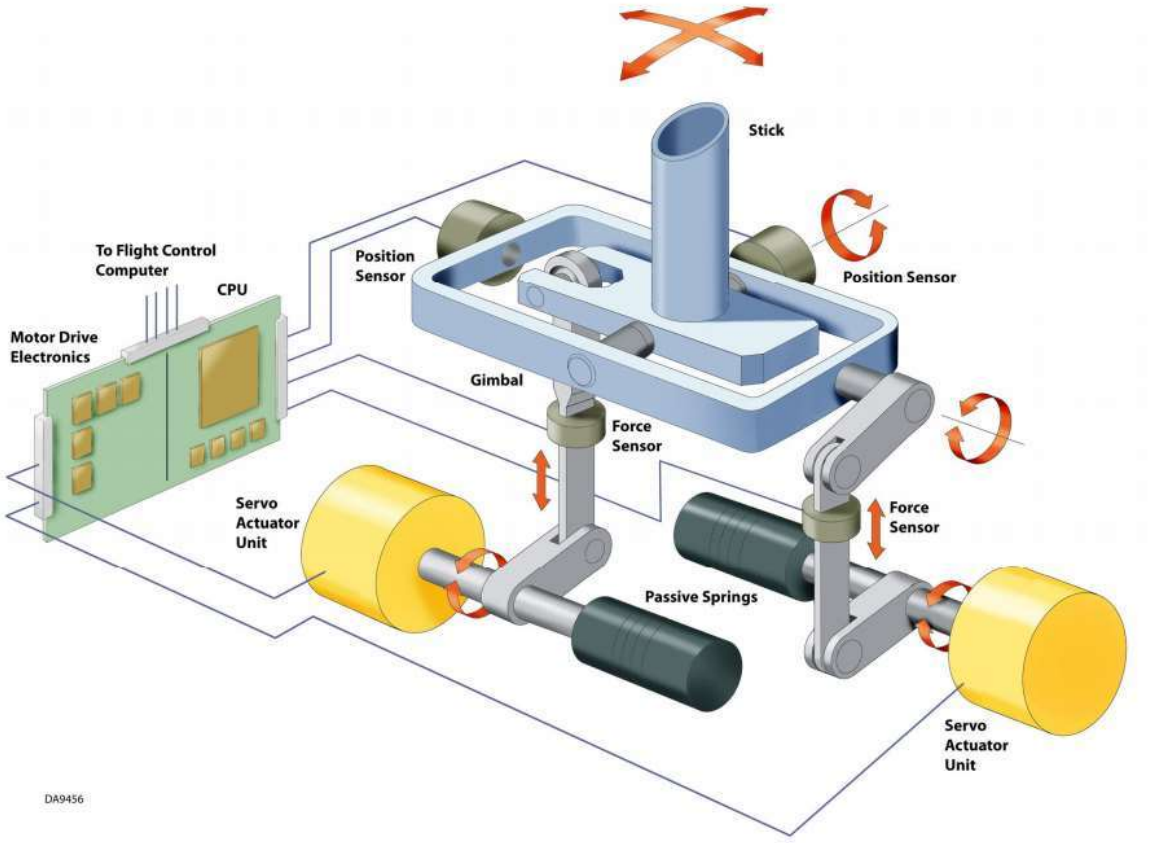


Abbildung 5: Typische mechanische Konfiguration für aktive Steuerorgane mit zwei Achsen (Quer- und Längssteuer) (Taylor, et al., 2008 S. 5)

Abbildung 5 zeigt den typischen Aufbau eines aktiven Steuerorgans mit zwei Achsen. Die Schlüsselkomponenten von aktiven Steuerorganen sind:

- Motor/Gearbox
- Resolver (commutation / position sensor)
- Motor drive electronics
- Force sensor
- Controller/software
- Multi-Redundant Position Sensors to Flight Control Computer
- Passive Spring/Damping mechanism
- Power Supply
- Chassis/motherboard

- Grip/stick pole interface
- Communication interfaces

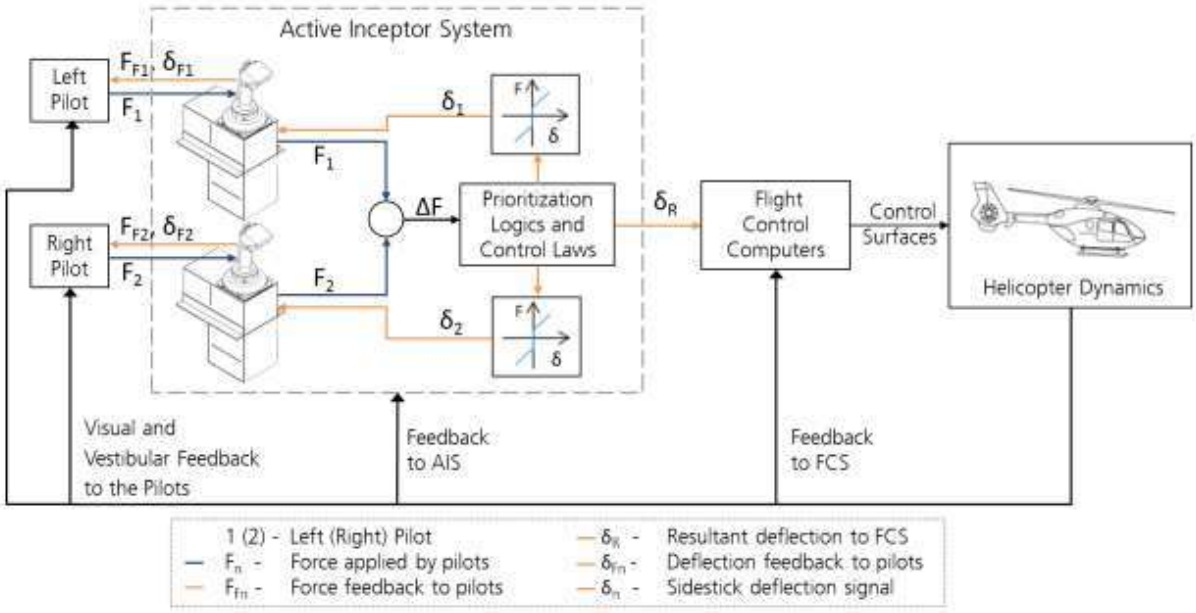


Abbildung 6: Piloten-Inceptor-System mit gekoppelten aktiven Sticks (dos Santos Sampaio, 2018)

Das aktive Inceptor-System gibt die Möglichkeit zwei aktive Kontroll-Sticks elektrisch miteinander zu koppeln. Dadurch sind die Sidesticks ähnlich wie die traditionelle mechanische Variante miteinander verbunden. Die Abbildung 6 zeigt das Piloten-Inceptor-System zusammen mit einem vereinfachten Signalfluss. Der Signalfluss veranschaulicht die Kopplung. (dos Santos Sampaio, 2018)

Aktive Sidesticks eines Piloten und Co-Piloten sind miteinander gekoppelt, damit der Co-Pilot die Steuerbefehle des Piloten mitverfolgen kann. Wenn der Autopilot aktiv ist, gibt das System die Befehle sichtbar für den Pilotin/Piloten an den Sidestick weiter. Dadurch sind die Befehle für den Piloten direkt sichtbar, wodurch das Situationsbewusstsein signifikant unterstützt wird. Wenn zwei Pilotinnen oder Piloten parallel Steuerbefehle über die aktiven Sidesticks eingeben, kann das System einen Mittelwert der Befehle bilden oder die Befehl-Eingabe eines Piloten an die Eingabe des anderen Piloten hinzufügen. Wenn sich zu vielen

Unstimmigkeiten zulange Zeit in der Befehleingabe ergeben, entkoppelt das System und übergibt einem der Pilotinnen/Piloten eine priorisierte Steuereingabe. (Collins Aerospace, 2021)

Die Vorteile von aktiven Sidesticks sind vielfältig. Zum einen verfügen sie über eine deutlich kompaktere Bauweise als traditionelle Steuerorgane. Dadurch sind sie kleiner und ermöglichen eine ungestörte und auch direkte Sicht auf die Bildschirme und analogen Instrumente des Cockpits. Zum anderen ist die Sidestick-Unit bis zu 80% leichter als die traditionellen Centersticks.

Darüber hinaus ist die Zeit und Komplexität der Installation während des Produktionsablaufs eines Flugzeugherstellers signifikant geringer; auch bei einem Retrofit muss nur noch eine Einheit verbaut werden.

Aktive Sidesticks sind einfach zu reparieren, da es sich bei einem Sidestick um eine austauschbare Einheit aus einer Serienproduktion handelt, welche sich aus drei austauschbaren Bauteilen (ebenfalls Serienproduktionen) zusammensetzt. Diese Form wurde von der Herstellerseite gewählt um Ersatzteile für die Airlines zu sparen. (Collins Aerospace, 2019)

Ein aktiver Sidestick gibt ein visuelles und taktiles Feedback an die Piloten aus, welche für verschiedene Funktionen genutzt werden können. Er ermöglicht eine ergonomische Bedienung für die Pilotinnen und Piloten. Aufgrund der Verwendung von Kabeln bei der Steuerung wird die Flugsicherheit erhöht.

Ach das Verletzungsrisiko bei einem Unfall minimiert sich. Bei einem waagerechten Flugzeugabsturz könnte der Pilot auf einen Centerstick mit dem Gesicht aufprallen. Im Gegensatz dazu wird das bei einem Sidestick aufgrund seiner seitlichen Anordnung und geringeren Größe verhindert. Auch wenn es sich dabei um ein seltenes Ereignis handelt, ist dieser Unterschied bei Eintreten eines Unfalls dieser Art entscheidend (Abildgaard, 2013)

Systemseitig gibt es viele Optionen und Eigenschaften, welche kundenspezifisch von dem Helikopter-Hersteller angepasst werden können. Ein Vorteil ist, dass das Design des

Sidesticks individuell bearbeitbar sowie anpassbar ist; dadurch wird der Kunde wie auch der Hersteller zufrieden. Es bereichernd für die Piloten und wirkt sich positiv auf die Nutzbarkeit des Systems aus. (Collins Aerospace, 2021; Collins Aerospace, 2019)

Ein weiterer Vorteil des Tactile Cueing ist die Möglichkeit dem Cue folgen zu können oder ihn einfach zu übersteuern - eine Sache, die Pilotinnen und Piloten anspricht.

Diese Vorteile von Tactile Cueing sind in verschiedenen Simulatorstudien dokumentiert worden, z.B. (Whalley, et al., 2000) (Sahasrabudhe, et al., 2002) und (Müllhäuser, et al., 2020). Die Wissenschaftler haben herausgefunden und dokumentiert, dass Tactile Cueing ein guter Weg ist Arbeitsbelastung (Workload) in einem Helikopter-Cockpit zu reduzieren. Was im nächsten Schritt dazu führt, dass die Flugsicherheit von Mensch und Maschine erhöht wird. (Abildgaard, 2013)

Darüber hinaus gibt es auch Grenzen von aktiven Steuerorganen, welche in dem Bericht von (Dögow, 2015) diskutiert werden (Seite 5). Weiterhin wird die Besonderheit von Haptik als Sinneswahrnehmung und der wissenschaftliche Stand des Tastsinns auf Seite 7 dargelegt. (Dögow, 2015)

Einsatzbereiche von aktiven Steuerorganen

In militärischen Missionen und Forschungseinrichtungen werden haptische Assistenzsysteme bereits seit 1967 für den Einsatz erprobt. Hierbei wird zuerst ein Limit von einem Hersteller oder einer Forschungseinrichtung festgelegt. Das Limit soll mit Hilfe des Assistenzsystems während einer Mission eingehalten. Im nächsten Schritt werden den dem Limit zugehörigen Werte haptische Signale zugeordnet. Diese Signale zeigen den Pilotinnen und Piloten das (bald) erreichte Limit. Dann wird die Gestaltung von Kraftelementen durchgeführt um die haptischen Hinweise - die tactile Cues - den Pilotinnen und Piloten anzeigen zu können. Diese Hinweise sollten keine störende Wirkung auf die Pilotinnen und Piloten haben. (Dögow, 2015)

Typischerweise werden aktive Steuerorgane wie folgt eingesetzt:

- Hindernisvermeidung (Obstacle Avoidance),
- Drehmoment-Absicherung (Torque Protection),
- Einhalten von Flug-Envelope(n).

Die Obstacle Avoidance bezeichnet ein System, welches die Kollision mit Hindernissen vermeiden soll.

Torque Protection ist ein Assistenzsystem, welches die Pilotinnen und Piloten bei der Regelung des Drehmoments unterstützen soll, welches von den Triebwerken über die Antriebswelle zum Hauptgetriebe abgegeben wird. (Dögow, 2015 S. 5)

Eine Flug-Enveloppe bezeichnet die Flugbereichsgrenzen eines Flugobjekts, welche anhand von Zustandsgrößen definiert werden. Innerhalb dessen Grenzen kann ein Flugobjekt sicher geflogen werden. Die Flug-Enveloppe wird durch die zulässigen Minimal- und Maximalwerte der Zustandsgrößen gebildet. Beispiele für Zustandsgrößen eines Flugobjekts sind: Flughöhe, max. Anstellwinkel und max. Steigrate. Darüber hinaus bilden grenzwertige Flugbedingungen (bspw. der maximalen Triebwerkschub, die Überziehgeschwindigkeit, eine Steigrate von Null) mehrere Hüllkurven, welchen den Bereich umschließen. (Klußmann, et al., 2004)

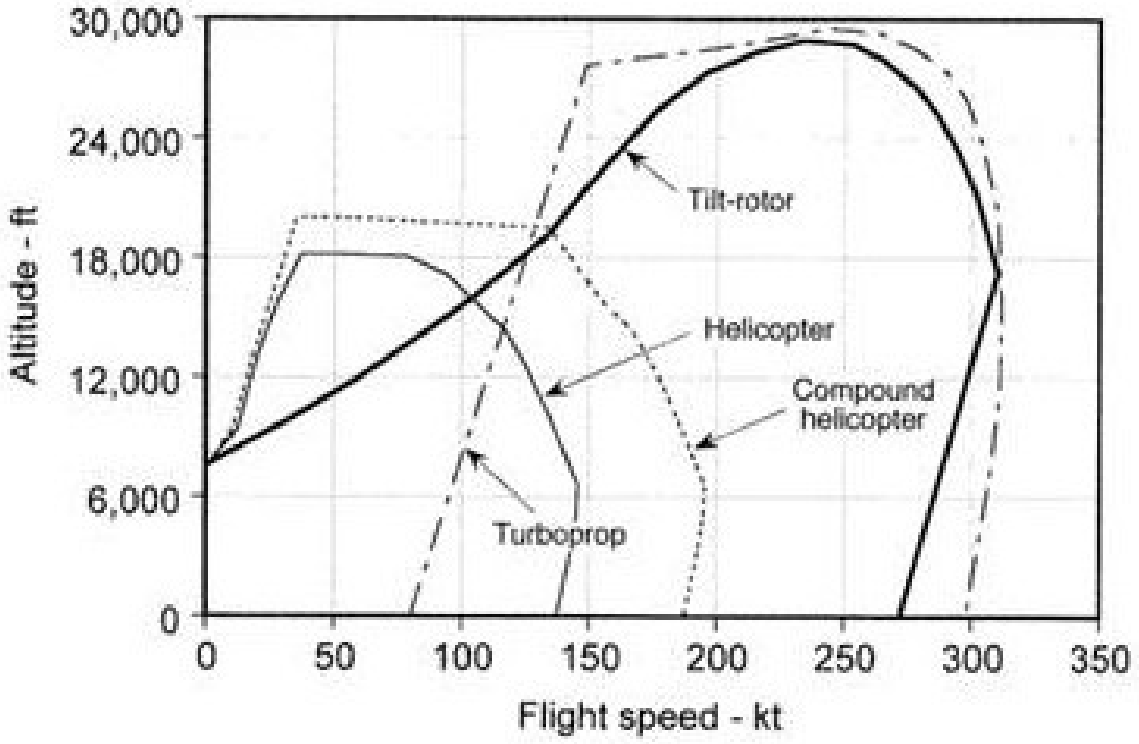


Abbildung 7: Geschwindigkeits-Höhen Flug-Enveloppe eines konventionellen Helikopters gegenüber einem Design der Verbundkonstruktion, einem Starrflügel-Turboprop sowie einem Kipprotor (Leishman, 2000)

2.4.1 Verschiedene Kraftelemente von aktiven Sidesticks

2.4.1.1 Einführung

Beim Ausführen der Masse (m), der Feder (k), des Dämpfers (b) und der Reibungs (F_{fric})-Kraft, hat das Sidetsick-Modell die folgende bekannte Bewegungsgleichung für ein System zweiter Ordnung.

$$\ddot{\delta} = \frac{b}{m}\dot{\delta} + \frac{F_{fric}\, sgn(\dot{\delta})}{m} + \frac{k}{m}\delta + \frac{F_{Hand}}{m}$$

Formel 1.1.: Bewegungsgleichung für ein System zweiter Ordnung

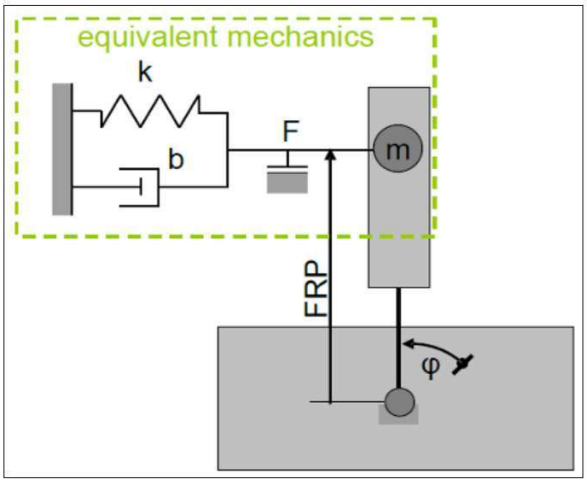


Abbildung 8: mechanisches Modell eines Sticks (Müllhäuser, 2014)

Die Abbildung 8 zeigt eine Darstellung eines mechanischen Stick-Modells in Form der Flight Control Mechanical Characteristics (FCMC). Die FCMC stellt das optimale Verhältnis aller für den Sidestick wichtigen Parameter dar. Neben den zuvor in Formel 1.1. definierten Parameter, sind auch der Finger Refernce Point (FRP) und die Stickauslenkung (φ) Bestandteil des Modells. (Dögow, 2015)

Ein aktiver Sidestick kann durch lokale Anpassungen dieser Parameter haptische Hinweise durch die Erzeugung von Kraftelementen herstellen. Im folgenden Kapitel werden Beispiele für diese Kraftelemente vorgestellt.

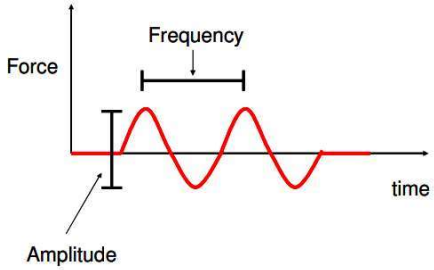
2.4.1.2 Beispiele für Kraftelemente

Verschiedene Hersteller von aktiven Sidesticks ermöglichen die Erzeugung verschiedener tactile Cues. Die Erzeugung erfolgt in der gewählten Entwicklungsumgebung des jeweilige Hersteller des Sidesticks.
Stirling, Liebherr, BAE Systems, Collins und Wittenstein Aerospace & Simulation sind bspw. Hersteller von aktiven Sidesticks für Helikopter-Steuersysteme. Weiterführende Informationen dazu gibt es im Kapitel 2.6 „Hersteller-Übersicht und Luftfahrtforschung“ dieser Arbeit.

