

Haptic Torque-Protection für Hubschrauber

Mario Müllhäuser

Deutsches Zentrum für Luft- und Raumfahrt
Institut für Flugsystemtechnik
Braunschweig



DLR

Deutsches Zentrum
für Luft- und Raumfahrt

Forschungsbericht 2024-26

Haptic Torque-Protection für Hubschrauber

Mario Müllhäuser

Deutsches Zentrum für Luft- und Raumfahrt
Institut für Flugsystemtechnik
Braunschweig

273 Seiten
86 Bilder
25 Tabellen
133 Literaturstellen



Herausgeber:

Deutsches Zentrum
für Luft- und Raumfahrt e. V.
Wissenschaftliche Information
Linder Höhe
D-51147 Köln

ISSN 1434-8454
ISRN DLR-FB-2024-26
Erscheinungsjahr 2025
DOI: [10.57676/ns3g-bc35](https://doi.org/10.57676/ns3g-bc35)

Erklärung des Herausgebers

Dieses Werk wird unter den Bedingungen der Creative Commons Lizenz vom Typ Namensnennung 4.0 International, abrufbar über <https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/legalcode> , zur Nutzung überlassen.

Lizenz



Creative Commons Attribution 4.0 International

Hubschrauber, aktiver Sidestick, Tactile Cueing, Flugversuch, Arbeitsbelastung, Blickbewegung, Steuerkraft, Cockpit, Mensch-Maschine-Schnittstelle

Mario Müllhäuser
DLR, Institut für Flugsystemtechnik, Braunschweig

Haptic Torque-Protection für Hubschrauber

Dissertation, Technische Universität Braunschweig

Die hohe Systemkomplexität von Hubschraubern kann zu einer hohen Arbeitsbelastung der Piloten führen, insbesondere in Situationen mit niedriger Höhe, Hindernissen und unbekannten Umgebungen. Um dies zu adressieren, werden Tactile Cues mit Hilfe aktiver Steuerorgane generiert, also Krafrückmeldungen, welche die Informationen fühlbar machen und das unbeabsichtigte Überschreiten von Betriebsgrenzen verhindern sollen. In dieser Arbeit wurde eine Haptic Torque-Protection implementiert und untersucht. Diese stellt das maximale erlaubte Leistungslimit, bzw. das Drehmomentenlimit des Antriebsstrangs durch Tactile Cues am aktiven Sidestick dar. Die Untersuchung der Haptic Torque-Protection erfolgte in drei experimentellen Studien mit insgesamt 22 Piloten. Die Ergebnisse zeigten, dass die Funktion die Arbeitsbelastung der Piloten reduzieren und die Präzision in Bezug auf die Limiteinhaltung und den Nutzungsgrad der zur Verfügung stehenden Leistung erhöhen kann. Eine Untersuchung der Blickbewegung zeigte mit der Funktion eine deutliche Verschiebung der visuellen Aufmerksamkeit weg von den Cockpitanzeigen hin auf die Außenwelt. Die Piloten attestierten der Haptic Torque-Protection eine hohe Systemakzeptanz und Zufriedenheit. Die untersuchten Tactile Cueing Ausprägungen und aufgetretenen Kräfte wurden bewertet und Anforderungen an die Weiterentwicklung abgeleitet.

rotorcraft, helicopter, active inceptor, Tactile Cueing, flight test, workload, eyetracking, control force, cockpit, human-machine-interface

(Published in German)

Mario Müllhäuser
German Aerospace Center (DLR), Institute of Flight Systems, Braunschweig

Haptic Torque-Protection for Helicopters

Doctoral Thesis, Technical University Braunschweig

The high system complexity of helicopters can lead to a high workload for pilots, especially in situations with low altitude, obstacles and unknown environments. To address this, active controls with tactile cues are used to make information tangible and to avoid undesired exceedances of operational limits. In this thesis, a haptic torque protection was implemented and analysed. This represents the maximum permitted power limit or torque limit of the drivetrain using tactile cues on the active sidestick. The haptic torque protection was investigated in three experimental studies with a total of 22 pilots. The results showed that the function can reduce the pilot's workload and increase precision in terms of limit compliance and the degree of utilisation of the available power. A study of eye movement with the function showed a clear shift in visual attention away from the cockpit displays and towards the outside world. The pilots attested to a high level of system acceptance and satisfaction with the haptic torque protection. The tactile cueing characteristics and forces that occurred were evaluated and requirements for further development were derived.

TU Braunschweig – Niedersächsisches
Forschungszentrum für Luftfahrt

Berichte aus der Luft- und Raumfahrttechnik

Forschungsbericht 2025-07

Haptic Torque-Protection für Hubschrauber

Mario Müllhäuser

Deutsches Zentrum für Luft- und Raumfahrt
Institut für Flugsystemtechnik
Braunschweig

Diese Veröffentlichung wird gleichzeitig in der Berichtsreihe „NFL - Forschungsberichte“ geführt.

Diese Arbeit erscheint gleichzeitig als von der Fakultät für Maschinenbau der Technischen Universität Carolo-Wilhelmina zu Braunschweig zur Erlangung des akademischen Grades eines Doktor-Ingenieurs genehmigte Dissertation.

Haptic Torque-Protection für Hubschrauber

Von der Fakultät für Maschinenbau
der Technischen Universität Braunschweig
zur Erlangung der Würde

eines Doktor-Ingenieurs (Dr.-Ing.)

genehmigte Dissertation

von: Mario Müllhäuser
geboren in: Hamburg

eingereicht am: 09.11.2023
mündliche Prüfung am: 26.07.2024

Vorsitz: Prof. Dr.-Ing. Dirk Kügler
Gutachter: Prof. Dr.-Ing. Stefan Levedag
Gutachter: Prof. Dr.-Ing. Peter Hecker

Schlagwörter: Hubschrauber, aktiver Sidestick, Tactile Cueing, Flugversuch, Arbeitsbelastung, Blickbewegung, Steuerkraft, Cockpit, Mensch-Maschine-Schnittstelle

Haptic Torque-Protection für Hubschrauber - Kurzfassung

Die typischen Funktionen des Hubschraubers als senkrecht start- und landefähiger Rettungs-, Arbeits-, Transport-, oder Kampfhubschrauber beinhalten häufig das Operieren in niedriger Höhe, dazu hindernisnah und in unbekannten Umgebungen. Dessen hohe Systemkomplexität mit zahlreichen Grenzen des Betriebs- und Flugbereichs bedingen gerade in diesen Situationen eine hohe Arbeitsbelastung der Piloten und erhöhen die Gefahr, relevante Informationen zu übersehen. Dies kann in der Folge zu Kollisionen oder Beschädigungen durch unbeabsichtigte Limitüberschreitungen führen. Zur Ergänzung der üblichen visuellen Cockpitanzeigen werden die ersten Hubschrauber- und Flächenflugzeugmuster mit aktiven Steuerorganen ausgerüstet, um damit so genannte *Tactile Cues* erzeugen. Das sind Kraftrückmeldungen, eng. *force feedback*, die, als zusätzliche Modalität der Mensch-Maschine-Schnittstelle, Informationen fühlbar machen sollen. Da die *Tactile Cues* direkt auf das Pilotensteuer wirken, ermöglichen diese zudem eine Form von haptischer Interaktion: Der Pilot wird nicht nur informiert, sondern durch wohldosierte Gegenkräfte, die an der mit der Betriebs- oder Flugbereichsgrenze korrespondierenden Steuerposition wirksam werden, gleichzeitig an der unbeabsichtigten Überschreitung der Limits gehindert. Eine weitere Kernidee ist es dabei, die maximale Kraft des *Tactile Cues* dabei so zu bemessen, dass eine bewusste Überschreitung trotzdem möglich ist, um die Pilotenautorität zu wahren.

In dieser Arbeit wird die iterative Entwicklung und Untersuchung einer *Haptic Torque-Protection* für den Forschungshubschrauber ACT/FHS und dessen Bodensimulator beschrieben. Diese stellt das jeweils gültige, maximal erlaubte Leistungslimit bzw. das Drehmoment des Antriebsstrangs, eng. *Torque* sowie zeitlich beschränkte Betriebsbereiche durch *Tactile Cues* am aktiven Sidestick zur Kollektivsteuerung dar.