Die folgende Liste zeigt einige Beispiele für Elemente, welche in Abhängigkeit des jeweiligen Herstellers, für das tactile Cueing erzeugt werden können.

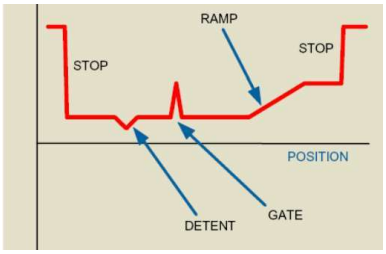
- Reibung (engl. Friction) (von Grünhagen, et al., 2010)

  Eine Kraft, die entgegen der Fahrtrichtung wirkt und durch Reibung verursacht wird. (Korrespondenz mit Betreuer (Mario Müllhäuser), 2021)

- Stick Shaker 

(Taylor, et al., 2008 S. 10)

  Eine Vorrichtung, die eine oszillierende Kraft auf die Steuerelemente des Piloten ausübt, um vor einem gefährlichen Zustand, z. B. einen Strömungsabriss, zu warnen. (Korrespondenz mit Betreuer (Mario Müllhäuser), 2021)

- Detent 

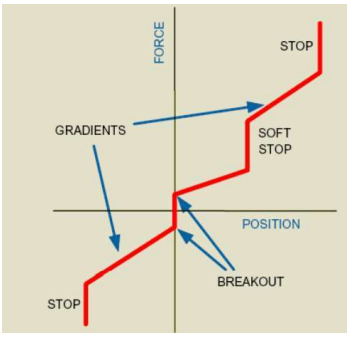
(Taylor, et al., 2008 S. 6)

  Ein Kraftübergang im Gefühl eines Sticks (in der Regel eines Gashebels), der erreicht werden kann mit Hilfe einer Kugel oder einem Nachfolger in Bewegung, welche sich über ein Loch, eine Rille oder ein Element mit einem steilen Level, welche sich als Nocke darstellt, bewegt. (Korrespondenz mit Betreuer (Mario Müllhäuser), 2021)

- Gate (Bild s. Cue-Element Detent)

  Die Blockierung der Bewegung eines Hebels (in der Regel eines Throttles), die

durch einen vorgesteuerten Hebel oder einen Solenoid aufgehoben werden kann. Beispiele sind ein Tor zur Verhinderung des Umkehrschubs im Flug oder das Einschalten des Motors Grundleerlauf im Flug. (Korrespondenz mit Betreuer (Mario Müllhäuser), 2021)

- Breakout 

(Taylor, et al., 2008 S. 6)

Eine Kraft, die an den primären Steuerelementen des Piloten erforderlich ist, um die anfängliche Bewegung der Steuerposition zu erreichen. Sie wird in der Regel als Vorspannung der Rückholfeder plus die Reibung realisiert. (Korrespondenz mit Betreuer (Mario Müllhäuser), 2021)

- Hardstop/Endstop (Bild s. Cue-Element „Gate"; es handelt sich um die beiden Elemente mit "STOP"-Bezeichnung)

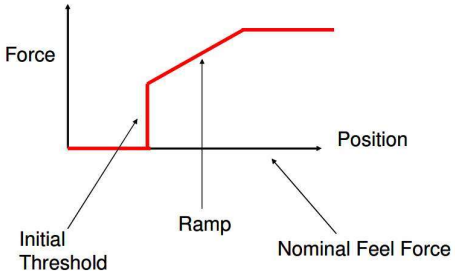
„Der Hardstop wird durch die maximal verfügbare Gegenkraft des Sticks erzeugt. Er beschränkt den Steuerweg in eine bestimmte Richtung. Die Steuerautorität des Piloten kann mit diesem Mittel beschränkt werden." (Dögow, 2015)

- Softstop (von Grünhagen, et al., 2010)

„Als Softstop, wird ein weicher Anschlag bezeichnet, welcher durch eine erhöhte Kraft übersteuert werden kann. Diese Softstops lassen sich in allen Achsen jeweils für

positive und negative Steuerausschläge programmieren, wobei jeweils die Position, Stärke und Breite des Softstops vorgegeben werden muss." (Dögow, 2015)

- Softstop mit Reibung (von Grünhagen, et al., 2010)

- Rampe mit Softstop 

(Taylor, et al., 2008 S. 10)

Cue Form	Vorteile	Nachteile
Softstop	- Der Hinweis zeigt einen kritischen Grenzwert eindeutig an und kann von den Pilotinnen und Piloten übersteuert werden. - Die Grenzwertgrenze ist präzise festgelegt. - Die Richtung des Sticks um die Grenzwertverletzung zu beenden, ist klar erkennbar.	- Der Pilot muss die Kraft des Collective halten, ansonsten bewegt sich der Stick nach unten bis er den Grenzwert nicht überschreitet. - Der Hinweis könnte mit der Trimmung verwechselt werden. - Es besteht die Möglichkeit, dass der Stick, wenn er aus dem Grenzwertbereich kommt, überschießt.
Detent	- Die Subtilität des Hinweises könnte ihn für einen Hinweis in	- Der Hinweis könnte zu subtil sein, weswegen der Pilot/die Pilotin ihn

	beratender Funktion eignen, z.B. einen Hinweis über eine minimale Dauerleistung.	ohne Beachtung übersteuern könnte. - Die Richtung um die Grenzwertüberschreitung zu beenden, ist nicht klar erkennbar. - Das Cue birgt die Gefahr, dass der Stick nach dem Einrasten das Cue überschießt.
Gate	- Der Hinweis hält einen kleinen, lokal gesetzten Grenzwert deutlich ein, da der Stick nicht an der Hinweis-Position stehen bleiben kann.	
Rampe	- Die Höhe der Grenzwertverletzung wird deutlich angezeigt. - Die Richtung des Sticks um die Grenzwertverletzung zu beenden, ist klar erkennbar.	- Die Grenzwertüberschreitung ist nicht gut definiert. - Der Pilot muss die Kraft des Collectives halten, ansonsten bewegt sich der Stick nach unten, bis der Grenzwert nicht mehr überschritten wird. - Der Hinweis könnte mit der Trimmung verwechselt werden.
Shaker	- Die Spürbarkeit des Hinweises ist einzigartig und kann nicht mit einem anderen Steuergefühl verwechselt werden. - Der Hinweis ist mit einer hohen Frequenz/hoher Amplitude signifikant spürbar, was für das Einhalten eines	- Shaker mit einer hohen Frequenz/hohen Amplitude sind möglicherweise zu deutlich spürbar um sie für weniger kritische Grenzwerte zu nutzen. - Shaker mit einer hohen Frequenz/hohen Amplitude können

	kritischen Grenzwerts optimal ist. - Die Kraft des Cues muss nicht gehalten werden um den Stick am nach unten gehen zu hindern.	möglicherweise pilotenindizierte Schwingungen (PIO) auslösen. - das Cue benachrichtigt zwar die Piloten, kann aber die Überschreitung nicht verhindern - kann den Grenzwert bei Überschreitung nicht absenken
Hardstop/Endstop	- Der Hinweis hält einen kritischen Grenzwert vollständig ein.	- Der Hinweis kann nicht von dem Piloten/der Pilotin übersteuert werden und führt so zu Einschränkungen der Steuerautorität.

Tabelle 9: Vor- und Nachteile verschiedener Cue-Formen; in Anlehnung an (Taylor, et al., 2008 S. 10-11)

Aus den beschriebenen Elementen wurde eine Auswahl von typischen Elementen getroffen. Die Elemente sind in Abbildung 9 zu sehen. Die Auswahl begründet sich auf den Einsatz bzw. die Funktion der Cues in einer Mission. Für die vorliegenden Untersuchungen waren diese Elemente am wahrscheinlichsten für die erfolgreiche Gestaltung des Cues. Der Einsatz des Cues ist für die Hindernisvermeidung, als Drehmoment-Absicherung und/oder das Einhalten von Flug-Enveloppen definiert.

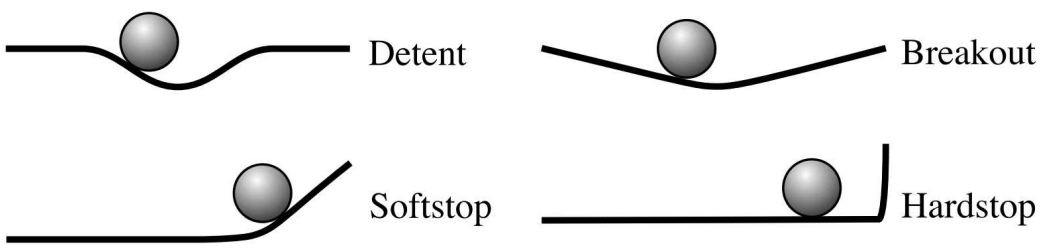


Abbildung 9: Verschiedene Kraftelemente eines aktiven Sidesticks (Abildgaard, 2013)

Die aktiven Sidesticks des 2PASD des Deutschen Zentrums für Luft- und Raumfahrt e.V. am Standort Braunschweig verfügen in dieser Untersuchung aus insgesamt fünf Elementen. Die Kraftelemente umfassen eine Raste (engl. Detent), dem Element „Ausbrechen" (engl. Breakout), dem sanften Anschlag (engl. Softstop), dem festen Anschlag (engl. Hardstop) und der Reibung (engl. Friction).

2.4.1.3 Der Softstop

Ein Kraftelement in einem aktiven Steuerorgan entsteht durch eine Funktion, welche verschiedene Formen annehmen kann. Eine typische Form eines Softstops zeigt Abbildung 10.

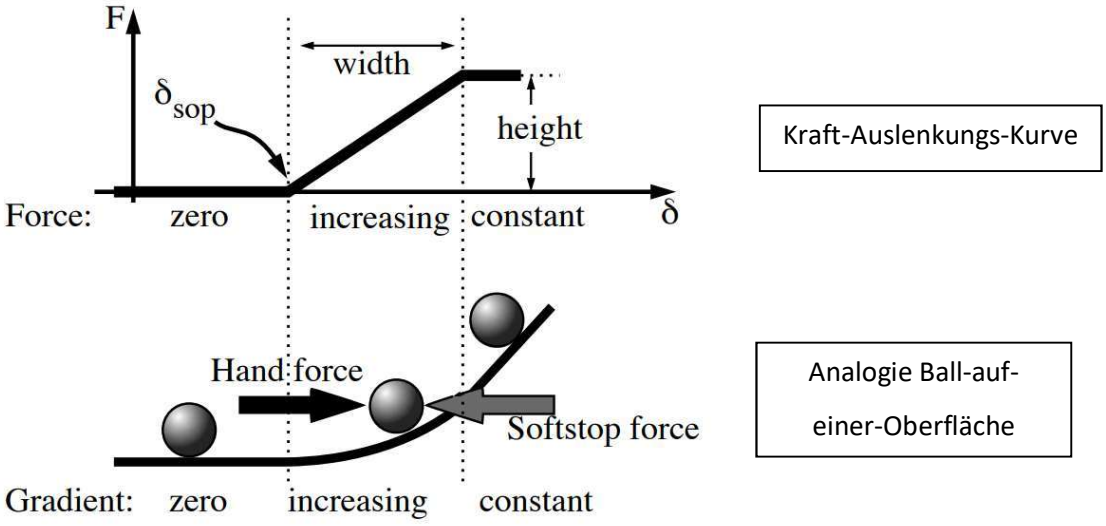


Abbildung 10: Der Softstop als Kraft-Auslenkungs-Kurve und Ball-auf-der-Oberfläche-Analogie (Abildgaard, 2013 S. 59)

Die dargestellte Kraft-Auslenkungs-Kurve umfasst insgesamt drei Bereiche. Es handelt sich dabei die Nullkraft, lineare Kraft und die konstante Kraft. Der Anfangspunkt des Softstops δ_{sop} ist definiert als der Punkt, an welchem der ansteigende Kraftbereich beginnt. (Abildgaard, 2013 S. 58/59)

Die Steigung des Kraftbereichs wird durch eine Breite (eng. Width) und eine Höhe (engl. height) definiert. Die Breite und Höhe definieren zusammen eine Steilheit. Der ansteigende Kraftbereich liegt typischerweise im Bereich von 2 bis 3 % der gesamten Auslenkung des Sticks.
Die Höhe des Softstop wird in der Regel so gewählt, dass der Softstop deutlich erkennbar ist. Eine zusätzliche Funktion besteht darin, dass der Pilot den Softstop für eine definierte Zeit übersteuern kann. Typische Werte für den Softstop liegen zwischen 20 und 30 N. (Abildgaard, 2013 S. 59)

Die Vorteile eines Softstop sind:

- Der Hersteller kann ein Betriebs-Fenster von Bewegungen programmieren, welches mit einer bestimmten Stärke bzw. einem zusätzlichen (Steuer-)Aufwand gekennzeichnet ist.
- Wenn der Pilot einen gefährlichen Bereich bzw. Flugzustand erreicht, kann das System einen fühlbaren Stop in der Steuerung bereitstellen. Der Stop kann durch einen deutlich stärkeren Aufwand gekennzeichnet sein mit dem Ziel mehr Kraftaufwand über diese Softstop-Position „zu ziehen" und so eine sichere Situation zu erreichen. (Beispielsweise könnten Vorgaben zur Einhaltung einer Flug-Envelope auf diese Weise gegeben werden)
- Es können die Bewegungen, die Feedbacks - alle Empfindungen, welche der Pilot hat - zu den Wünschen des Flugzeug-Herstellers hinzugegeben und zugeschnitten werden. Dadurch kann das Design des Cockpits dem Design des Sidesticks entsprechen. Diese Fähigkeit wird in Hinblick auf Bewegung, Programmierbarkeit usw. gegeben. Dadurch kann das System individuell auf den Wunsch des Flugzeug-Hersteller zugeschnitten und ihm entsprechend angeboten werden.
- Quellen: (Collins Aerospace, 2019) (Abildgaard, 2013)

2.5 HERSTELLER UND LUFTFAHRTFORSCHUNG

Amerika

US Army (2005): Auftrag zur Entwicklung eines Active Inceptor Systems (AIS) – die Weiterentwicklung der passiven Flugsteuerung

US Army: Produktverbesserungsprogramm (2008). Auf Grundlage des Erprobungsträgers RASCAL JUH60-A wurde im Helikopter UH60-M die mechanische Steuerung durch ein Fly-by-X System mit einem aktiven Steuerorgan ausgetauscht. Bei der Entwicklung des CH53-K sollen ebenfalls aktive Steuerorgane verbaut werden.

Unites Sates Marine Corp (2007): Entwicklungsprogramm für eine Sikorsky CH53-K Super Stallion

National Research Council (NRC) Canada

Rotorcraft Aircrew Systems Concepts Airbone Lab (RASCAL) von NASA Ames

Collins Aerospace (U.S.): active Sidesticks für Flächenflugzeuge und Helikopter (Collins Aerospace, 2021)

Europa

Wittenstein Aerospace & Simulation: Active Sidesticks im südkoreanischen Überschallflugzeug T-50 Golden Eagle (Wittenstein, 2021)

BAE Systems, nachträgliche Einrüstung des Active Parallel Actuators in den Hubschrauber-Typ, BAE Systems, Vereinigtes Köngreich, London: Herrsteller von Active Control Sidesticks (ACS) (BAE Systems, 2021)

CH-47; ein elektrisches Steuerkraftsystem, welches in das vorhandene Steuergestänge eingefügt wird und dadurch Tactile Cueing ermöglicht

Liebherr (Liebherr, 2021) (Deutschland): Sidestick-Hersteller

AugustaWestland (italienschischer Hersteller)

Collins Aerospace, Hersteller von Pilotensteuerungssystemen, darunter auch Active Control Sidesticks (Dögow, 2015) Cockpit & cabin | Ratier Figeac (ratier-figeac.com)

Stirling Dynamics, Hersteller von aktiven Steuern wie Sidesticks, throttles (Drosselklappensteuerung, vielleicht löschen), collectives, cyclics und Pedale (Quelle: Active Controls | Stirling Dynamics (stirling-dynamics.com)

Das Projekt SiRaSKoF-H vom DLR e.V. des IV. Luftfahrtforschungsprogramm (4. Teil) des BMWi zu nennen, welches 2012 begonnen wurde. Die Abkürzung SiRaSKoF-H steht für „die Entwicklung einer sicheren Rechner-Architektur für aktive Steuerorgane und Konzepte für einen optimierten Flugbetrieb mit Hubschraubern". Die Schwerpunkte der Forschung umfassten u.a. die Ausfallsicherheit und Koordination einer Dual-Pilot Konfiguration sowie eine Gestaltung haptischer Assistenzsysteme. (Dögow, 2015 S. 5)

Airbus Helicopter Deutschland (von 1992 bis 2013 Eurocopter), Liebherr Aerospace Lindenberg Deutschland, das Bundesamt für Wehrtechnik und Technologie und das Deutsche Zentrum für Luft- und Raumfahrt e.V. entwickelten den Forschungshubschrauber ACT/FHS, welcher zur Forschung und Vorführung neuer Technologien genutzt wird. Der Erstflug erfolgte 2009 mit zwei aktiven Sidesticks. Der ACT/FHS Eurocopter 135 verfügt über eine vierfach redundante FBW-Steuerung (Stand 2002).

DLR e.V: (2013): Forschungsprojekt SMART (SMART ist alles, Dauerprojekt). Es wurde eine Untersuchung durch die Anpassung der dynamischen Eigenschaften der aktiven Sidesticks in einem geregelten Hubschrauber untersucht. Es handelt sich um eine weiterführende Untersuchung in diesem Forschungsfeld. (Müllhäuser, 2016 S. 57)

microHELIS.de, Aachen, Deutschland: Collective Pilot Sticks für Home Cockpits/Simulatoren (microhelis.de)

Bell Helicopter: Bell 525: FBW-Steuerung und Sidesticks

Asien

Active Inceptor System (AIS) - Entwickler; Helicopter Side Stick Controller; der japanischen Firma Advanced Technology Institute of Commuter-Helicopter, Ltd.. (ATIC) (Taylor, et al., 2008 S. 4) (Kanbayashi, et al., 1999)

Korea Aerospace Industries entwickelte den Kampfflugzeugtrainer des Überschallflugzeugs T-50 (Erstflug im August 2002, seit 2005 in Serienproduktion). Er verfügt über einen aktiven Sidestick, welcher in Zusammenarbeit mit BAE Systems und Wittenstein entwickelt wurde. (Müllhäuser, 2016 S. 13)

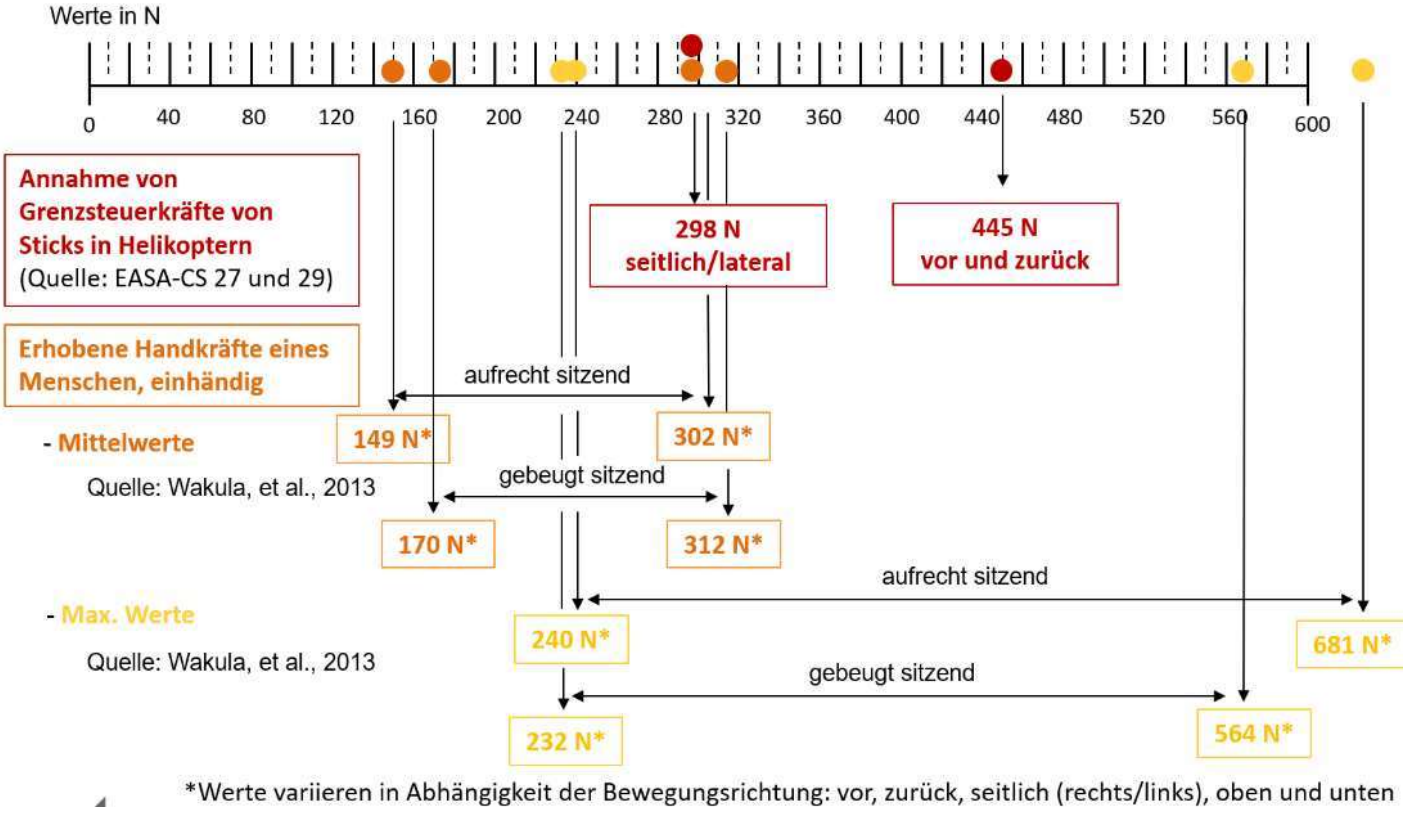


Abbildung 11: Gegenüberstellung der Annahmen von Grenzsteuerkräften von Sidesticks in Helikoptern und erhobenen Handkräften aus Studien

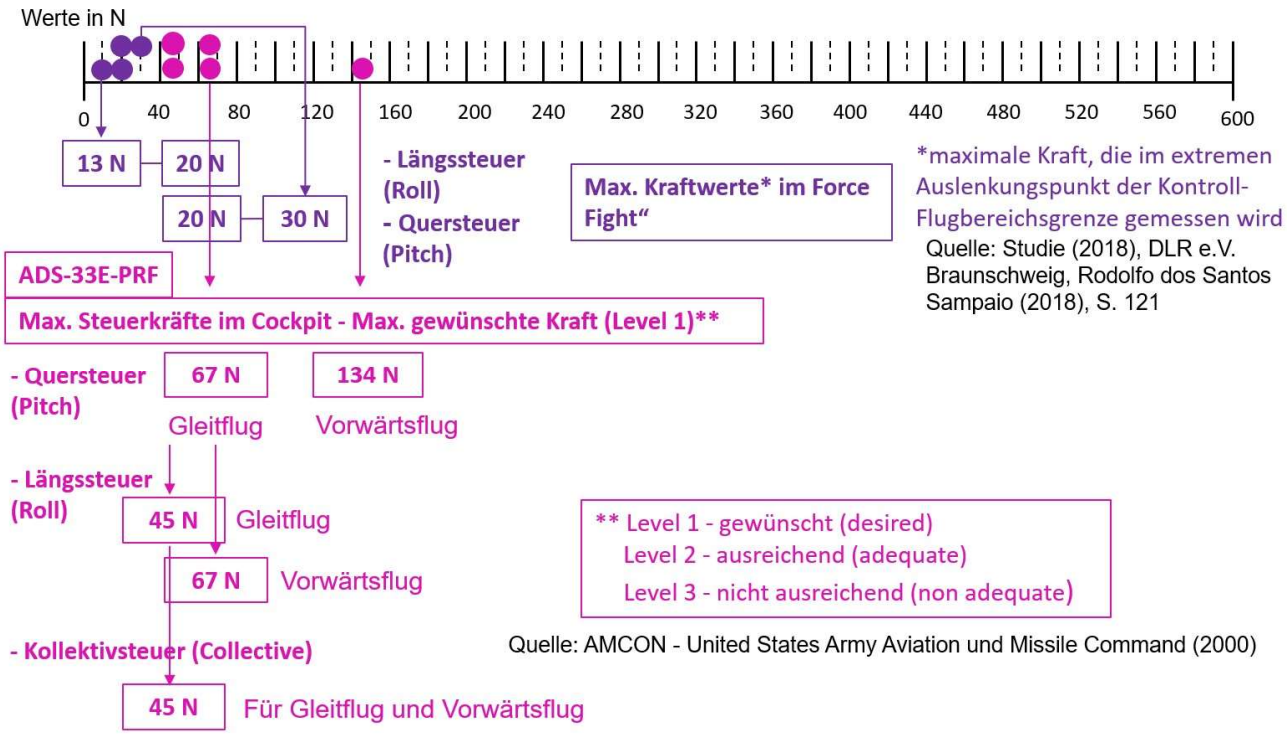


Abbildung 12: Übersicht von maximalen Kraftwerten im Force Fight und maximalen Steuerkräften im Cockpit (gemäß Richtlinie ADS-33E-PRF)

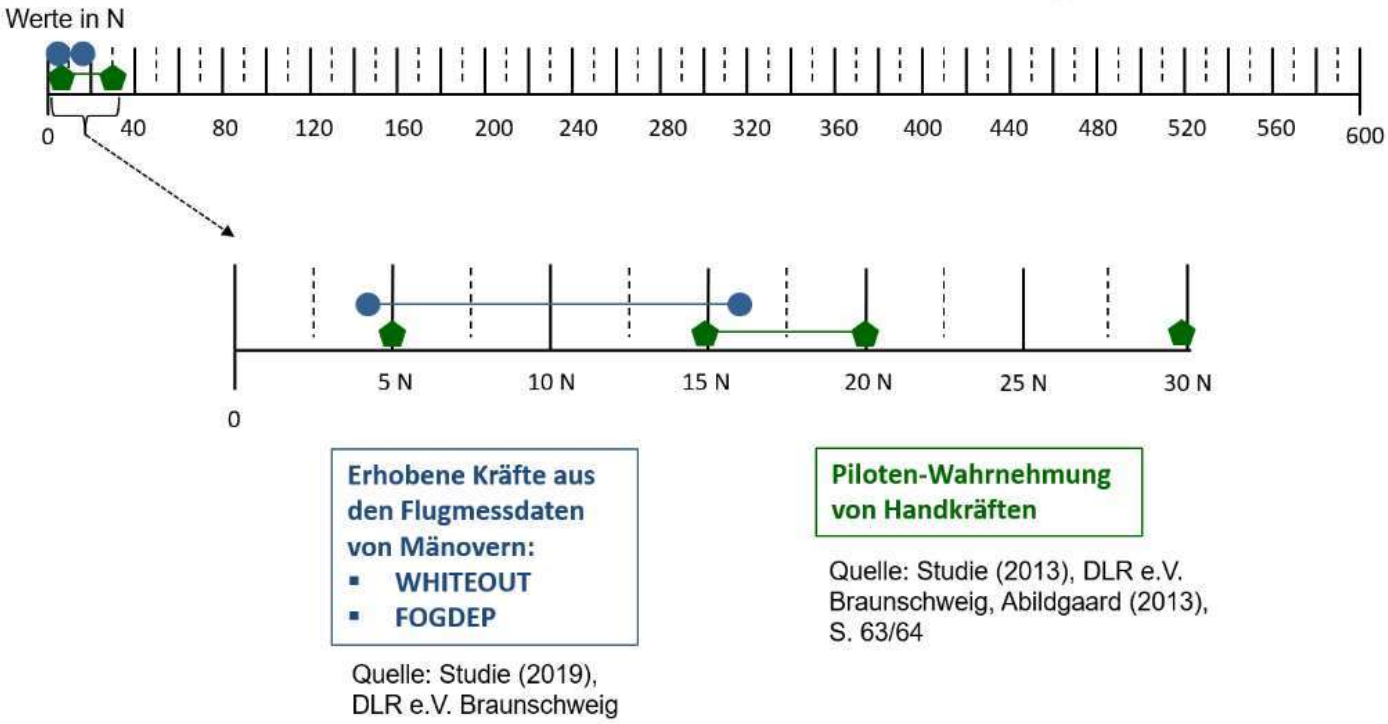


Abbildung 13: Übersicht von erhobenen Handkräften aus Flugmanövern und evaluierten Piloten-Wahrnehmung von Handkräften

Legende Abbildung 13

FOGDEP	FOG Departure, dt. Abflug im Nebel
WHIESC	Whiteout Escape, dt. Entkommen aus extrem schlechter Sicht wie bspw. einem Schneesturm
MP1	Mission Profile (MP) Whiteout Escape - vertical take off profile; dieses Profil wird durch eine zusätzliche Flugphase ergänzt
MP2	Mission Profile (MP) Fog Departure - horizontal takeoff profile (Literatur Mario)

Die Abbildung 13 zeigt eine Übersicht von Handkräften aus gemessenen Flugdaten und den Piloten-Wahrnehmungen von Handkräften. Beide Messungen wurden im DLR eigenen Forschungshubschrauber EC 135 ACT/FHS durchgeführt.

Die Handkraftstufen, welche in Abbildung 13 anhand von grünen Symbolen zu sehen sind, wurden von Piloten in Studien definiert. Die Einteilung der Kraftstärken der Testpiloten sind in der Grafik in Abbildung 3 zu finden. Dabei ist zu beachten, dass es sich bei dem in den Studien verwendeten System des Herstellers Wittenstein handelt. Andere Systeme aktiver Steuerorgane können gegebenfalls von diesen Werten deutlich abweichen.
Zusammenfassend ist zu sagen, dass sich in dieser Studie alle relevanten Handkräfte-Niveaus im Bereich von 5 und 30 N bewegten. Ein wirksamer tactile Cue sollte zwischen 15 und 20 N gesetzt werden und nur geringfügig darüber oder darunter liegen. Die Kraftaufbringung unter 15 N wurde als zu gering bis hinzu überhaupt nicht wahrgenommen. Kräfte über 20 N wurden als zu ermüdend und unpraktisch beschrieben.

4 VORGEHEN ZUR ENTWICKLUNG NEUER TACTILE CUE-FORMEN FÜR AKTIVE SIDESTICKS

Für die Entwicklung von neuen Tactile Cue Formen wurden zu Beginn einige Fragen geklärt. Darunter sind das Einsatzgebiet, die einzuhaltenden Grenzwerte und die daraus resultierende Zeit für die Nutzung des oder der Cues zu nennen.

Für die vorliegenden Untersuchungen sind bspw. die folgenden Fragestellungen zu diskutieren: Wie gestaltet sich eine Situation bzw. ein Flugmanöver bei welcher der Pilot das zu schützende Limit (z.B. das Drehmoment) erreicht? In welchen Szenarien/Manövern treten diese Situationen darüberhinaus auf? Wie lange dauern sie i.d.R.?

Ein Überschreiten des Drehmomenten-Limits erfolgt z.B. typischerweise während des Startmanövers, da der Hubschrauber über viel Kraftstoff verfügt, an Höhe gewinnen muss und darüberhinaus die Luftdichte am höchsten ist. Weiterhin sind Überschreitungen von Limits an heißen Tagen, in großer Höhe, bei Manövern mit hohem Leistungsbedarf, beim Fliegen mit Seitenwind sowie bei der Landung im Allgemeinen zu beobachten. Auch beim Eintreten eines einseitigen Triebswerksausfall während des Vorwärtsflugs und bei der Landung ist eine Übersteuerung denkbar. Hierbei wird eine höhere Leistung benötigt und ein eintretender Leistungsausfall wird deutlich spürbar für die Pilotin oder den Piloten.

Die Dauer eines Manövers dauert bis zu 60 Sekunden. In der Regel befindet sich die Zeitspanne zwischen 45 und 60 Sekunden

4.1 ANFORDERUNGEN AN TACTILE CUES

Dieses Kapitel soll einen Überblick über allgemeine und spezielle Anforderungen an tactile Cues geben. Die dargestellten speziellen Anforderungen wurden mit dem Ziel von Verbesserung der Präzision und Steuerkraft der tactile Cues gemäß der Aufgabenstellung aufgestellt.

4.1.1 Im Allgemeinen

Im Allgemeinen sind die Anforderungen an ein Tactile Cue nach *Abildgaard* wie folgt charakterisiert:

- Cueing sollte in erster Linie intuitiv und einfach zu bedienen sein und die Arbeitsbelastung des Piloten senken. Die Cueing-Funktion sollte mehr als den zusätzlichen Aufwand, der durch die Interaktion mit ihr entsteht, entlasten - ansonsten ist eine Cueing-Funktion überflüssig.
- Darüber hinaus werden jegliche Abhängigkeiten zwischen Cueing-Funktionen und/oder anderen Funktionalitäten als nachteilig angesehen. Insbesondere logische Verknüpfungen wie IF (dt. WENN) dann DO (dt. MACHE) oder DO NOT (dt. MACHE NICHT) erfordern einen mentalen Aufwand um den Überblick zu behalten. Dieser zusätzliche mentale Aufwand muss auf ein Minimum reduziert werden.
- Cueing sollte ein Limit setzen, aber niemals das letztes Wort darstellen. Sollte der Pilot sich wünschen einen angezeigten Grenzwert zu missachten, dann sollte er das mit einem geringen Aufwand machen können.
- Cueing sollte niemals täuschen oder den Piloten in eine gefährliche Situation leiten. Weiterhin sollten Cues ein ruhiges und beständiges Gefühl geben, andernfalls würde der Pilot nervös werden, wenn er so viel Arbeitsbelastung aus der reinen Aufgaben der Überwachung des Cues selbst hätte. (Abildgaard, 2013 S. 44)

4.1.2 Im Speziellen gem. Aufgabenstellung

Dieses Kapitel behandelt die Anforderungen an neue tactile Cues gemäß Aufgabenstellung in Verbindung mit ihrem Einsatzgebiet.
Das erste Ziel ist die Erhöhung der Präzision der tactile Cues. Ein weiteres Ziel ist es die von den Pilotinnen und Piloten benötigte Steuerkraft zu überprüfen. Wenn das Ergebnis ergibt, dass eine geringere Kraftanforderung als bisher benötigt wird, soll die Kraftanforderung an das System infolge der Ergebnisse angepassst werden. Optimalerweise soll die Krafthöhe minimiert werden.

Für die durchgeführten Studien wurden die folgenden Vorüberlegungen getroffen:

- Das neue Tactile Cue soll im Hinblick auf den Einsatz für eine Hindernisbegrenzung, die Torque-Protection oder/und die Einhalten einer Flug-Enveloppe untersucht werden.
- Während der Studie sollen die Pilotinnen oder Piloten Aufgaben erhalten. Diese können in Form eines Manövers oder einer Secondary Task dargestellt werden. Sie dienen der Simulation des realen Flugbetriebs und stellen die Bedingungen das Cues während einer realen Flugaufgabe zu testen.

Anforderungen tactile Cues

1. Die Optimierungskriterien ergeben die abhängigen Variablen. Diese sind die Folgenden:

   a) Untersuchung der Güte des Kontakts:

   - Bemerkt die Pilotin oder der Pilot den Kontakt? Bemerkt die Pilotin oder der Pilot, wenn der Kontakt verloren geht?
   - Wie lange hält die Pilotin oder der Pilot den Kontakt mit dem Softstop?

   b) Dauer und Stärke der Oszillationen prüfen

   - bei Cue Kontakt,
   - beim Halten am Cue,
   - beim Überschreiten des Cues,
   - beim Halten der Überschreitung des Cues.

2. Die unabhängigen Variablen wurden wie folgt definiert.

   a) Reibung
   b) Steifigkeit bzw. Anstieg des Softstop
   c) Kraftvariation – Form des Cues und die Haltkraft

   Weitere Aspekte bezugnehmend auf unabhängige Variablen:

   - So ein Cue muss wahrnehmbar sein, begrenzen und einseitig/in eine Richtung führen können. Eine Voraussetzung ist, dass der Pilot Kontakt zum Cue aufnimmt.

- Der Beginn des Softstop ist für den Piloten nicht immer deutlich erkennbar. Die Pilotin oder der Pilot "zieht" manchmal „darüber" ohne den Softstop zu bemerken. Diese Erkenntnis ist wichtig für den späteren Einsatz des Cues. Der Beginn des Softstop kann - je nach Einsatz - einem ansteigenden Grenzwert gleichgesetzt werden. Der Grenzwert kann beispielsweise einem Grenzwert aus einer Flug-Enveloppe zugeordnet sein.

  Die Steigung des Softstop soll demnach den weiteren Anstieg/die Erhöhung des Grenzwertes verdeutlichen. Die Steigung soll bis zu einer definierten Grenze – einem Plateau am Ende der Steigung des Softstop - verlaufen. Das obere Plateau gibt der Pilotin/dem Piloten die Möglichkeit, den eingestellten Grenzwert, welcher dem Cue und dem Softstop gleichgesetzt werden kann, zu übersteuern.
- Ohne den Einsatz des neuen Cue würde der Pilot bei der Verwendung eines Softstop mit einer niedrigen Steigung/Amplitude auf einer Grenze der Flugenveloppe fliegen ohne sich dieser bewusst sein.
- Daraus folgt, dass der Anstieg in Kombination mit der Kraftausprägung für den Softstop getestet werden sollte. Diese Kombination sollte in einem Bereich von "gut fühlbar" bis "noch für jede bzw. jeden bezüglich der Kräfte "machbar" definiert werden.

- Die unabhängige Variable „Grundreibung“:
  Hier soll der Einfluss auf die zu optimierenden Größen untersucht werden.
  Die Grundreibung ist nicht konstant, sondern vom Hersteller abhängig. Ein Wert zwischen 3-10 N ist denkbar. Voruntersuchungen auf versch. Systemen haben zu unterschiedlichen Betätigungskräften bzw. Haltekräften am Softstop geführt. Neben einer unterschiedlichen Bauform – z.B. einem Kurzarm-Sidestick gegenüber einem Langarm-Kollektivhebel – wurden dort auch unterschiedliche Reibungswerte eingestellt. Daher soll der Einfluss der Grundreibung auf die Betätigungskraft und Haltekraft am Softstop untersucht werden.