Die Untersuchung der *Haptic Torque-Protection* erfolgte in drei aufeinander aufbauenden, experimentellen Studien, sowohl im Simulator als auch in einem Flugversuch mit dem ACT/FHS mit insgesamt 22 Piloten. Dazu wurden verschiedene Ausprägungen von *Tactile Cues* entworfen und während unterschiedlicher High-Performance Takeoff Manöver mit einem Referenzfall ohne *Tactile Cueing* verglichen. Es zeigte sich, dass die Funktion die Arbeitsbelastung der Piloten beim Operieren am Limit stark reduzieren und die Präzision in Bezug auf die Limiteinhaltung und den Nutzungsgrad der zur Verfügung stehenden Leistung erhöhen kann. Eine Untersuchung der Blickbewegung zeigte mit der Funktion eine deutliche Verschiebung der visuellen Aufmerksamkeit weg von den Cockpitanzeigen hin auf die Außenwelt. Die gemessenen aufgewandten Kräfte lagen unterhalb von 30 N, d.h. weit unterhalb der Maximalkräfte gängiger aktiver Steuerorgane. Alle Piloten attestierten der gezeigten *Haptic Torque-Protection* eine hohe Systemakzeptanz, d.h. eine hohe Nützlichkeit und Zufriedenheit. Darüber hinaus wurden die untersuchten *Tactile Cueing* Ausprägungen bewertet und Anforderungen an die Weiterentwicklung abgeleitet.

Keywords: rotorcraft, helicopter, active inceptor, tactile cueing, flight test, workload, eyetracking, control force, cockpit, human-machine-interface

Haptic Torque-Protection for Helicopters - Abstract

The helicopter's typical roles as a vertical take-off and landing capable rescue, work, transport or combat aircraft often involves operating at low altitudes, close to obstacles and in unfamiliar environments. Its high system complexity with numerous limits of the operating and flight envelope causes high workload for the pilots especially in these situations and increases the risk of overlooking relevant information, resulting in collision or damage due to unintentional limit violations. Today, first helicopter and fixed-wing aircraft models are being equipped with active inceptors to supplement the common visual cockpit displays. These can generate so-called *tactile cues*, i.e. force feedback, in order to make information tangible as an additional modality of the human-machine interface. Since the *tactile cues* act directly on the pilot's control, they also enable a form of haptic interaction: the pilot is not only informed, but is also prevented from unintentionally exceeding the limits by well-dosed counterforces that take effect at the control position corresponding to the operating or flight envelope limit. A further core idea is to dimension the maximum force of the *tactile cue* in such a way that a deliberate exceedance is still possible in order to preserve pilot authority.

This doctoral thesis describes the iterative development and evaluation of a *haptic torque protection* for the research helicopter ACT/FHS. This indicates the currently valid maximum permitted drivetrain power or *torque* limit, as well as time-limited operating ranges through *tactile cues* on the active sidestick for collective control.

The evaluation of the *haptic torque protection* was carried out in three successive experimental studies, both in the simulator and in one flight test with the ACT/FHS with a total of 22 pilots. Different manifestations of *tactile cues* during different high-performance takeoff manoeuvres were designed and compared with a reference case without *tactile cueing*. It was shown that the *haptic torque protection* can greatly reduce the pilot workload when operating at the limit and increase precision in terms of limit compliance and the degree of utilisation of the available power. A study of eye movement showed the potential of a *haptic torque protection* to significantly shift the visual attention away from the cockpit displays to the outside world. The measured forces applied were below 30 N, i.e. far below the maximum forces of common active control devices. All pilots attested the realized *haptic torque protection* high system acceptance, i.e. high usefulness and satisfaction. Furthermore, the different *tactile cueing* manifestations were evaluated and requirements for further development were derived.