- Die unabhängige Variable „Steifigkeit“ – der Anstieg des Softstop:

Der Anstieg der neun Cueing-Variante muss einen Mindestwert haben, sodass dieser von der Pilotin/dem Piloten eindeutig wahrgenommen werden kann. Um welchen Mindestwert handelt es sich?
Natürlicherweise wird der Maximalwert des Anstiegs darüber hinaus durch die verwendete Hardware begrenzt. Voruntersuchungen ergaben, dass eine unendliche Steigerung (u.a. sprunghaft) zu Verwechselungen bei einer gleichzeitig eingestellten Reibung führen kann. Daher wird vermutet, dass es einen Maximalwert gibt, der nicht überschritten werden darf, damit die Pilotin/ der Pilot auch bei Vorhandensein von Reibung folgen kann.

- Die unabhängige Variable „Form des Cues“:
  Gewöhnlich ist der Softstop ein lokal begrenzter linearer Gradient (Federkraft). Voruntersuchungen haben gezeigt, dass die Kraft während des Kontakts mit dieser Art des Softstop variiert. Außerdem verwenden unterschiedliche Pilotinnen und Piloten unterschiedliche Kraftniveaus. Dies hat einen Einfluss auf die Präzision, weil unterschiedliche Kräfte zu unterschiedlichen Auslenkungen am Softstop führen. Deswegen soll untersucht werden, ob sich durch Hinzufügen von nicht-linearen Elementen eine Erhöhung der Präzision, bzw. Verringerung der Varianz der gemessenen Pilotenkräfte, erreichen lässt.

- Die unabhängige Variable „Kraftvariationen/Haltekraft“:
  Die zentrale Frage ist: Bei welcher Kraft ist das Halten des Limits für die Pilotin/den Piloten deutlich spürbar, aber "zu halten". Ziel ist es, dass die Pilotin oder der Pilot das Limit für eine bestimmte Zeit halten kann, es jedoch zeitnah wieder reduzieren möchte. Hierfür sollte die notwendige Haltezeit definiert werden. Wahrscheinlich ist diese abhängig von dem Einsatz des Cues, da sich beispielweise die Grenzwerte einer Flug-Enveloppe und die Grenzwerte für die Überschreitungsdauer eines bestimmten Drehmoments nicht gleichen.

5 2PASD-FLUGSIMULATORSTUDIEN

Abbildung 14: Der Dual Pilot Active Sidestick Demonstrator (2PASD) (Sampaio, 2019)

Das am Standort Braunschweig des Deutschen Zentrums für Luft- und Raumfahrt ansässige Institut für Flugsysteme entwickelte während des Luftfahrtforschungsprojekts LuFo-IV im Teilprojekt SiRaSKoF-H einen Flugsimulator mit einer integrierten Helikopter-Sidestick-Steuerung. Die Sidestick-Steuerung wird mit Hilfe eines gekoppelten Systems umgesetzt und bietet die Möglichkeit die jeweiligen Steuerorgane von Piloten und Co-Piloten zu koppeln bzw. entkoppeln. Diese Eigenschaft des Simulatorsystems eröffnet den Pilotinnen und Piloten mehr Sicherheit, Situationsbewusstsein und die Fähigkeit zur Kontrollübernahme - insb. in Konfliktsituationen zwischen Piloten und Co-Piloten. Der Simulator umfasst zwei Pilotensitze, welche jeweils mit aktiven Sidesticks und aktiven Pedalen ausgestattet sind. Der Einsatz von haptischen Hinweisen und ihren verschiedenen Einsatzmöglichkeiten ist ein weiteres Merkmal. Auf Englisch wird der Helikopter-Flugsimulator als Dual Pilot Active Sidestick Demonstrator (2PASD) bezeichnet. Er ist in Abbildung 15 dargestellt. (Dullo, et al., 2019)

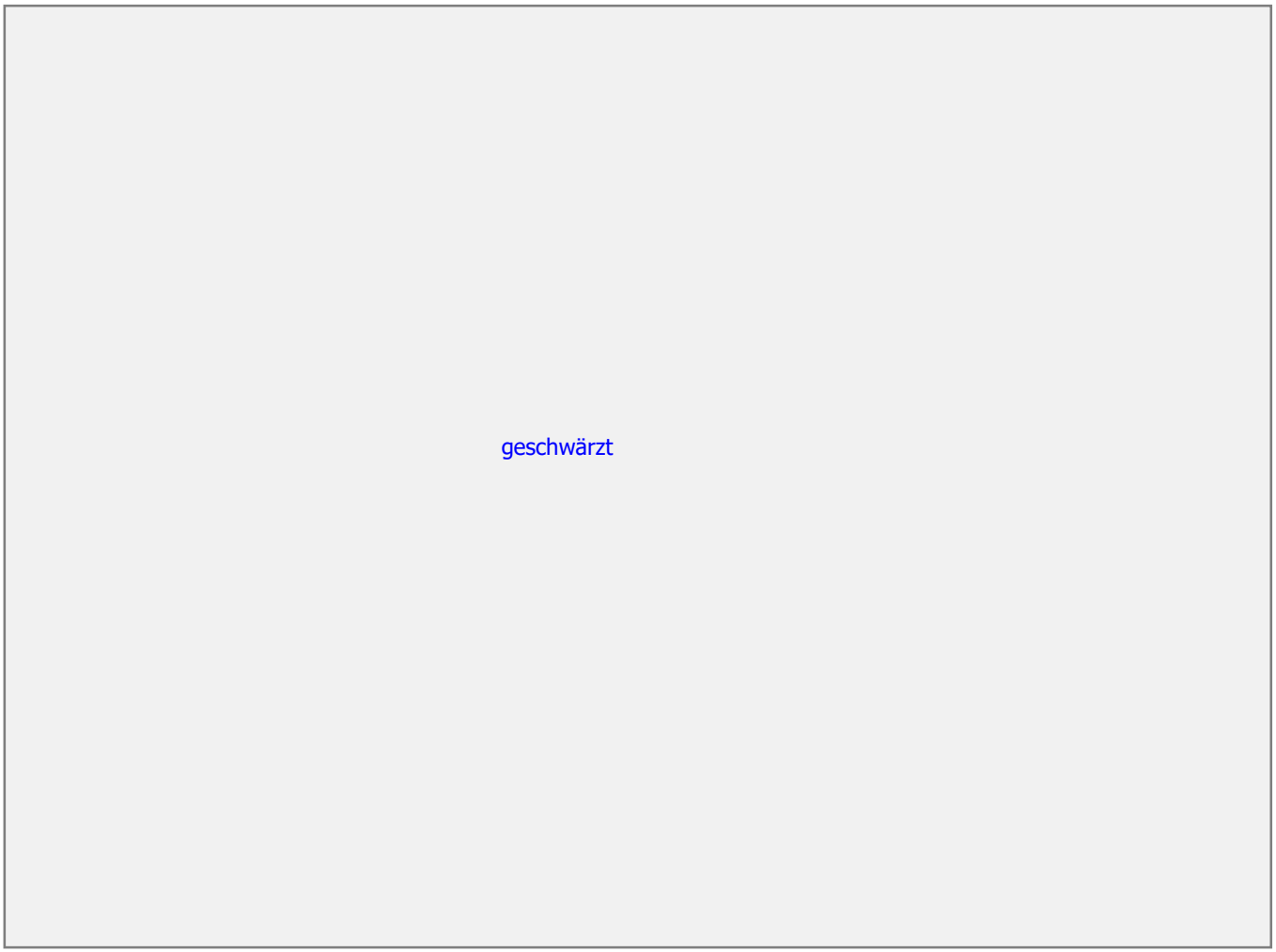


Abbildung 15: Beispiel eines integrierten elektrischen Kontroll-Ladesystems eines Helikoptersimulators; Quelle: Korrespondenz mit Betreuer

Die Abbildung 16 zeigt ein typisches Beispiel für eine Systemintegration eines Helikoptersimulators. Die Unterstützungssoftware mit dem Namen Aktiv Tooolkit ist in die Kontroll-Ladesysteme des Simulators integriert. Der Host Computer und das Aktiv Toolkit kommunizieren mit dem Kontroll-Ladesystem über eine Ethernet-Verbindung (TCP oder UDP). Auch die Kommunikation über eine seriell verfügbare RS232-Verbindung ist denkbar. Das System Control Modul (SCM) wird über die Verbindung(en) mit dem Aktiv Toolkit und dem Host Computer verbunden. Die Befehle des Aktiv Toolkits werden auf die gleiche Weise verarbeitet wie die des Host Computers. Das System antwortet jeweils auf den zuletzt empfangenen Befehl. Das bedeutet darüberhinaus, dass ein Aktiv Toolkit parallel zum Host mit dem Ladesystem verbunden werden kann.

5.1 VORBEREITUNG

Es wurde eine Reihe von Untersuchungen vor dem Experiment verfolgt um eine optimale Konfiguration des Cues und deren Anforderungsbedingungen zu ermitteln. Die Optimierungs- und Anforderungskriterien können im Kapitel 4.1. *Anforderungen an tactile Cues* eingesehen werden.

Auf Grundlagen dessen wurde ein Vorexperiment geplant.

Das Vorexperiment wurde mit einem Mitglied aus dem Helikopter-Arbeitsteam des DLRs durchgeführt. Die Ergebnisse führten zu einer Verbesserung des aufgestellten Testplans und finalisierte nochmals die zu untersuchenden Bedingungen für die eigentlichen Studien.

5.2 FRAGEBÖGEN

Zu Beginn der Studie erhielt jede Testperson eine Einverständniserklärung mit einem biographischen Fragebogenteil.

Um eine optimale Evaluation der Simulator-Aufnahmen und der Eindrücke der Testpersonen durchzuführen, wurden einschlägige Fragebögen ausgewählt. Die Recherche von relevanten Fragebögen wurde in den Datenbanken des DLRs, im Speziellen in der in Braunschweig ansässigen Abteilung für Hubschrauber durchgeführt. Darüber hinaus wurde einschlägige wissenschaftlicher Literatur herangezogen. Es standen die folgenden Fragebögen zur Auswahl, welche sich durch die zu untersuchenden Eigenschaften unterscheiden:

Eigenschaft(en)	**Fragebogen-Bezeichnung**
Akzeptanz/Vertrauen, engl. Acceptance/Trust	- SHAPE Automation Trust Index (SATI) - 3D-SART - Systemakzeptanzskala, engl. System Acceptance Scale (van der Laan)
Treue-Bewertung, engl. Fidelity Evaluation	- Treue-Evaluation - Bewertung der Originaltreue eines Flugsimulators mit Hilfe einer Ratingskala
Handhabungseigenschaften, engl. Handling Qualities	- Agressivität (engl. Aggressiveness) - Cooper-Harper Rating - Pilot-Induced Oscillation (PIO) - Agressivität, engl. Aggressiveness

	- Einstellungsgeschwindigkeit, engl. Attitude Quickness
Situationsbewusstsein, engl. Situation Awareness	- Verschiedene Fragebögen auf Grundlage des Modells der dynamischen Entscheidungsfindung; Gesamtbewertungsverfahren, engl. Situation Awareness Global Assessment Technique (SAGAT) und Bewertungstechniken für Situationsbewusstsein, engl. Situation Awareness Rating Technique (SART)
Arbeitsbelastung, engl. Workload	- Task Load Index (NASA-TLX) - Bedford Workload Scale - Multiple Resource Questionnaire (MRQ) - Cooper-Harper Rating Scale - Instantaneous Self-Assesment (ISA) - Pilot-Induced Oscillation (PIO)
Benutzerfreundlichkeit	- AttrakDiff - meCUE - Systembenutzungsskala, engl. System Usability Scale (SUS)

Tabelle 10: Auszug von Fragebögen zur Bewertung verschiedener (System-)Eigenschaften aus Luftfahrtstudien

Für die Studie wurde der Fragebogen für Systemakzeptanz, engl. System Acceptance Scale (van der Laan), ausgewählt. In den vorliegenden Entwicklungsschritten der Cue Formen waren die Parameter „Nützlichkeit“ und „Zufriedenheit“ am wertvollsten für die Evaluation.

Darüber hinaus wurde von den Mitarbeitern des DLRs ein signifikanter Fragebogen für die Untersuchung der Qualität von Tactile Cueing entwickelt. Dieser Fragebogen umfasst insgesamt sechs Fragen, wovon fünf für die vorliegenden Untersuchungen genutzt wurden. Im Anhang ist der vollständige Fragebogen angefügt.

Als letztes war ein offener Fragebogenteil Bestandteil der Evaluation. Dieser eröffnete den Testpersonen (zusätzlich zu den Befragungen während der Studie) noch einmal die

Möglichkeit Anmerkungen und Kommentare zu erörtern. Der offene Fragebogenteil enthielt insgesamt drei Fragen und ist ebenfalls im Anhang einsehbar.

Alle drei Fragebogenteile (Fragebogen zur Tactile Cueing Quality, System Acceptance Scale und der offene Fragebogenteil) wurden für jede einzelne Konfiguration der drei Cueing Varianten an die Testperson ausgegeben. Insgesamt wurden durch jede Testperson alle drei Fragebögen somit neun Mal ausgefüllt.

5.3 DURCHFÜHRUNG

Die Studie wurde an vier Tagen mit jeweils einer Versuchsperson durchgeführt. Insgesamt nahmen 4 Probanden an den Untersuchungen teil. Die Altersspanne der Probanden lag zwischen 25 und 31 Jahre. Zwei der vier Probanden verfügten über Helikopter-Simulator-Flugerfahrung, wovon sich eine der Testpersonen zum Zeitpunkt der Untersuchungen in Ausbildung zur Hubschrauber-Pilotin befand. Dadurch verfügte diese Probandin neben der Simulator-Flugerfahrung auch über echte Flugerfahrung mit einem Helikopter. Ihre Flugerfahrung umfasste rund 30 Stunden in dem Helikopter-Typ Robinson R44. Zwei der Probanden verfügten über keine Flugerfahrung mit einem Helikopter.
Das Geschlechterverhältnis der Testpersonen betrug 3:1 für männliche Probanden.

Die Testpersonen erhielten alle vor Beginn der Studie eine Sicherheitseinweisung in den Simulator. Eine Einverständniserklärung für die Nutzung der Daten wurde an alle Probanden ausgegeben und unterschrieben.

Weitere Bestandteile der Evaluation waren ein biografischer Fragebogen, ein Fragebogen über die Qualität des Tactile Cueing sowie ein Fragebogen zur System Acceptance Scale (van der Laan) – dt. die Systemakzeptanz-Skala. Die Fragebögen, ausgenommen der biographische Fragbogen, wurden jeweils dreimal während der Studie von den Probanden ausgefüllt. Der Gesamtablauf umfasste 9 bis 11 Runden für das Testen von sogenannten Cueing-Varianten. Getestet wurden insgesamt drei Cueing-Varianten. Diese waren ein einfacher Softstop, ein kombinierter Softstop sowie ein Hardstop. Die Anforderungen und Ausprägungen der Cueing-Varianten wurden in drei bis vier Runden je Cueing-Variante

verändert. Das Ziel war es, die beste Konfiguration herauszufinden. Die gesamte Studie dauerte pro Testperson zwischen 60 und 90 Minuten.

Das Simulator-System hat leider die Aufzeichnungen eines der Probanden (TP 03) nicht durchgeführt. Dadurch konnten diese Messwerte nicht berücksichtigt werden. Die schriftlichen Kommentare flossen jedoch trotzdem mit in die Auswertung ein.

Die vorliegenden Ergebnisse sind nicht als repräsentativ einzustufen, sondern als Orientierung. Eine repräsentative Untersuchung sollte eine möglichst hohe Anzahl an Testpersonen umfassen. In statistischer Hinsicht sind 50 bis 100 Probanden als eine gute Zahl zu nennen. In der Praxis ist eine solch hohe Anzahl an Testpersonen mit (Simulator-)Flugerfahrung mit Helikoptern jedoch nahezu unmöglich zu erreichen.

5.3.1 Flugmanöver

Für die Piloten-Studien konnte aus Zeitgründen und technischen Schwierigkeiten kein Manöver eingespielt werden. Stattdessen wurde eine Secondary Task verwendet, welche verschiedene Aufgaben für die Pilotinnen und Piloten bereithielt. Die Secondary Task verfolgte wie ein Flugmanöver das Ziel, die Pilotin oder den Piloten abzulenken, damit diese/r sich nicht allzu sehr auf die eigentliche Aufgabe (das Suchen oder Halten des Cues) konzentriert/e. Das intuitive Nutzen der Steuerung durch die Pilotin oder den Piloten sollte im Fokus stehen.

Die Aufgaben der Secondary Task dienten auch zur Motivation der Testpersonen, die angezeigten Aufgaben präzise und schnell durchzuführen. Die Testperson mit dem höchsten Punktestand erhielt nach dem Abschluss der Studie einen Preis.

Die Gesamtlänge einer einzelnen Untersuchung umfasste 10 bis 70 Sekunden.

5.4 AUSWERTUNG

In den folgenden Kapiteln werden die Ergebnisse der Fragebögen sowie der Datenaufzeichnung im DLR-Simulator 2PASD dokumentiert.

5.4.1 Fragebögen

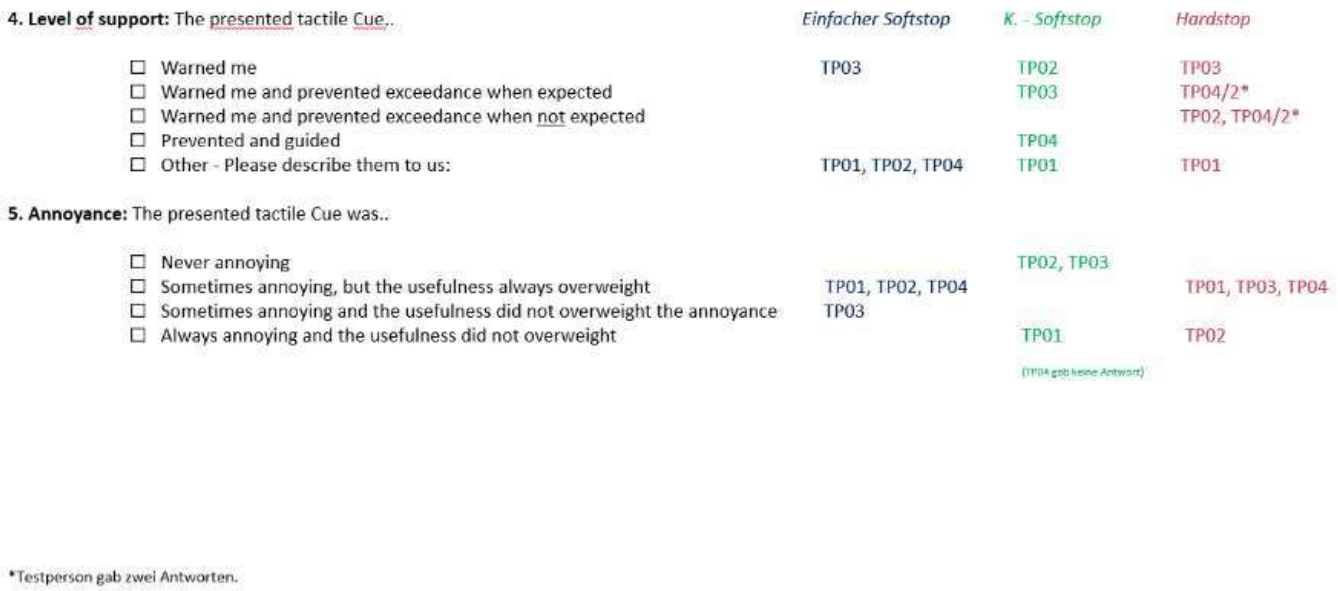
5.4.1.1

5.4.1.2 Fragebogen zur Tactile Cueing Qualität

	Einfacher Softstop	*K. - Softstop*	*Hardstop*
1. Cue Detectability: The presented tactile Cue was..			
☐ Not detectable/not detected during tasks			
☐ Generally detectable, but might be overlooked in high workload situations	TP01, TP03	TP01	TP01
☐ Detectable also in high workload situations	TP02, TP04	TP02, TP03, TP04	TP02, TP03, TP04
☐ Other - Please describe them to us:			
2. Cue Force Intensity: The presented tactile Cue was..			
☐ Not intense enough, could be accidentally exceeded		TP01	
☐ Good compromise: prevents accidental and allows intentional exceedance	TP01, TP02, TP04	TP02	TP01, TP03
☐ Too intense: does not allow intentional exceedance	TP03	TP03	TP02, TP04
☐ Other - Please describe them to us:		TP04	
3. Oscillation at Cue Contact: Oscillation was..			
☐ Not a factor	TP01, TP03	TP01, TP03, TP04/2*	TP01, TP02, TP03, TP04
☐ A factor, but tolerable	TP02, TP04	TP02	
☐ Not tolerable		TP04/2*	

*Testperson gab zwei Antworten.

Abbildung 16: Übersicht der Antworten der Testpersonen 01 bis 04 für den Fragebogen "Tactile Cueing Quality" - Fragen 1 bis 3



	Einfacher Softstop	K. - Softstop	Hardstop
4. Level of support: The presented tactile Cue..			
☐ Warned me	TP03	TP02	TP03
☐ Warned me and prevented exceedance when expected		TP03	TP04/2*
☐ Warned me and prevented exceedance when not expected			TP02, TP04/2*
☐ Prevented and guided		TP04	
☐ Other - Please describe them to us:	TP01, TP02, TP04	TP01	TP01
5. Annoyance: The presented tactile Cue was..			
☐ Never annoying		TP02, TP03	
☐ Sometimes annoying, but the usefulness always overweight	TP01, TP02, TP04		TP01, TP03, TP04
☐ Sometimes annoying and the usefulness did not overweight the annoyance	TP03		
☐ Always annoying and the usefulness did not overweight		TP01	TP02
		(TP04 gab keine Antwort)	

*Testperson gab zwei Antworten.

Abbildung 17: Übersicht der Antworten der Testpersonen 01 bis 04 für den Fragebogen "Tactile Cueing Quality" - Fragen 4 und 5

5.4.1.3 System Acceptance Scale (van der Laan)

Die Anzahl der Probanden und die Ergebnisse der System Acceptance Scale (SCS) können als Orientierung, nicht aber als repräsentative Werte und Ergebnisse eingestuft werden. Für eine repräsentativere Studie müssten mehr Testpersonen untersucht werden.

Im Folgenden wird die Berechnung der System Acceptance Scale (van der Laan) für die Testperson 01 für jede Cueing-Variante vorgestellt. Abschließend sind die Ergebnisse aller vier Testpersonen in Tabellenform dargestellt.

Einfacher Softstop (Einf. Softstop)

Das Kriterium „Nützlichkeit" besteht aus den Fragen 1,3,5, 7 und 9.

TP 01:

Frage 1: 1

Frage 3: 2

Frage 5: 1

Frage 7: 1

Frage 9: 2

Punktsummer aller Fragen: 7

Berechnung: (Summe der Antworten) / (Anzahl der Fragen) = 7/5 = **1,40** (von möglich 2,00 Punkten)

TP 02: 1 + 1 + 0 + 0 + 0 = 2 → 2/5 = **0,40**

TP 03: 2 + 2 + 1 + 1 + 2 = 8 → 8/5 = **1,60**

TP 04: 2 + 2 + 1 + 1 + 1 = 7 → 7/5 = **1,40**

Das Kriterium „Zufriedenheit" besteht aus den Fragen 2, 4, 6 und 8.

TP 01:

Frage 2: 1

Frage 4: 1

Frage 6: 0

Frage 8: 2

Punktsummer aller Fragen: 4

Berechnung: (Summe der Antworten) / (Anzahl der Fragen) = 4/4 = **1,00** (von möglich 2,00 Punkten)

TP 02: 0 + 1 + 1 + 1 = 3 → 3/5 = **0,60**

TP 03: 2 + 1 + 0 + 2 = 5 → 5/5 = **1,00**

TP 04: 1 + 0 + 0 + 1 = 2 → 2/5 = **0,40**

Einf. Softstop	**TP 01**	**TP 02**	**TP 03**	**TP 04**	**Ø**
Nützlichkeit	1,40	0,40	1,60	1,40	**1,20**
Zufriedenheit	1,00	0,60	1,00	0,40	**0,75**

Tabelle 11: Ergebnisse der System Acceptance Scale aller Testpersonen für den einfachen Softstop

Kombinierter Softstop

Nützlichkeit (1, 3, 5, 7 und 9)

TP 01: 2 + 0 + 0 + 1 + 0 = 3 → 3/5 = **0,60**

TP 02: 1 + 1 + 2 + 1 + 1 = 6 → 6/5 = **1,20**

TP 03: 2 + 2 + 2 + 2 + 2 = 10 → 10/5 = **2,00**

TP 04: 2 + 2 + 1 + 1 + 1 = 7 → 7/5 = **1,40**

Zufriedenheit (2, 4, 6 und 8)

TP 01: 1 + 1 + 1 + 1 = 4 → 4/4 = **1,00**

TP 02: 0 + 1 + 2 + 0 = 3 → 3/4 = **0,75**

TP 03: 2 + 2 + 1 +1 = 6 → 6/4 = **1,50**

TP 04: 1 + 0 + 0 + 1 = 2 → 2/4 = **0,50**

Kombinierter Softstop	**TP 01**	**TP 02**	**TP 03**	**TP 04**	**Ø**
Nützlichkeit	0,60	1,20	2,00	1,40	**1,30**
Zufriedenheit	1,00	0,75	1,50	0,50	**0,94**

Tabelle 12: Ergebnisse der System Acceptance Scale aller Testpersonen für den kombinierten Softstop

Hardstop

Nützlichkeit (1, 3, 5, 7 und 9)

TP 01: 0 + 0 + 1 + 0 + 1 = 2 → 2/5 = **0,40**

TP 02: -1 + -1 + 2 + 0 + 2 = 2 → 2/5 = **0,40**

TP 03: 2 + 2 + 2 + 2 + 2 = 10 → 10/5 = **2,00**

TP 04: 1 + 1 + 2 + 1 + 1 = 6 → 6/5 = **1,20**

Zufriedenheit (2, 4, 6 und 8)

TP 01: -1 + -1 + 0 + -1 = -3 → -3/4 = **-0,75**

TP 02: -1 + -2 + -1 + -1 = -5 → -5/4 = **-1,25**

TP 03: 2 + 2 + 0 + 1 = 5 → 5/4 = **1,25**

TP 04: 1 + 1 + -1 + 0 = 1 → ¼ = **0,25**

Hardstop	**TP 01**	**TP 02**	**TP 03**	**TP 04**	**Ø**
Nützlichkeit	0,40	0,40	2,00	1,20	**1,00**
Zufriedenheit	-0,75	-1,25	1,25	0,25	**-0,25**

Tabelle 13: Ergebnisse der System Acceptance Scale aller Testpersonen für den Hardstop

Im Folgenden sind die SCS-Ergebnisse mit den Antworten der Testpersonen für die drei Cueing-Varianten dargestellt.

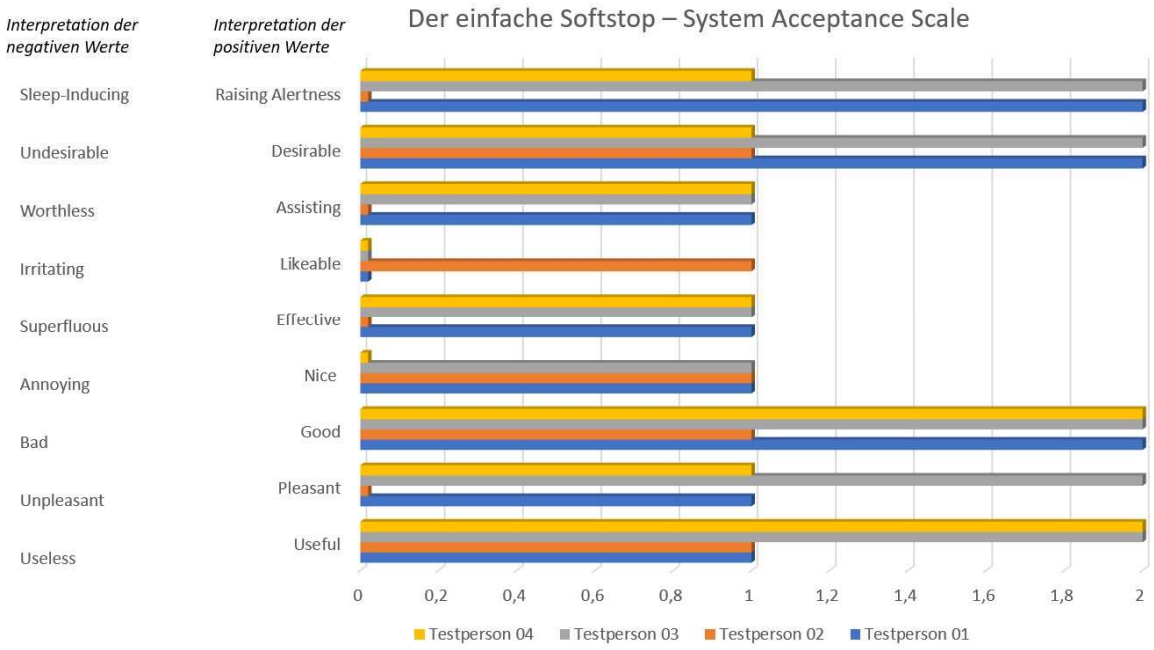


Tabelle 14: Ergebnisse der System Acceptance Scale für die Cueing-Variante Einfacher Softstop

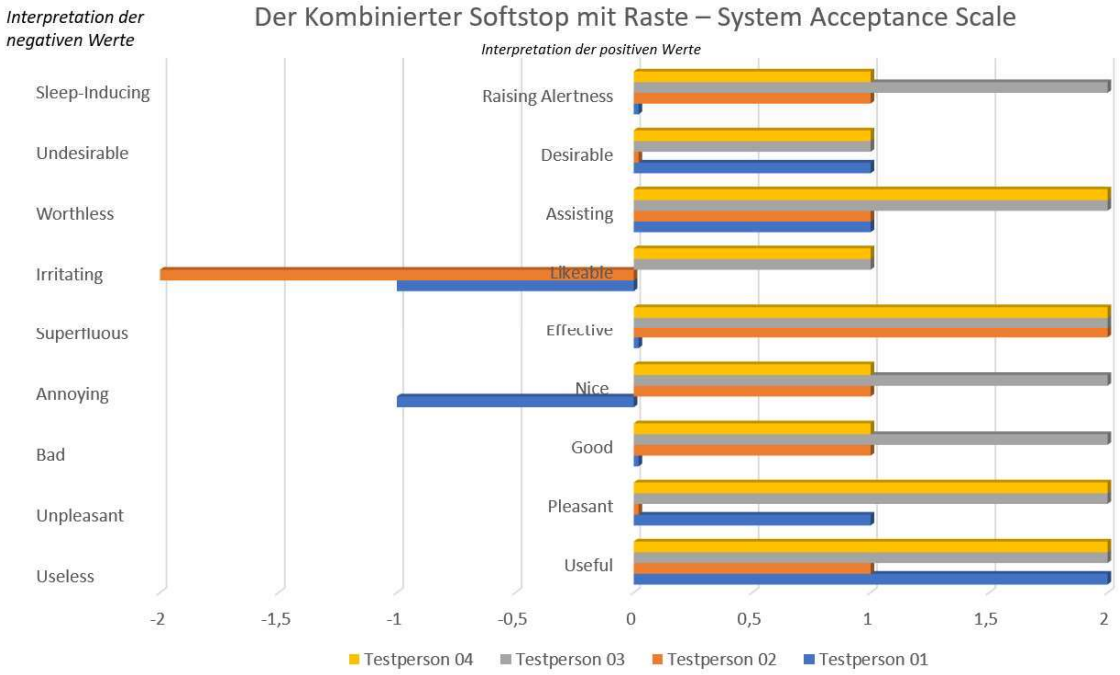


Tabelle 15: Ergebnisse der System Acceptance Scale für die Cueing-Variante Kombinierter Softstop

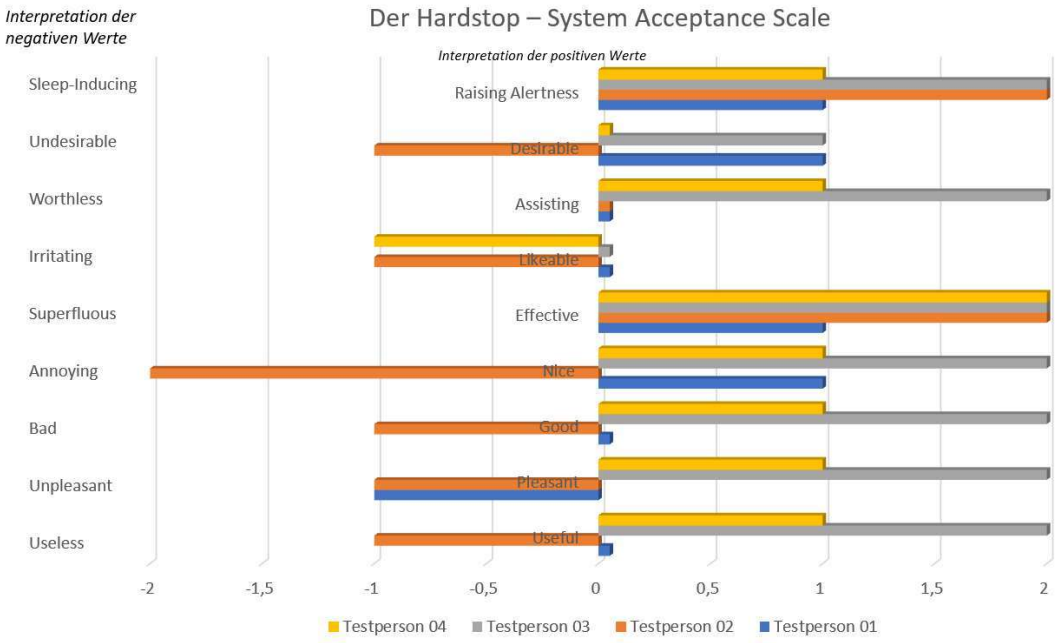


Tabelle 16: Ergebnisse der System Acceptance Scale für die Cueing-Variante Kombinierter Softstop

5.4.1.4 Offener Fragebogen

Die Ergebnisse des offenen Fragebogens liegen von insgesamt vier Testpersonen vor. Im Folgenden werden die Angaben zu den Fragen der Testpersonen für jede Cueing-Variante vorgestellt.

Frage 1: *Beschreiben Sie, was Sie während der Untersuchungen bemerkt haben oder was Ihnen besonders aufgefallen ist.*

<u>Rückmeldungen für den einfachen Softstop</u>

Die Testperson 01 gab an, dass sie die Führung des Collective bis zum Softstop als „leicht" wahrnahm. Der Kraftaufwand ist mit der Abfolge der Konfigurationen des einfachen Softstop gefühlt gestiegen.

Die TP 03 antwortete, dass die Ausführung der Secondary Task-Aufgaben vor der gestellten Halteaufgabe des Cues irritierend war.

TP 04 beschrieb, dass sich zu Beginn des Softstop eine leichte Vibration einstellte. Später war der Softstop besser zu halten. Vor dem Erreichen des Softstop verblieb der Stick an jeder Position in Ruhe. Danach wurde er zum Anfangspunkt zurückgedrückt.

Rückmeldungen für den kombinierten Softstop

Die TP 01 nahm Oszillationen beim Zurückführen des Cues zum Ausgangspunkt wahr, nachdem diese den kombinierten Softstop überzogen hatte.

Die TP 02 berichtete, dass er bei der 2. Konfiguration teilweise das Gefühl hatte den mechanischen Anschlag erreicht zu haben, diesen aber später übersteuern können.

TP 03 schrieb, dass die Kraft genau kalibriert war, um den Einsatz des Cues zu verstehen.

TP 04 empfand den Start des Softstop mit dem Verlauf der Versuche als schwächer. Weiterhin war ein Übersteuern möglich, aber mit sehr viel Aufwand verbunden.

Rückmeldungen für den Hardstop

TP 02 brachte eine deutlich höhere Kraft als die anderen Testpersonen auf den Stick auf.

TP 03 gab an, dass ein Überschreiten des Hardstop nicht möglich war.

Frage 2: *Welcher der Cues hat Ihnen am besten gefallen?*

Rückmeldungen für den einfachen Softstop

TP 01 antwortete „der Softstop". Da sich alle Konfigurationen in dieser Untersuchungsrunde auf den Softstop bezogen, wurde keine spezifische Konfiguration angegeben.

TP 02 empfand die dritte Konfiguration als am besten.

TP 03 berichtete, dass das Ausführen der Secondary Task vor dem Halten des Cues schwierig war. Die TP gab an, dass der einfache Softstop am einfachsten zu kontrollieren und zu übersteuern war. Es tauchten bei diesem Cue keine Oszillationen auf.

TP 04 gefiel die 2. Konfiguration am besten.

Rückmeldungen für den kombinierten Softstop

TP 01 antwortete „der Softstop".

TP 04 gab die 1. Konfiguration als die Beste an.

Rückmeldungen für den Hardstop

TP 01 gab an, dass sie den Softstop als am besten empfunden hat.

Frage 3: *Haben Sie noch Anmerkungen?*

Rückmeldungen für den einfachen Softstop

TP 01 schrieb, dass sie sich ein typisches Flugmanöver gewünscht hätte. Darüber hinaus wäre eine Verbindung der Manöver-Parameter mit der FLI-Anzeige im Simulator-Cockpit zur Überwachung der Leistungsgrenzen nützlich.

TP 02 empfand die 3. Konfiguration als teilweise „zu schwach".

TP 04 würde eine generell leichtere Federkraft angenehmer und realistischer finden.

Rückmeldungen für den kombinierten Softstop

TP 01 bewertet die Raste als sinnvoll, vor allem im stabilem Steig- und Schwebeflug. Die Raste wurde als besonders sinnvoll eingeschätzt, wenn die Pilotin oder der Pilot in dieser

verbleiben könnte um im Folgenden im Steigflug bleiben zu können. Das Einhaken der Raste war jedoch in den Versuchen besonders schwer. Die Raste warnte zwar vor einer drohenden Überschreitung, benötigte aber zusätzliche Arbeitslast (Workload) um in dieser zu verbleiben. Wenn diese eingerastet war, bewertete die Testperson sie als weniger Arbeitslast (Workload) und damit als Erleichtung.