Vorwort

Als ich 2006 in der Hubschrauberabteilung des Instituts für Flugsystemtechnik begonnen hatte, war die Dissertation nur eine Option in weiter Ferne. Mein Berufsalltag bestand aus reinem „Engineering“, um zusammen mit den Kolleginnen und Kollegen ein aktives Steuerorgan für die Kollektivsteuerung in den Forschungshubschrauber ACT/FHS und den Bodensimulator zu bringen. Nachdem es schon für unterschiedlichste Anwendungen genutzt worden war, darunter etwa eine *Sinkrate-Protection* oder die Identifikation optimaler Steuerkrafteigenschaften, die in Dissertationen von Kollegen mündeten, blieb eine wichtige Funktion offen. Die in der Literatur am häufigsten genannte und von einigen als am relevantesten bezeichnete *Tactile Cueing* Funktion für Hubschrauber war die *Haptic Torque-Protection*. Sie wurde bis dato nur in Flugsimulatoren erprobt. Diese Funktion durfte auch im ACT/FHS nicht fehlen, um sie im Flug erproben zu können. 2011 schaffte es schließlich meine erste Fassung einer *Haptic Torque-Protection* in den Flug. Diese performte noch eher schlecht als recht, diente aber als Ansporn eine bessere Funktion zu erschaffen und mündete in die Auseinandersetzung mit der Systemidentifizierung für ein Torque-Modell. Schließlich erfolgte 2012 der erfolgreiche Test einer wirksamen *Haptic Torque-Protection* im Flug. Eine Versuchskampagne wurde im ACT/FHS und im Simulator durchgeführt, welche neben wissenschaftlichen Erkenntnissen, die auch in dieser Arbeit wiedergegeben werden, etwas zurückgab, dessen motivierende Wirkung für das eigene Tun kaum zu übertreffen ist: Positives Feedback für das Geschaffene und das Gefühl etwas Sinnvolles und Wichtiges zu tun. Die Piloten mochten diese Funktion und sagten, dass sie ihre Arbeit vereinfachen würde. Verbesserungen an der Funktion folgten und auch andere *Tactile Cueing*-Funktionen wurden entwickelt und erprobt und schließlich reifte Ende 2016 der Entschluss eine Dissertation über die *Haptic Torque-Protection* zu verfassen und deren Erforschung zu vertiefen. Die Dissertation habe ich nun, ergänzt durch weitere Forschung, teils tags, aber vor allem in vielen Nächten berufs- und familienbegleitend verfasst. Dabei habe ich bis heute das Privileg in diesem Bereich weiter forschen zu dürfen und zusammen mit meinen Kollegen und Kolleginnen das Einsatzspektrum aktiver Steuerorgane zu erweitern.

Forschung ist ein gemeinschaftliches Unternehmen. Insbesondere die angewandte Forschung mit Großanlagen wie dem Forschungshubschrauber ACT/FHS erfordert eine umfangreiche technische Infrastruktur und viele Menschen, die sie gestalten und am Leben halten. Ohne diese – Forschungsanlagen wie Kolleginnen und Kollegen – wäre alles nur trockene Theorie. Viele Ideen entstehen erst während der praktischen Auseinandersetzung mit dem Forschungsgegenstand. Das Studieren, Nachdenken und Formulieren erfordert ungestörte Freiräume, die ich auch bekommen habe. Allen Wegbegleiterinnen und Wegbegleitern, Ermöglicern und Ermöglicherinnen gilt mein Dank. Mit dem Risiko, jemanden zu vergessen, möchte ich einige Personen namentlich nennen.

Zuallererst möchte ich meinem Doktorvater Prof. Dr.-Ing Stefan Levedag und meinem Zweitprüfer Prof. Dr.-Ing. Peter Hecker für die Betreuung und die stets konstruktive Atmosphäre danken.

Herzlicher Dank gilt auch meinen Abteilungsleitern Prof. Dr.-Ing. Christoph Keßler und Marc Höfinger für die Inspiration und Unterstützung meines Promotionsvorhabens. Ganz besonders möchte ich Wolfgang von Grünhagen danken, der die Forschungsaktivitäten mit aktiven Sidesticks für den ACT/FHS damals geleitet und geprägt hat und mich einst in sein Team aufgenommen hat. Marc Höfinger, Martin Gestwa und Daniel Nonnenmacher möchte ich herzlich danken für die Motivationshilfe, besonders auf der langen Zielgeraden am Schluss.

Ich danke meinen (ehemaligen) Bürokollegen Max Abildgaard, Arndt Hoffmann, Rodolfo dos Santos Sampaio und Alexej Dikarew für die vielen, fachlichen und nicht-fachlichen, Diskussionen. Dirk Leißling möchte ich danken für die Zusammenarbeit in der ersten Pilotenstudie im Simulator und im ACT/FHS. Dank geht auch an Steffen Greiser und Johannes Wartmann für die Bereitstellung und Einstellung des Flugreglers, der Interpretation der FLI-Werte und viele kreative Gespräche.

Ich danke herzlich Roger Dögow, der meine Arbeit im Rahmen seines berufsbegleitenden Studiums wiederholt unterstützt und mit Erfahrungsberichten als Berufshubschrauberpilot aus erster Hand bereichert hat. Den (ehemaligen) DLR-Testpiloten und Kollegen Miles Barnett, Uwe Göhmann, Sebastian Soffner, Alexander Göhrmann, Martin Gerber und Rodolfo dos Santos Sampaio möchte ich für die Beratung und Erprobung danken. Ausdrücklich danke ich den teilnehmenden Piloten, die ich hier zur Wahrung ihrer Anonymität nicht namentlich nennen möchte. Auch meinem Projektpartner und Koautor gemeinsamer wissenschaftlicher Veröffentlichungen, Jeff Lusardi, danke ich herzlich für das Sparring über die Kontinente hinweg.

Ganz besonderer Dank gilt allen, die sich um den ACT/FHS und den Flugsimulator kümmern: Robin Lantzsch, in seiner früheren Doppelrolle als Gruppenleiter und FHS-Verantwortlichem, dafür dass es die Torque-Protection in die Luft geschafft hat sowie den Kolleginnen und Kollegen von Institut für Flugexperimente. Den Kollegen aus der Flugversuchstechnik, vor allen Klaus Alvermann für die Bereitstellung eines zuverlässigen Experimentalsystems und die stets schnelle und präzise und vorwärts gerichtete Hilfe bei der Einbindung von Software und dem Retten von Flugdaten. Den Kollegen aus der Simulationsgruppe, darunter ganz besonders Torsten Gerlach, Olaf Mielke, Jürgen Gotschlich und Jan Hettwer für die Unterstützung am Simulator. Maik Friedrich, Tatjana Kapol vom Institut für Flugführung für die Bereitstellung und die Erläuterung des Blickbewegungssystems und Daniel Greiwe für die Unterstützung bei der Auswertung der Blickbewegungsdaten.

Ich möchte auch den Organisationen danken, welche die Studien in verschiedenen Forschungsprogrammen mitfinanziert und/oder unterstützt haben. Zu nennen ist hier das damalige BMWi, jetzt BMWK, z.B. durch das Luftfahrtforschungsprogramm (LuFo), und das BMVg, vertreten durch das BAAINBw und die WTD61. Ganz besonderer Dank gilt, natürlich, dem Deutschen Zentrum für Luft- und Raumfahrt e.V., das durch seine Ausstattung und Kultur des kollegialen Miteinanders hervorragende Möglichkeiten zur Forschung mit und am fliegenden Gerät und auch im Flugsimulator bietet. Hervorheben möchte ich die Kolleginnen aus den Sekretariaten für die zuverlässige organisatorische Unterstützung und aus der DLR Bibliothek für die stets schnelle und unkomplizierte Beschaffung der gewünschten Quellen.

Abschließend und damit ganz besonders danke ich meiner Familie und meinen Freunden, meinen Eltern, aber vor allen meiner Frau Anna Schieben und meinen Kindern. Danke, dass ihr diese Lebensphase mit mir durchgestanden und mir Zeit und Rückhalt gegeben habt.

Mitwirkungen und Vorveröffentlichungen

Teile der dieser Arbeit zu Grunde liegenden Forschungsarbeit wurden durch den Autoren dieser Arbeit bereits vorveröffentlicht.¹ Es gab die folgenden zwei Vorveröffentlichungen:

1. Konferenzbeitrag auf dem *American Helicopter Society - AHS 2013* (heute *Vertical Flight Society* [1], später erschienen im dazugehörigen *Journal of the American Helicopter Society* [2]. Diese Veröffentlichungen umfassen Studie 1, ohne den Teil der Kraftermittlung. Darin wurden Für diese Publikationen hat der Koautor Dirk Leißling einen Beitrag in Form der Auswertung des NASA TLX Fragebogens zur Arbeitsbelastung und dessen Ergebnisdarstellung sowie der Illustration der geflogenen Manöver geleistet. die dieser Arbeit in bearbeiteter Form wiederverwendet wurde.
2. Konferenzbeitrag auf dem *European Rotorcraft Forum* [3]. Diese Veröffentlichung umfasst einen Teil der Studie 3, ohne den Teil der Kraftermittlung.