TP03 schrieb, dass das Überziehen des kombinierten Softstops sehr viel Aufwand bedeutete.

Rückmeldungen für den Hardstop

TP 01 antwortete, dass kein Überziehen möglich war und damit keine Feinjustieren denkbar.

5.4.2 Die 2PASD-Datenaufzeichnungen

Im Folgenden sind die Ergebnisse der drei Cueing-Variaten mit den definierten Konfigurationen in Diagrammform dargestellt.

Legende zu den Konfigurationen der Cueing-Varianten

Einfacher Softstop

1. Konfiguration: Die Steifigkeit des Softstops beträgt 8 N/%; die Reibung 2 N

2. Konfiguration: Die Steifigkeit des Softstops beträgt 12 N/%; die Reibung 2 N

3. Konfiguration: Die Steifigkeit des Softstops beträgt 12 N/%; Erhöhung der Reibung auf 6 N

Kombinierter Softstop

1. Konfiguration: Kombination I von zwei Softstops mit einer Raste mittig mit verschiedenen Steifigkeiten; Reibung 2 N

2. Konfiguration: Kombination II von zwei Softstops mit einer Raste mittig mit verschiedenen Steifigkeiten; Reibung 2 N

3. Konfiguration: Die 2. Konfiguration wurde wiederholt.

4. Konfiguration: Die 2. Konfiguration wurde mit einer erhöhten Reibung von 6 N eingespielt.

Hardstop

1. Konfiguration: Eine konstante Ausprägung des Hardstops; Reibung von 2 N

2. Konfiguration: Eine konstante Ausprägung des Hardstops; Erhöhung der Reibung auf 5 N

3. Konfiguration: Eine konstante Ausprägung des Hardstops; erneute Erhöhung der Reibung auf 8 N

Die aufgezeichneten 2PSD-Daten wurden in MATLAB eingelesen und mit Hilfe der Funktionseingabe für die Standardabweichung und Mittelwertbildung in Plots dargestellt. Im nächsten Schritt wurden die Werte für die Standardabweichung und die der Mittelwerte im Plot exakt eingestellt, gesucht und abgelesen. Die Werte wurden in einer Excel-Tabelle zusammengefasst und dann zusammengefasst erneut in Plots bzw. Diagrammen dargestellt.

In den folgenden Diagrammen werden entsprechend alle Cueing-Varianten mit ihren Mittelwerten und Standardabweichungen dargestellt. Das Ziel ist die Ermittlung der Konfiguration mit dem kleinsten Wert in der Standardabweichung.

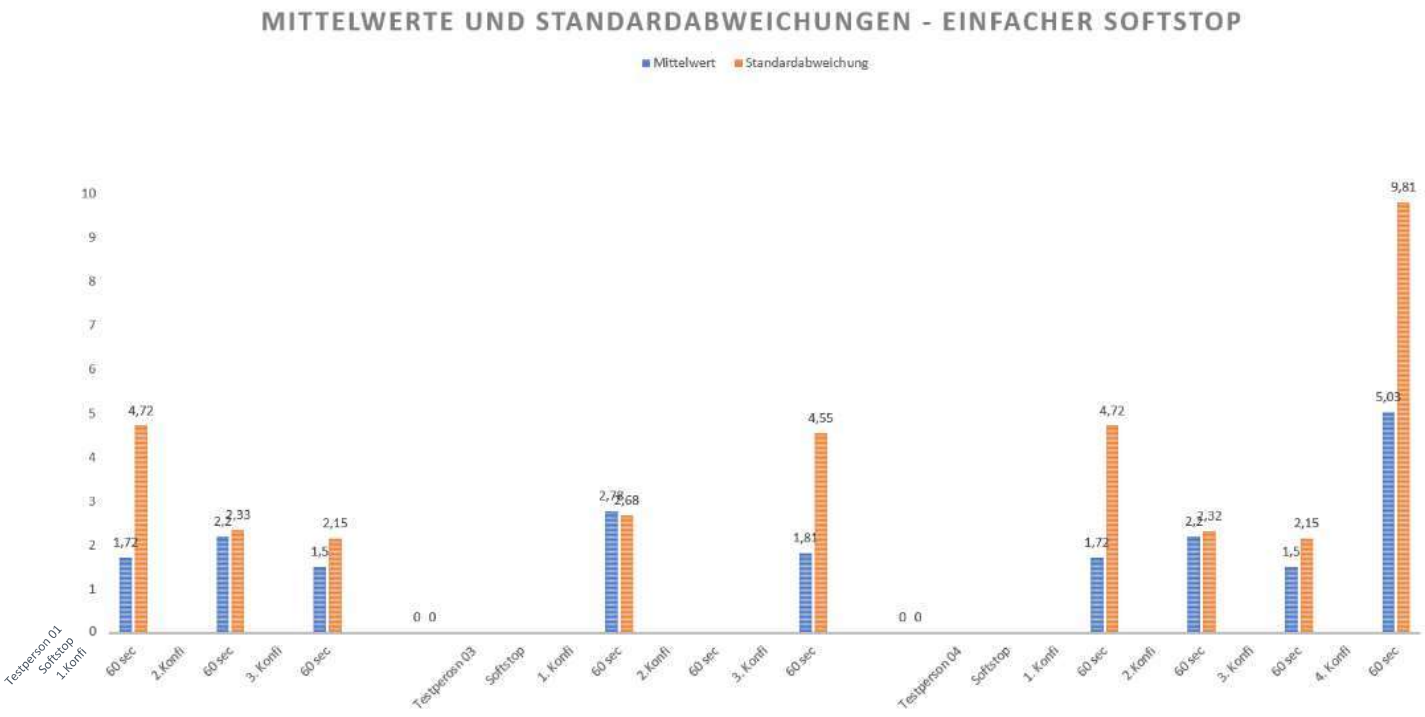


Abbildung 18: Gegenüberstellung der Mittelwerte und Standardabweichungen aus den 2PASD-Untersuchungen in der Cueing-Variante „Einfacher Softstop“

Die Auswertung der Werte der Standardabweichung für den einfachen Softstop ergibt, dass die TP 01 die dritte Konfiguration, TP 03 die erste Konfiguration und die TP 04 ebenfalls die dritte am besten ausgeführt haben. Schlussfolgernd ist die präziste Konfiguration des Softstops die dritte Konfiguration mit einem Wert von 2,15 (Standardabweichung).

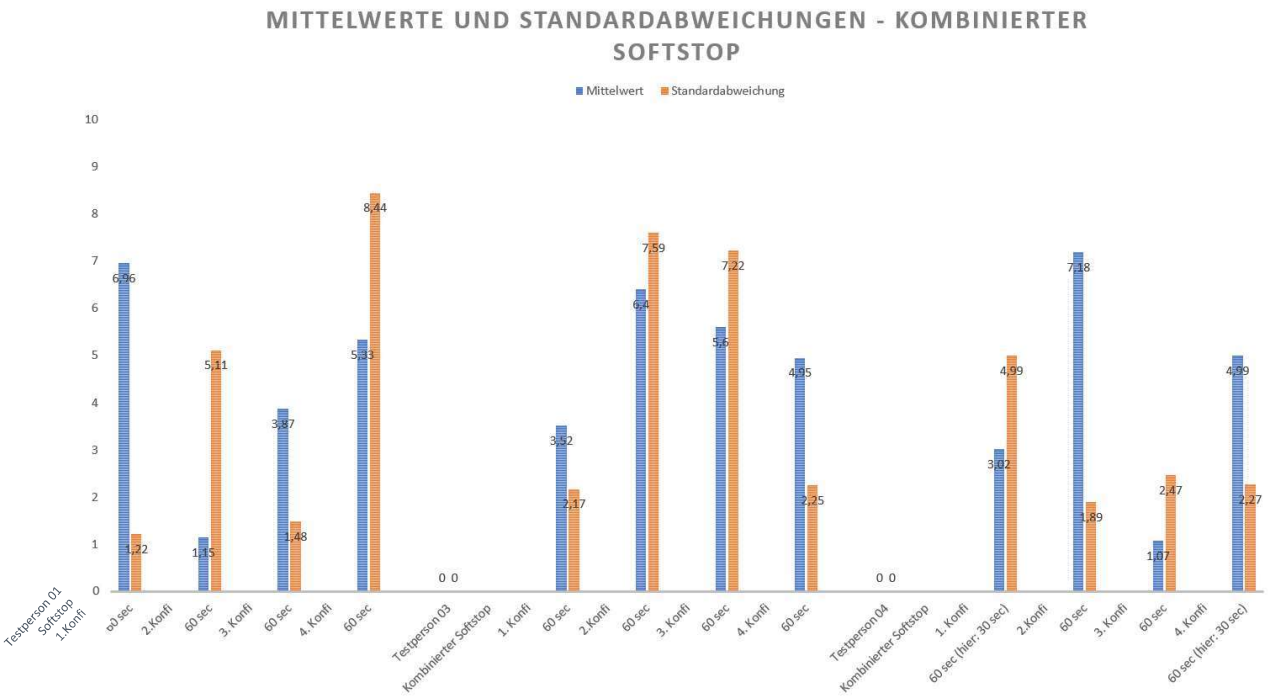


Abbildung 19: Gegenüberstellung der Mittelwerte und Standardabweichungen aus den 2PASD-Untersuchungen in der Cueing-Variante „Kombinierter Softstop“

Aus dem Vergleich der Standardabweichungen des kombinierten Softstop (siehe Abbildung 20) geht hervor, dass die erste Konfiguration mit einem Wert von 1,22 (Testperson 01), als zweites die erste Konfiguration mit einem Wert von 2,17 (TP 03) und zuletzt die zweite Konfiguration mit einem Wert von 1,89 (TP 04) am besten eingestellt war. Damit ist die erste Konfiguration als am präzisisten zu bewerten.

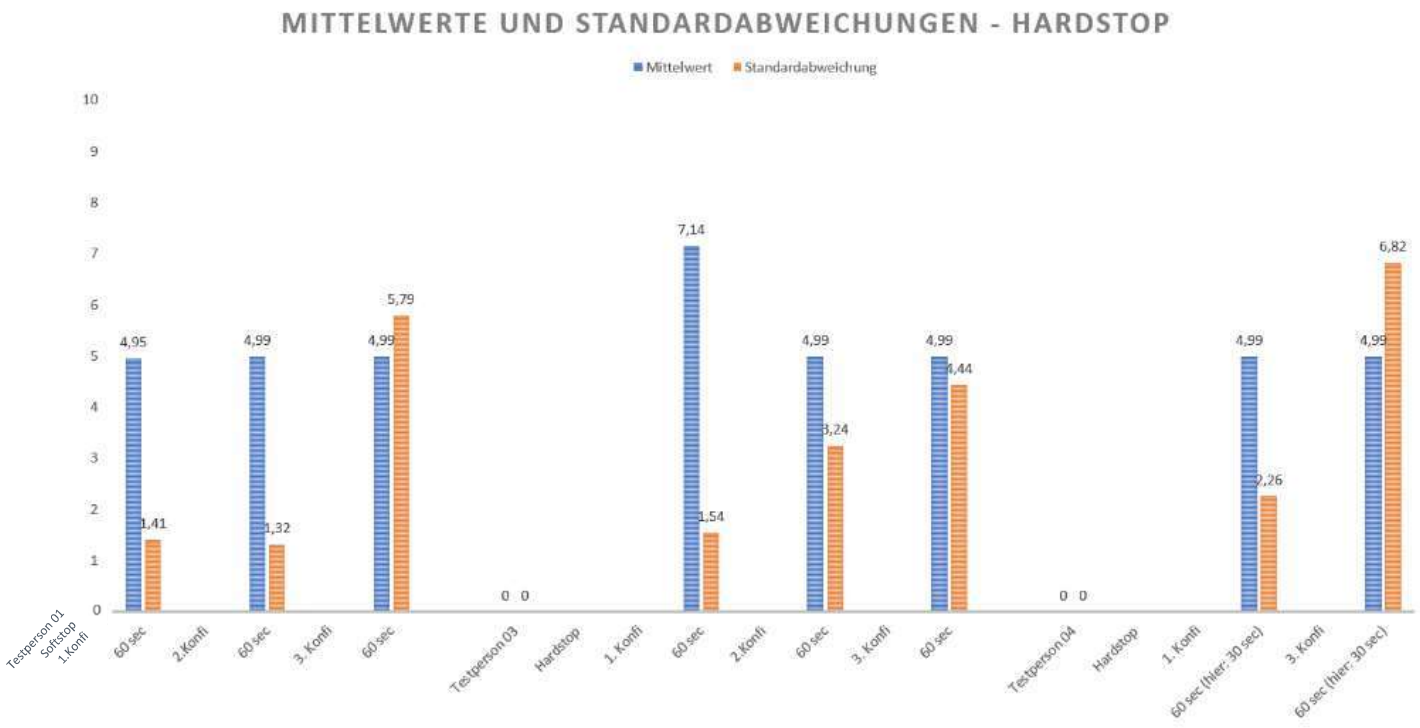


Abbildung 20: Gegenüberstellung der Mittelwerte und Standardabweichungen aus den 2PASD-Untersuchungen in der Cueing-Variante „Hardstop“

Die Abbildung 21 zeigt die Ergebnisse des Hardstop. Diese Cueing-Form weist die geringsten Abweichungen in der zweiten Konfiguration mit einer Standardabweichung von 1,32, in der ersten Konfiguration mit einem Wert von 1,54 und wiederholt in der ersten Konfiguration mit dem Wert 2,26 auf. Somit ist die erste Konfiguration als am präzisesten einzustufen.

6 ERGEBNISDISKUSSION

Die Probandin TP 01 war zum Zeitpunkt der Untersuchung in Ausbildung zur Helikopter-Pilotin. Ihre absolvierten Flugstunden umfassten 30 Stück und wurden auf dem Hubschrauber-Typ Robinson 44 durchgeführt. Ihr Feedback ist besonders zu berücksichtigen, da sie die einzige Probandin mit Flugerfahrung war. Sie gab die folgenden Hinweise während der Studie.

- Studien zu tactile Cue-Untersuchungen sollten mit weniger nicht mit einem Flugmanöver verwandten Aufgaben durchgeführt werden, um den Helikopter praxisnah stabil fliegen zu können. Für einen stabilen Flug müssen Collective (linke Hand) und Cyclic (rechte Hand) parallel gesteuert werden. Da die Ausführung der Secondary Task-Aufgaben mit der rechten Hand durchgeführt wurde, mit welcher der Cyclic bedient wird, war ein stabiles Fliegen oder Halten des Hubschrauber für sie fast unmöglich.
- Für die Studie sollte ein geeignetes Flugmanöver gewählt werden und vorher mit der Pilotin/dem Piloten besprochen werden. Die Pilotin/der Pilot sollte das gewählte Manöver bestenfalls bereits kennen, andernfalls könnten sie/er zu abgelenkt sein um das System wie gewünscht zu testen.
- Vor der eigentlichen Aufgabe sollte der Testperson eine Zeit von 3-4 Sekunden gegeben werden um den Helikopter stabilisieren zu können und sich mit der Umgebung vertraut machen zu können. Im Anschluss kann die Aufgabe wie geplant gestellt werden.
- Die Probandin berichtete, dass sich ein Gewöhnungeffekt nach der 1. Konfiguration im Bezug auf die Haltedauer der 60 Sekunden mit dem Sidestick eingestellt hat. Dieser Gewöhnungseffekt sollte vermieden werden.

Weiterhin sollten verschiedene Kraftstufen für denselben Einsatz getestet werden. Dies könnten in Abhängigkeit des Körpergewichts der Testperson oder auf Grundlage anderer anthropometrischen Eigenschaften erfolgen. Die Untersuchungen bestätigten die Vermutung, dass die Kraft-Sensibilität zwischen den Testpersonen sehr unterschiedlich ausfällt. Bei den Untersuchungen hatte nur eine Testperson die Raste in der ersten Konfiguration gespürt und genutzt. Es war ersichtlich, dass neben eines aufgetretenen Systemfehlers der Simulator-

Software (was Teils zu einem unnatürlichen Überschießen der Raste führte), die Raste von stärkeren Personen nicht (sofort) wahrgenommen wurde. Meistens wurde die Raste erst beim Zurückführen des Sticks erkannt oder erahnt, und dann basierend auf diesem Wissen in der nächsten (oder übernächsten) Konfiguration bewusst angesteuert.

Nachfolgend werden beobachtete geschlechterspezifische Unterschiede der Studie aufgezeigt.
Zu berücksichtigen ist, dass im Allgemeinen die Wahrnehmung von Frauen eine andere ist als die Wahrnehmung von Männern. Dabei ist die eine Wahrnehmung nicht besser oder schlechter als die andere zu bewerten. Die weibliche Wahrnehmung ist in gewisser Hinsicht als detailgetreuer und sensibler zu beschreiben, die männliche Wahrnehmung als deutlich widerstandsfähiger und unempfindlicher zu bennen.
Im einem nächsten Schritt der Systementwicklung sollte deswegen über zusätzliche Wahrnehmungsebenen von Geschlechtern nachgedacht werden. Dabei sind darüberhinaus beispielsweise Menschen, die ihr Geschlecht als weder weiblich noch männlich oder als eine Mischung aus beiden Geschlechtern definieren, zu nennen. Menschen könnten gegebenfalls beide - eine weibliche und eine männliche Wahrnehmung - haben oder möglicherweise eine Wahrnehmung(smischung), welche weder einer hetereosexuellen Frau noch Mann bekannt ist.
Als nächstes ist zu bemerken, dass bestimmte hetereosexuelle Frauen und Männer sich selbst als weniger weiblicher bzw. weniger männlich als der Durchschnitt wahrnehmen und mehr Merkmale des jeweils anderen Geschlechts in sich tragen können. Dabei sind beispielsweise viele Frauen in Ingenieursberufen, anderen technische Berufen oder dem militärischen Dienst zu nennen, welche sich als mehr neutral wahrnehmen als klassischerweise weiblich.
Um diese Erkenntnisse zu berücksichtigen, sollte ein haptisches Steuersystem auf die genannten Unterschiede eingehen und gegebenfalls verschiedene Steuersysteme oder Arten von haptischen Hinweisen bereitstellen. Dieses Vorgehen würde einer innovativen und zukunftsweisenden Bedienung entsprechen und könnte vielleicht nebenbei mit einer guten Vermaktungsstragie das Geschlechterungleichgewicht in den Berufsfeldern verringern.

Die Auswertungen der Studie sind als eine gute Orientierung, aber nicht als repräsentativ einzustufen.

Unter den Covid-19-Pandemie-Bedingungen benötigten die Vorbereitungen und Ausführungen der Studie deutlich mehr Zeit als erwartet. Als Untersuchungsgegenstand wurde eine Cueing-Variante mit einer Raste mittig eines Softstop entwickelt und diese mit einem Softstop und einem Hardstop verglichen.
Für weiterführende Untersuchungen sollte neben einer Berücksichtigung der Rückmeldungen der Versuchspersonen, auch eine höhere Anzahl an Testpersonen getestet werden – optimalerweise mit Helikopter-Flugerfahrung. Flugerfahrungen der Testpersonen mit der Verwendung eines aktiven Steuerorgans und von tactile Cueing wären optimal.