Der Berufshubschrauberpilot Roger Dögow wurde durch den Autoren dieser Arbeit mehrmals um seine Expertise im Zusammenhang mit der Auswahl sinnvoller Applikationen von *Tactile Cueing* im Allgemeinen und dem Design des Kraftmusters für einen haptischen First-Limit-Indicator im Speziellen gebeten. Diese hat er im Rahmen eigener studentischen Arbeiten gegeben, die durch den Doktoranden und Autor dieser Arbeit betreut wurden. Die zu der studentischen Arbeit gehörenden Simulatorversuche wurden gemeinsam von dem Autoren dieser Arbeit und Roger Dögow durchgeführt [4–6]. Diese Untersuchung war in das LuFo IV - Projekt SiRaSKoF-H eingebettet und wurde auch im Abschlussbericht beschrieben [7].

Die zweite und die dritte Studie wurden durch den Autoren dieser Arbeit hauptsächlich im Rahmen des durch das Bundesamt für Ausrüstung, Informationstechnik und Nutzung der Bundeswehr (BAAINBw) finanzierten Projekts „PA-ATR“ durchgeführt² und durch das BAAINBw zur Veröffentlichung im Rahmen dieser Dissertation genehmigt.

¹Gemäß der Zitierregeln der Fakultät für Maschinenbau der TU Braunschweig, „Berücksichtigung der Beiträge von Studierenden sowie von technischen und wissenschaftlichen Mitarbeiterinnen und Mitarbeitern zu Dissertationen, Braunschweig, September 2014“ zur Sicherung guter wissenschaftlicher Praxis werden die Doktoranden aufgefordert, wesentliche Beiträge anderer zu würdigen und kenntlich zu machen: Studentische Arbeiten werden dazu normal zitiert, technische und beratende Beiträge durch Kollegen/innen sollen kenntlich gemacht werden, sowie Projektfinanzierung dankend benannt werden. Bei Eingenzitation von Vorveröffentlichungen der eigenen Arbeit soll einleitend auf diese hingewiesen werden.

²Schlussbericht [8] - nicht öffentlich zugänglich

Inhaltsverzeichnis

Kurzfassung	IX
Abstract	X
Vorwort	XI
Mitwirkungen und Vorveröffentlichungen	XIII
Nomenklatur	XVII
1. Einleitung	1
1.1. <i>Tactile Cueing</i> mit aktiven Steuerorganen im Luftfahrzeug	2
1.2. Haptic Torque-Protection	9
1.3. Wissenschaftliche Fragestellungen	16
1.4. Abgrenzung und Einschränkungen	17
1.5. Methode und Aufbau der Arbeit	18
2. Grundlagen und Erläuterungen	21
2.1. Begriffsdefinitionen „Tactile Cueing“ und „Haptic“	21
2.2. Aktive Steuerorgane und <i>Tactile Cues</i>	22
2.3. <i>Tactile Cue</i> -Formen und Kräfte für eine <i>Haptic Torque-Protection</i> in der Literatur . .	26
3. Versuchsumgebung ACT/FHS mit aktiven Sidesticks und Simulator	31
3.1. Versuchsträger ACT/FHS und Flugsimulator	31
3.2. Integrierte aktive Sidesticks	33
3.3. Triebwerksanzeige First-Limit-Indicator (FLI)	35
4. Systemdesign Haptic Torque-Protection	39
4.1. Spezifikation und Begriffsdefinition	39
4.2. Systemstruktur	41
4.3. Zustandsautomat zur Auswahl der geltenden Torque-Limits	43
4.4. Torque-Modellierung (Prädiktor)	44
4.5. Simulator Torquemodell	47
4.6. Korrespondierende Steuerposition	48
5. Basissystem - Studie 1: Fokus Funktionsnachweis und Arbeitsbelastung	51
5.1. Tactile Cue Design 1	51
5.2. Simulator- und Realflugversuch	53
5.3. Ergebnisse und Diskussion	64