7 ZUSAMMENFASSUNG UND FAZIT

LITERATURVERZEICHNIS

Abildgaard, Max. 2013. Tactile cueing for Vortex Ring State avoidance. Braunschweig : s.n., 2013.

Aerospace Technology. 2021. *Bell Agusta BA609.* 2021.

AIRBUS. 2021. www.airbus.com. *Commercial Aircraft History -> Fly-by-wire (1980-1987).* [Online] 2021. [Zitat vom: 04.. August 2021.] https://www.airbus.com/company/history/aircraft-history/1980-1987.html.

Aniansson, A., et al. 1982. Muscle function in 75-year-old men and women. A longitudinal study. *Scandinavian journal of rehabilitation medicine.* 1982.

Arterburn, David R. 2008. *UH-60M Upgrade Fly-By-Wire Flight Control Risk Reduction using the RASCAL JUH-60A In-Flight Simulator.* Montreal, Canada : American Helicopter Society 64th Annual Forum, 2008.

Askew, L. J., et al. 1987. Isometric Elbow Strength in Normal Individuals. *Clinical Orthopedics and Related Research.* 1987.

BAE Systems. 2021. [Online] 2021. [Zitat vom: 19. 05 2021.] https://www.baesystems.com/en-us/definition/what-are-active-control-sidesticks.

Bishop, P., Cureton, K. und Collins, M. 1987. Sex difference in muscular strength in equally-trained men and women. *Ergonomics.* 1987.

Chaffin, D. B., Andersson, G. B. J. und Martin, B. J. . 2006. Occupational Biomechanics. Hoboken, New Yersey : John Wiley & Sons, Inc., 2006.

Collins Aerospace. 2021. [Online] 2021. [Zitat vom: 19. 05 2021.] https://www.collinsaerospace.com/what-we-do/Helicopters/Rotary-Wing/Flight-Control-Systems-for-Helicopters.

—. 2019. Active Sidesticks - a first for commercial aviation. [Online] Collins Aerospace, 22. 05 2019. [Zitat vom: 26. 05 2021.] https://www.youtube.com/watch?v=wqdJZVshgVc.

—. 2019. How Collins Active Control Sidesticks Work - AIN. [Online] Aviation International News, 2019. [Zitat vom: 25. 05 2021.] https://www.youtube.com/watch?v=3sXXx8rgeeE.

Dankert, J. und Dankert, H. 2013. Technische Mechanik. Statik, Festigkeitslehre, Kinematik/Kinetik (7. Auflage). Wiesbaden : Springer Vieweg, 2013.

defenseworld.net. 2019. China's Z-20 Helicopter Features Home-made Engine, Fly-by-wire. [Online] 10. 10 2019. [Zitat vom: 19. 08 2021.] https://www.defenseworld.net/news/25639/China_s_Z_20_Helicopter_Features_Home_made_Engine__Fly_by_wire#.YZ1lRU6ZNaS.

DIN 33411-1. 1982. Körperkräfte des Menschen. Begriffe, Zusammenhänge, Bestimmungsgrößen. [Buchverf.] DIN Deutsches Institut für Normung e.V. Berlin : Beuth Verlag, 1982.

Dögow, Roger. 2015. *Explorative Simulatorstudie zur Ermittlung geeigneter haptischer Kräfte an aktiven Steuern für ausgewählte Hubschrauber-Assistenzsysteme.* Lübeck : Fachhochschule Lübeck, 2015.

dos Santos Sampaio, Rodolfo. 2018. *Influence of Variable Inceptor Coupling on Dual Pilot Helicopters using Active Sidesticks.* Braunschweig : Dissertation an der Technischen Universität Carolo-Wilhelmina zu Braunschweig, 2018.

DUDEN, mehr als ein Wörterbuch. 2021. https://www.duden.de/rechtschreibung/Hinweis. [Online] 2021. [Zitat vom: 30. Juli 2021.]

Dullo, C. M. U., Müllhäuser, M. R. und dos Santos Sampaio, R. 2019. *The Dual Pilot Active Sidestick Demonstrator (2PASD) for Development and Evaluation of Tactile Cueing Functions in a Multicrew Cockpit.* Braunschweig : DLR e.V., 2019.

European Union Aviation Safety Agency. 2021. *Certification Specifications, Acceptable Means of Compliance and Guidance Material for Large Rotorcraft CS-29 Amendment 9.* 2021-08-27 : EASA, 2021.

—. 2021. *Certification Specifications, Acceptable Means of Compliance and Guidance Material for Small Rotorcraft CS-27 Amendment 8.* 2021-06-14 : EASA, 2021.

Fahrmeier, Ludwig, et al. 2016. *Statistik - Der Weg zur Datenanalyse.* s.l. : Springer-Verlag, 2016.

Hamel, Peter G. 2017. *In-Flight Simulators and Fly-by-Wire/Light Demonstrators - A Historical Account of International Aeronautical Research.* s.l. : Springer, 2017.

Hosman, Ruud, Benard, Bart und Fourquet, Hélène . 1990. *Active and Passive Side-Stick Controllers in Manual Aircraft Control.* Delft,Toulouse : s.n., 1990.

Hughes, R. E., et al. 1999. Age-related changes in normal isometric shoulder strength. *The American journal of sports medicine.* 1999.

Human Solutions GmbH. 2021. [Online] 2021. [Zitat vom: 11. 08 2021.] https://www.human-solutions.com/de/produkte/ramsis-allgemein/index.html.

Irwin, Joseph G., et al. 2007. *ADS-33E Predicted and Assigned Low-speed Handling Qualities of the CH-47F with Digital AFCS.* USA : American Helicopter Society International Annual Forum , 2007.

iSize. 2021. [Online] Avalution GmbH, 2021. [Zitat vom: 18. 06 2021.] https://portal.i-size.net/SizeWeb/pages/home.seam.

Kaiser, André. 2018. Modellierung maximaler menschlicher Muskelmomente auf Basis digitaler Menschmodelle - am Beispiel der oberen Extremitäten. Chemnitz : Universitätsverlag Chemnitz, 2018.

Kanbayashi, H., et al. 1999. *Helicopter Side Stick Controller.* Kakamigahara, Gifu-Pref., Japan : Advanced Technology Institute of Commuter Helicopter (ATIC), 1999.

Klußmann, Niels und Malik, Arnim. 2004. *Lexikon der Luftfahrt.* Berlin, Heidelberg, New York : Springer-Verlag, 2004.

Korrespondenz mit Betreuer (Mario Müllhäuser). 2021. Braunschweig : Deutsches Zentrum für Luft- und Raumfahrt e.V., 2021.

Kroemer, K. H. E. 1977. Die Messung der Muskelstärke des Menschen. Methoden und Techniken. In Bundesanstalt für Arbeitsschutz und Unfallforschung. Forschungsbericht (Nr. 161). Dortmund : Wirtschaftsverlag NW GmbH, 1977.

Kumar, S. 1991. Arm lift strength in work space. *Applied Ergonomics.* 1991.

Künstler, Rita, et al. 2016. *Statistik - Der Weg zur Datenanalyse.* Berlin Heidelberg : Springer Spektrum, 2016. DOI 10.1007/978-3-662-50372-0.

Lange, Tatjana und Mosler, Karl. 2017. *Statistik kompakt - Basiswissen für Ökonomen und Ingenieure.* Berlin Heidelberg : Springer Gabler, 2017.

Leishman, J. Gordon. 2000. *Principles of Helicopter Aerodynamics.* Cambridge : Cambridge University Press, 2000.

Liebherr. 2021. [Online] 2021. [Zitat vom: 14. Juli 2021.] https://www.liebherr.com/en/gbr/products/aerospace-and-transportation-systems/aerospace/products-and-solutions/flight-control-and-actuation-systems/flight-control-and-actuation-systems.html#!/lightbox.

microhelis.de. [Online] [Zitat vom: 23. 08 2021.] https://shop.microhelis.de/Collective-Stick-EC-135-145_1.

Mital, A. und Ayoub, M. M. 1980. Modeling of isometric strength and lifting capacity. *Human Factors: The Journal of the Human Factors and Ergonomics Society.* 1980.

Mital, A. und Kumar, S. 1998. Human muscle strength definitions, measurement and usage: Part II - The scientific basis (knowledge base) for the guide. . *International Journal of Industrial Ergonomics.* 1998.

Müllhäuser, Mario. 2014. *FHS Sidestick FCMC Manual.* Braunschweig : unveröffentlichter Bericht, DLR e.V. Braunschweig, 2014.

—. 2016. *LuFo IV SiRaSKoF-H DLR Schlussbericht.* Braunschweig : DLR e.V., 2016. DLR-IB-FT-BS-2016-135.

Müllhäuser, Mario und Lusardi, Jeff. 2020. US-German Joint In-flight and Simulator Evaluation of Collective Tactile Cueing for Torque Limit Avoidance - Shaker vs. Soft Stop. [Buchverf.] Vertical Flight Society's 76th Annual Forum & Technology Display. Virginia : s.n., 2020.

Neumann, D. A., Soderberg, G. L. und Cook, T. M. 1988. Comparison of maximal isometric hip abductor muscle torques between hip sides. *Physical Therapy.* 1988.

Otis, J. C.., et al. 1990. Torque production in the shoulder of the normal young adult male. The interaction of function, dominance, joint angle, and angular velocity. *The American journal of sports medicine.* 1990.

Postlethwaite, Ian. 1999. *Robust control and its application to a bell 205 fly-by-wire helicopter.* University of Leicester : The Institution of Electrical Engineers, 1999.

Richard, Hans Albert und Kullmer, Gunter. 2013. Biomechanik - Definitionen, Aufgaben und Fragestellungen. s.l. : Springer Verlag, 2013.

Rohmert, W. 1983. Formen menschlicher Arbeit. [Buchverf.] W. Rohmert und J. Rutenfranz. *Praktische Arbeitsphysiologie.* Stuttgart : Georg Thieme Verlag, 1983.

Sahasrabudhe, Vineet, et al. 2002. Simulation Investigation of a Comprehensive Collective-Axis Tactile Cueing System. *American Helicopter Society 58th annual forum.* Montreal, Canada : s.n., 2002.

Sampaio, R. dos Santos. 2019. *Automatic Inceptor Decouplng System in Electronically Coupled Active Sidesticks for Dual Pilot Helicopters.* Braunschweig : German Aerospace Center (DLR e.V.), 2019.

Schelling, Jürgen. 2021. *Mockup der Bell 525 in Berlin präsentiert.* s.l. : Cockpit. Das Schweizer Luft- und Raumfahrt-Magazin, 2021.

Schünke, Michael. 2014. Topografie und Funktion des Bewegungssystems. *Funktionelle Anatomie.* s.l. : Thieme, 2014.

Sommerfeld, Peter. 2020. *Über dem Atlantik lässt der "King Stallion" seine Muskeln spielen.* s.l. : AEROPORT - Das Luftfahrtmagazin der MTU Aero Engines, 2020.

Stoll, T., et al. 2002. Isometric Muscle Strength Measurement. Suttgart : George Thieme Verlag, 2002.

Stoll, T., et al. 2000. Maximal Isometric Muscle Strength: Normative Values and Gender-Specific Relation to Age. *Clinical Rheumatology.* 2000.

Taylor, Adam, Greenfield, Aaron und Sahasrabudhe, Vineet. 2008. *The Development of Active Inceptor Systems and the Scope and Design Issuses of Tactile Cueing Systems.* Rochester, Stratford : BAE Systems, Sikorsky Aircraft Corporation, Proceedings, 64th Annual Forum of the American Helicopter Society, 2008.

Traverse, Pascal, Lacaze, Isabelle und Souyris, Jean. 2005. *Airbus Fly-by-Wire: a process toward total dependability.* Toulous : Airbus, 25th International Congress of the Aeronautical Sciences, 2005.

TU München. 2021. [Online] 2021. [Zitat vom: 03. 08 2021.] https://www.mw.tum.de/lfe/startseite/, https://tum-asia.edu.sg/.

von Grünhagen, Wolfgang , et al. 2010. *Active Inceptors in FHS for Pilot Assistance Systems.* Paris : 36th European Rotorcraft Forum,, 2010.

Wakula, J., et al. 2009. Der montagespezifische Kraftatlas. [Buchverf.] BGIA - Institut für Arbeitsschutz der Deutschen Gesetzlichen Unfallversicherung. Sankt Augustin : Deutsche Gesetzliche Unfallversicherung (DGUV), 2009.

Wang, M., Leger, A. B. und Dumas, G. A. 2005. Prediction of back strength using anthropometric and strength measurements in healthy femals. *Clinical Biomechanics.* 2005.

Whalley, Matthew S., Hindson, William S. und Thiers, George G. 2000. A Comparison of Active Sidestick and Conventional Inceptors for Helicopter Flight Envelope Tactile Cueing. *American Helicopter Society 56th Annual Forum.* Virginia : Seite 24, 2000.

Wittenstein, Aersopace & Simulation. 2021. [Online] Wittenstein motion control GmbH, 2021. [Zitat vom: 21. 05 2021.] https://motion-control.wittenstein.de/de-de/leistungen/anwendungen/t-50/.

Xiao, G., et al. 2005. Isometric muscle strength and anthropometric characteristics of a Chinese sample. *International Journal of Industrial Ergonomics.* 2005.

Zammali, Amira, et al. 2015. *Communication integrity for future helicopters flight control systems.* Toulouse, Marignane : Université de Toulouse, Airbus Helicopters, 2015.

* Vergleich von beidhändigen und einhändigen Maximalkräfte im Sitzen - Kapitel *2.1.4 Spezifische Werte für Finger- und Handkräfte*

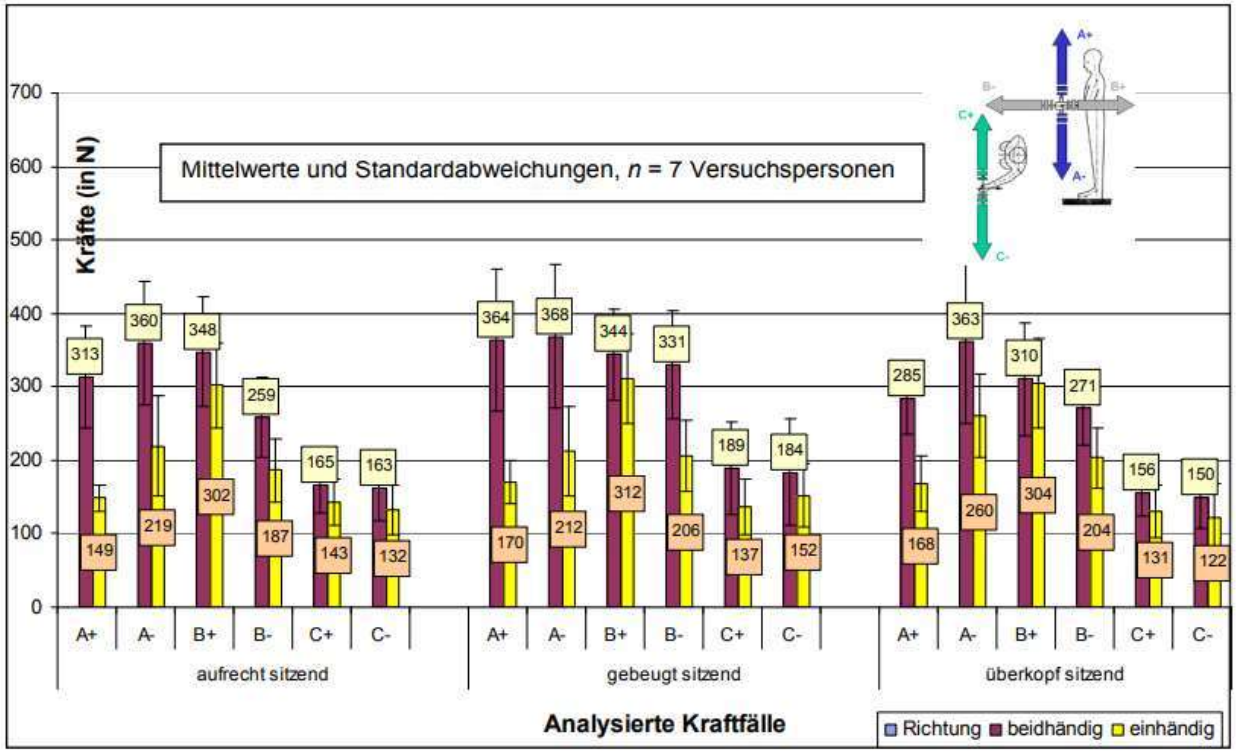


Abbildung 21: Vergleich von beidhändigen und einhändigen Maximalkräfte im Sitzen (Wakula, et al., 2009)

*1. EASA CS-27 Small Rotorcraft Amendment 7 (24.06.2020) – Kapitel *2.1.6 Die aktuellen rechtsgültigen Anforderungen an Helikopter-Steuersysteme (gem. EASA)*

CS 27.1 Anwendungsbereich

(a) Diese Zertifizierungsvorgaben gelten für kleine Drehflügler mit einem Höchstgewicht von 3175 kg oder weniger und neun oder weniger Passagiersitzen.

(b) (Reserviert)

(c) Mehrmotorige Drehflügler können als Kategorie A zugelassen werden, sofern die in Anhang C genannten Anforderungen erfüllt sind.

[…]

Kapitel "Control Surface and system loads" [Seite 1-C-3, Dokument CS-27 Amendment 7]

CS 27.391 Allgemein

Jeder Hilfsrotor, jede feste oder bewegliche Stabilisierungs- oder Steuerfläche und jedes System, das eine Flugsteuerung bedient, muss den Anforderungen von CS 27.395, 27.397, 27.399, 27.411 und 27.427 entsprechen.

CS 27.395 Steuerungssystem

(a) Der Teil jedes Steuersystems, der von der Steuerung des Piloten bis zu den Steueranschlägen reicht, muss so ausgelegt sein, dass er den Kräften des Piloten standhält, die nicht geringer sind als –

(1) Die Kräfte, welche in CS 27.397 angegeben sind; oder

(2) Wenn das System den Piloten daran hindert, die Grenzpilotenkräfte auf das System aufzubringen, sind die maximalen Kräfte, die das System dem Piloten erlaubt aufzubringen, jedoch nicht weniger als das 0,60-Fache, die in CS 27.395 angegebenen Kräfte.

(b) Jedes primäre Steuersystem einschließlich deiner tragenden Struktur, muss wie folgt ausgelegt sein:

(1) Das System muss Belastungen standhalten, die aus den in CS 27.397 vorgeschriebenen Grenzsteuerkräften resultieren.

(2) Ungeachtet des Unterkapitel (b)(3) muss das System bei Verwendung von kraftbetätigten Stellantrieb-Steuerungen oder Power-Boots-Steuerungen auch den Belastungen standhalten, die sich aus der Kraftabgabe jeder normal erregten Leistungseinrichtung ergeben, einschließlich des Ausfalls eines einzelnen Leistungszusatz/single power boost oder Steuermotor-Systems.

(3) Wenn die Systemauslegung oder die normalen Betriebslasten so sind, dass ein Teil des Systems nicht auf die in CS 27.397 vorgeschriebenen Grenzkräfte reagieren kann, muss dieser Teil des Systems so ausgelegt werden, dass er den maximalen Lasten standhält, die im normalen Betrieb erreicht werden können. Die Mindestauslegungslasten müssen in jedem Fall ein robustes System für den Einsatz im Betrieb gewährleisten, einschließlich der Berücksichtigung von Ermüdung, Verklemmung, Bodenböen, Steuerungsträgheit und Reibungslasten. In Abwesenheit einer rationellen Analyse sind die Konstruktionslasten, die sich aus 0,60 der angegebenen Grenzsteuerkräfte ergeben, akzeptable Mindestauslegungslasten.

Wenn die Systemauslegung oder die normalen Betriebslasten so sind, dass ein Teil des Systems nicht auf die in CS 27.397 vorgeschriebenen Grenzkräfte reagieren kann, muss dieser Teil des Systems so ausgelegt werden, dass er den maximalen Lasten standhält, die im normalen Betrieb erreicht werden können. Die Mindestauslegungslasten müssen in jedem Fall ein robustes System für den Einsatz im Betrieb gewährleisten, einschließlich der Berücksichtigung von Ermüdung, Verklemmung, Bodenböen, Steuerungsträgheit und Reibungslasten. In Ermangelung einer rationellen Analyse sind die Konstruktionslasten, die sich aus 0,60 der angegebenen Grenzsteuerkräfte ergeben, akzeptable Mindestauslegungslasten.

(4) Wenn die Betriebslasten durch Verklemmen, Boden, Böen, Steuerungsträgheit oder Reibung überschritten werden können, muss das System den in CS 27.395 angegebenen Grenzsteuerkräften standhalten, ohne nachzugeben.

CS 27.397 Grenzsteuerkräfte und Drehmomente

(b) Mit Ausnahme der Bestimmungen in Unterabsatz (b) sind die Grenzsteuerkräfte wie folgt:

(3) Für Fußsteuerung: 578 N bzw. 130 lbs

(4) Für Stick-Steuerung: 445 N bzw. 100 lbs vor und zurück, und 298 N bzw. 67 lbs seitlich/lateral

(c) Für Klappen-/Landeklappen-, Hilfsruder-, Stabilisator-, Rotorbremsen- und Fahrwerksbedienungen gilt folgendes:

(1) Kurbel-, Rad- und Hebelsteuerung: (25,4 + R) x 2.919 N, wobei R=dem Radius in Millimeter entspricht; bzw. $\left[\frac{1+R}{3}\right] x\ 50\ lbs$, wobei R = dem Radius in Inches/Zoll entspricht;

aber weder weniger als 222 N bzw. 50 lbs noch mehr als 445 N bzw. 100 lbs für eine Hand-bediente Steuerung oder 578 N bzw. 130 lbs für eine Fuß-bediente Steuerung, an einem beliebigen Winkel innerhalb von 20 Grad zur Bewegungsebene der Steuerung angebracht.

(2) Drehregler: 356 x R Newtonmillimeter, wobei R = dem Radius in Millimeter; bzw. 80 x R Inch/Zoll-Pounds, wobei R = dem Radius in Inches/Zoll entspricht.

CS 27.399 Duales Kontrollsystem (zwei Piloten)

Jedes duale primäre Flugsteuerungssystem muss so ausgelegt sein, dass es den Belastungen standhält, die sich ergeben, wenn Steuerkräfte des 0,75-fachen der nach CS 27.395 ermittelten Kräfte aufgebracht werden;

(a) Gegenläufig; und

(b) In die gleiche Richtung.

CS 27.411 Bodenfreiheit: Heckrotorschutz

a. Es muss ausgeschlossen sein, dass der Heckrotor bei einer normalen Landung die Landefläche berührt.
b. Wenn ein Heckrotorschutz erforderlich ist, um die Einhaltung der Vorschriften mit Unter-Paragraph (a) einzuhalten:
   (1) Für die Schutzeinrichtung müssen geeignete Auslegungslasten ermittelt werden; und
   (2) Die Schutzeinrichtung und ihre tragende Struktur müssen so ausgelegt sein, dass sie diesen Belastungen standhalten.

Das Kapitel CS 27.785 behandelt die Steuerkräfte des Piloten im Hinblick auf die Auslegung des Pilotensitzes:

CS 27.785 Sitze, Schlafplätze, Sicherheitsgurte und Gurtzeuge

[…]

(f) […]

(1) Jeder Pilotensitz muss für die Reaktion ausgelegt sein, die sich aus der Anwendung der in CS 27.397 vorgeschriebenen Steuerkräfte ergibt, und

(2) Es müssen die in CS 27.561 (b) beschriebenen Wechselwirkungskräfte bei der Bestimmung der Befestigungsstärke mit dem Faktor 1,33 multipliziert werden:

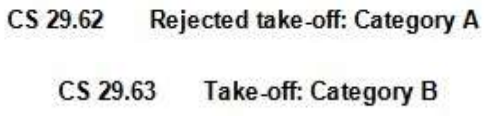
(1) jeder Sitz an der Struktur;

(2) und jeder Sicherheitsgurt oder -gurt an dem Sitz oder der Struktur.

Kommentar: Wenn eine Reduzierung der Kräfte auf Grundlage der Ergebnisse dieser Arbeit denkbar würde, würde sich die Auslegung des Pilotensitz möglicherweise ebenfalls verändern. Wenn es zu diesem Ergebnis kommt, müssen die Bedingungen in Absatz (2) vorher einer Prüfung unterzogen werden.

*2. EASA CS-29 Large Rotorcraft Amendment 8 (24.06.2020) – Kapitel *2.1.6 Die aktuellen rechtsgültigen Anforderungen an Helikopter-Steuersysteme (gem. EASA)*

Kommentar: Die in folgenden Abschnitten angegebene Einteilung der großen Drehflügler in Kategorie A oder/und B wird in dem Dokument später ersichtlich. Die Kapitel des Dokuments geben in der Überschrift an, ob die Vorgaben für einen Drehflügler der Kategorie A oder B zutreffend sind (Beispiel siehe Abbildung). Einige Kapitel verfügen über keine Angabe der Kategorie-Zugehörigkeit und sind für beide Kategorien gültig. Ein Beispiel ist in der folgenden Abbildung zu sehen.



CS 29.1 Anwendungsbereich

(a) Diese Zertifizierungsvorgaben gelten für große Drehflügler.
(b) Große Drehflügler müssen entweder nach den Anforderungen der Kategorie A oder der Kategorie B zertifiziert sein. Ein mehrmotoriger Drehflügler kann sowohl nach Kategorie A als auch nach Kategorie B zugelassen werden, mit entsprechenden und unterschiedlichen Betriebsgrenzen für jede Kategorie.
(c) Drehflügler mit einem Höchstgewicht von mehr als 9072 kg bzw. 20.000 Pfund und 10 oder mehr Passagiersitzen müssen als Drehflügler der Kategorie A zugelassen werden.
(d) Drehflügler mit einem Maximal-Gewicht größer als 9.072 kg bzw. 20.000 Pfund und 9 oder weniger Passagiersitzen können als Drehflügler der Kategorie B zertifiziert werden, sofern die Anforderungen der Kategorie A gemäß den Unterabschnitten C, D, E und F erfüllt sind.

e) Drehflügler mit einem Höchstgewicht von 9072 kg bzw. 20000 Pfund oder weniger, aber mit 10 oder mehr Passagiersitzen können als Drehflügler der Kategorie B zugelassen werden, sofern die Anforderungen der Kategorie A gemäß CS 29.67 (a) (2), 29.87, 29.1517 und den Unterabschnitten C, D, E und F erfüllt werden.
(f) Drehflügler mit einem Höchstgewicht von 9072 kg (20000 Pfund) oder weniger und neun oder weniger Passagiersitzen können als Drehflügler der Kategorie B Typen-zertifiziert werden.

Kapitel „Control Surface and System loads"

CS 29.391 Allgemein

Jeder Hilfsrotor, jede feste oder bewegliche Stabilisierungs- oder Steuerfläche und jedes System zur Betätigung einer Flugsteuerung muss die Anforderungen von CS 29.395 bis 29.427 erfüllen.

CS 29.395 Steuerungssystem

(a) Die Reaktion auf die in CS 29.397 vorgeschriebenen Lasten muss bereitgestellt werden von:
  (1) ? Nur die Steuerung stoppt;
  (2) ? Nur die Steuerung ist gesperrt;
  (3) Nur der irreversible Mechanismus (bei verriegeltem Mechanismus und mit der Steuerfläche in den kritischen Positionen für die effektiven Teile der Systeme innerhalb ihrer Bewegungsgrenze);
  (4) die Anbringung des Steuerungssystems nur am Rotorblattverstellhorn (mit der Steuerung in den kritischen Positionen für die betroffenen Teile des Systems innerhalb der Grenzen seiner Bewegung); und
  (5) Die Befestigung des Steuerungssystems an dem Ruderhorn (mit der Steuerung in den kritischen Positionen für die betroffenen Teile des Systems innerhalb der Grenzen seiner Bewegung).

(a) Jedes primäre Steuersystem einschließlich deiner tragenden Struktur, muss wie folgt ausgelegt sein:

(1) Das System muss Belastungen standhalten, die aus den in CS 27.397 vorgeschriebenen Grenzsteuerkräften resultieren.

(2) Ungeachtet des Unterkapitel (b)(3) muss das System bei Verwendung von kraftbetätigten Stellantrieb-Steuerungen oder Power-Boots-Steuerungen auch den Belastungen standhalten, die sich aus der Kraftabgabe jeder normal erregten Leistungseinrichtung ergeben, einschließlich des Ausfalls eines einzelnen Leistungszusatz/single power boost oder Steuermotor-Systems.

(3) Wenn die Systemauslegung oder die normalen Betriebslasten so sind, dass ein Teil des Systems nicht auf die in CS 27.397 vorgeschriebenen Grenzkräfte reagieren kann, muss dieser Teil des Systems so ausgelegt werden, dass er den maximalen Lasten standhält, die im normalen Betrieb erreicht werden können. Die Mindestauslegungslasten müssen in jedem Fall ein robustes System für den Einsatz im Betrieb gewährleisten, einschließlich der Berücksichtigung von Ermüdung, Verklemmung, Bodenböen, Steuerungsträgheit und Reibungslasten. In Abwesenheit einer rationellen Analyse sind die Konstruktionslasten, die sich aus 0,60 der angegebenen Grenzsteuerkräfte ergeben, akzeptable Mindestauslegungslasten.

Wenn die Systemauslegung oder die normalen Betriebslasten so sind, dass ein Teil des Systems nicht auf die in CS 27.397 vorgeschriebenen Grenzkräfte reagieren kann, muss dieser Teil des Systems so ausgelegt werden, dass er den maximalen Lasten standhält, die im normalen Betrieb erreicht werden können. Die Mindestauslegungslasten müssen in jedem Fall ein robustes System für den Einsatz im Betrieb gewährleisten, einschließlich der Berücksichtigung von Ermüdung, Verklemmung, Bodenböen, Steuerungsträgheit und Reibungslasten. In Ermangelung einer rationellen Analyse sind die Konstruktionslasten, die sich aus 0,60 der angegebenen Grenzsteuerkräfte ergeben, akzeptable Mindestauslegungslasten.

(4) Wenn die Betriebslasten durch Verklemmen, Boden, Böen, Steuerungsträgheit oder Reibung überschritten werden können, muss das System den in CS 27.395 angegebenen Grenzsteuerkräften standhalten, ohne nachzugeben.

CS 29.397 Grenzsteuerkräfte and Drehmomente

(a) Mit Ausnahme der Bestimmungen in Unterabsatz (b) sind die Grenzsteuerkräfte wie folgt:

(1) Für Fußsteuerung: 578 N bzw. 130 lbs

(2) Für Stick-Steuerung: 445 N bzw. 100 lbs vor und danach, und 298 N bzw. 67 lbs seitlich/lateral

(b) Für Klappen-/Landeklappen-, Hilfsruder-, Stabilisator-, Rotorbremsen- und Fahrwerksbedienungen gilt folgendes:

(1) Kurbel-, Rad- und Hebelsteuerung: (25,4 + R) x 2.919 N, wobei R=dem Radius in Millimeter entspricht; bzw. $\left[\frac{1+R}{3}\right] x\ 50\ lbs$, wobei R = dem Radius in Inches/Zoll entspricht;

aber weder weniger als 222 N bzw. 50 lbs noch mehr als 445 N bzw. 100 lbs für eine Hand-bediente Steuerung oder 578 N bzw. 130 lbs für eine Fuß-bediente Steuerung, an einem beliebigen Winkel innerhalb von 20 Grad zur Bewegungsebene der Steuerung angebracht.

(2) Drehregler: 356 x R Newtonmillimeter, wobei R = dem Radius in Millimeter; bzw. 80 x R Inch/Zoll-Pounds, wobei R = dem Radius in Inches/Zoll entspricht.

CS 29.399 Duales Steuerungssystem

Jedes duale primäre Flugsteuerungssystem muss so ausgelegt sein, dass es den Belastungen standhält, die sich ergeben, wenn Steuerkräfte des 0,75-fachen der nach CS 27.395 ermittelten Kräfte aufgebracht werden;

(c) Gegenläufig; und

(d) In die gleiche Richtung.

CS 29.411 Bodenfreiheit: Heckrotorschutz (für unsere Untersuchung nicht relevant)

c. Es muss ausgeschlossen sein, dass der Heckrotor bei einer normalen Landung die Landefläche berührt.

d. Wenn ein Heckrotorschutz erforderlich ist, um die Einhaltung der Vorschriften mit Unter-Paragraph (a) einzuhalten:

(3) Für die Schutzeinrichtung müssen geeignete Auslegungslasten ermittelt werden; und

(4) Die Schutzeinrichtung und ihre tragende Struktur müssen so ausgelegt sein, dass sie diesen Belastungen standhalten.

Kommentar: Das Kapitel CS 29.785 behandelt die Steuerkräfte des Piloten im Hinblick auf die Auslegung des Pilotensitzes:

CS 29.785 Sitze, Schlafplätze, Sicherheitsgurte und Gurtzeuge

[…]

(f) […]

(1) Jeder Pilotensitz muss für die Reaktion ausgelegt sein, die sich aus der Anwendung der in CS 29.397 vorgeschriebenen Steuerkräfte ergibt, und

(2) Es müssen die in CS 29.561 (b) beschriebenen Wechselwirkungskräfte bei der Bestimmung der Befestigungsstärke mit dem Faktor 1,33 multipliziert werden:

(1) Jeder Sitz an der Struktur; und

(2) Jeder Sicherheitsgurt oder -gurt an dem Sitz oder der Struktur.

Kommentar: Wenn eine Reduzierung der Kräfte auf Grundlage der Ergebnisse dieser Arbeit denkbar würde, würde sich die Auslegung des Pilotensitz möglicherweise ebenfalls verändern. Wenn es zu diesem Ergebnis kommt, müssen die Bedingungen in Absatz (2) vorher einer Prüfung unterzogen werden.

*Verwendete Fragebögen - Kapitel *5.2. Fragebögen*

Biographical Questionnaire - Participant ID: 2021-____

age: _____ sex: ◯ female ◯ male

military flight experience: ◯ yes ◯ no, service: ____ years, total flight hours: _____

civil flight experience: ◯ yes ◯ no, service: ____ years, total flight hours: _____

test pilot flight experience: ◯ yes ◯ no, service: ____ years, total flight hours: _____

flight hours last 12 month, VFR: _____ flight hours last 12 month, IFR: _____

simulator hours from above, VFR: _____ simulator hours from above, IFR: _____

type rating (top 5)	flight hours	>10h last 12 month
		◯ yes ◯ no
		◯ yes ◯ no
		◯ yes ◯ no
		◯ yes ◯ no
		◯ yes ◯ no

Other A/C with more than 100 hours: _____

Experience with…	none	< 10 h	< 100 h	< 1000 h	1000 h and more
Tactile Cueing					
in general					
for helicopters in general					
for torque protection					

Questionnaire – Tactile Cueing Quality - Participant ID: 2021-_____

Helicopter evaluation - new tactile Cue forms

1. Cue Detectability: The presented tactile Cue was

   ☐ Not detectable/not detected during tasks

   ☐ Generally detectable, but might be overlooked in high workload situations

   ☐ Detectable also in high workload situations

   ☐ Other - Please describe them to us:

2. Cue Force Intensity: The presented tactile Cue was

   ☐ Not intense enough, could be accidentally exceeded

   ☐ Good compromise: prevents accidental and allows intentional exceedance

   ☐ Too intense: does not allow intentional exceedance

   ☐ Other - Please describe them to us:

3. Oscillation at Cue Contact: Oscillation was

   ☐ Not a factor

   ☐ A factor, but tolerable

   ☐ Not tolerable

4. Level of support: The presented tactile Cue

   ☐ Warned me

   ☐ Warned me and prevented exceedance when expected

   ☐ Warned me and prevented exceedance when not expected

   ☐ Prevented and guided

   ☐ Other - Please describe them to us:

5. Annoyance: The presented tactile Cue was

   ☐ Never annoying

   ☐ Sometimes annoying, but the usefulness always overweight

   ☐ Sometimes annoying and the usefulness did not overweight the annoyance

   ☐ Always annoying and the usefulness did not overweight

6. Agility Level of a moving Cue: The position of the tactile Cue moved

   ☐ Slow enough, so that I could actively/consciously follow it

   ☐ So fast, I could only passively follow it

   ☐ Too fast to willingly interact or maintain contact

SYSTEM ACCEPTANCE SCALE[2]

Description

This scale asseses System acceptance on two dimensions, a *Usefulness* scale and an affective *Satisfying* scale. It can be insightful to first describe the system and have the scale filled in as a before measurement, to asses ideas people have, and then again after experience with the system.

Postprocessing

Score from +2 .. -2, items 3, 6, and 8 are mirrored and should be scored -2..+2. The *Usefulness* scale is the sum of item 1 + 3 + 5 + 7 + 9 divided by 5 (so it has a range from -2 to +2), the *Satisfying* scale is the sum of items 2, 4, 6, and 8, divided by 4.

[2] Van der Laan, J.D., Heino, A., & De Waard, D. (1997). A simple procedure for the assessment of acceptance of advanced transport telematics. Transportation Research - Part C: Emerging Technologies, 5, 1-10. https://www.hfes-europe.org/accept/accept.htm

SYSTEM ACCEPTANCE SCALE

I find such a system with the previously demonstrated configuration…

(Please tick a box on every line)

1	Useful						Useless
2	Pleasant						Unpleasent
3	Bad						Good
4	Nice						Annoying
5	Effective						Superfluous
6	Irritating						Likeable
7	Assisting						Worthless
8	Undesirable						Desirable
9	Raising Alertness						Sleep-inducing

Open Questionnaire - Participant ID: 2021-_____

Helicopter evaluation for new tactile Cue forms

1. Beschreiben Sie, was Sie während der Untersuchungen bemerkt haben oder was Ihnen besonders aufgefallen ist. / Please describe what you noticed during the examinations or what particularly struck you.

2. Welcher der Cues hat Ihnen am besten gefallen. / Which cue did you like best

3. Haben Sie noch Anmerkungen? / Do you have any comments or remarks?

Eidesstattliche Erklärung

Hiermit versichere ich, Anne-Marie Behrens, die vorliegende Arbeit selbstständig, ohne fremde Hilfe und ohne Benutzung anderer als der von mir angegebenen Quellen angefertigt zu haben. Alles aus fremden Quellen direkt oder indirekt übernommenen Gedanken sind als solche gekennzeichnet.

Die Arbeit wurde noch keiner Prüfungsbehörde in gleicher oder ähnlicher Form vorgelegt.

Dresden, den 26. November 2021

.....

Anne-Marie Behrens