5.4. Zusammenfassung Studie 1	78
6. Tactile Cue-Design-Optimierung - Studie 2: Fokus Systemakzeptanz	79
6.1. Tactile Cue Design 2	79
6.2. Simulatorflugversuch	82
6.3. Ergebnisse und Diskussion	86
6.4. Zusammenfassung Studie 2	94
7. Finales System - Studie 3: Fokus visuelle Aufmerksamkeit	97
7.1. Tactile Cue Design 3	97
7.2. Simulatorflugversuch	102
7.3. Ergebnisse und Diskussion	114
7.4. Zusammenfassung Studie 3	127
8. Schlussfolgerungen und Ausblick	129
8.1. Präzision: Limiteinhaltung und -Ausschöpfung	129
8.2. Arbeitsbelastung	130
8.3. Verteilung der visuellen Aufmerksamkeit	131
8.4. Kräfte	132
8.5. Systemakzeptanz und nützliche <i>Tactile Cueing</i> -Ausprägungen	134
8.6. Ausblick	136
Literaturverzeichnis	141
A. Pilotenbiographien	A0
B. Rohdaten Studie 1	B0
B.1. Versuchsübersicht	B0
B.2. Flugmessdaten	B3
C. Rohdaten Studie 2	C0
C.1. Teil 1	C0
C.2. Teil 2	C7
C.3. Teil 3	C23
D. Rohdaten Studie 3	D0
D.1. Fragebögen	D17
E. Technische Daten	E0
F. Flugmodell und -Eigenschaften	F0
F.1. Datensätze für Torquemodell Identifizierung	F0
F.2. Torquemodell Dynamikerweiterung	F1
F.3. Flugeigenschaftskriterien	F2

Nomenklatur

Abkürzungen

ACAH	Attitude Command / Attitude Hold, auch AC gebräuchlich
ACS	Active Controller Software: Ansteuerungssoftware für den aktiven Sidestick, welche die Konfiguration für das tactile Cueing berechnet und an den Sidestick sendet
ACT/FHS	Active Control Technology / Flying Helicopter Simulator
AGL	Above Ground Level
AFCS	Advanced Flight Control System, synonym zu FCS
AEO	All Engines Operative, d.h. der Normalbetrieb, in Abgrenzung zu OEI, s.u.
AOI	Area-of-Interest, hier vorab definierte Ebene
ASRA	Advanced Systems Research Aircraft des NRC
AVES	Air Vehicle Simulator am DLR-Standort Braunschweig; beinhaltet unter anderen auch das ACT/FHS-Simulationscockpit
AVMS	Advanced Vehicle Management System, Forschungsprogramm der US Regierung
CDF	Cumulative Distribution Function, kumulative Verteilungsfunktion
CH	Cargo Helicopter, mil. Transporthubschrauber,
CFIT	Controlled Flight into Terrain
CLS	Control Loading System, Aktives Steuerkraftsystem für die Nachbildung der Steuerkräfte im Simulator
DLR	Deutsches Zentrum für Luft- und Raumfahrt e.V.
DVE	Degraded Visual Environment, dt. degradierte bzw. eingeschränkte Sicht
EASA	European Union Aviation Safety Agency
EC	Experimentalcomputer
EHEST	European Helicopter Safety Team, bis 2010
EP	Experimentalpilot
fbw	fly-by-wire, elektronische Signalübertragung
FCMC	Flight Control Mechanical Characteristics, Kinematik und Kraftcharakteristik der Piloten-Steuer
FCS	Flight Control System, synonym zu AFCS
FLI	First-Limit-Indicator, Kombinationsanzeige verschiedener Triebwerkszustände und -Limits
FVI	Flugversuchingenieur
Gl.	Gleichung
GRP	Griff Referenz Punkt, dort wo der Mittelfinger normalerweise den Steuergriff berührt, auch Finger-Referenz-Punkt (FRP)
HACT	Helicopter Active Control Technology
HEMS	Helicopter Medical Service
HMD	Helmet-Mounted-Display
HQR	Handling Qualities Rating, meist Cooper-Harper-Rating
IAS	Indicated Airspeed
IFR	Instrument Flight Rules, dt. Instrumentenflug-Regeln, vgl. VFR

IMC	Instrumental Meteorological Conditions, dt. Instrumentenflug-Bedingungen, vgl. VMC
ITC	In-the-cockpit, vgl. OTW
LLI	Liebherr Aerospace Lindenberg GmbH, Hersteller des in dieser Arbeit verwendeten aktiven Sidesticks
MCP	Maximum Continuous Power
MFD	Multifunktionsdisplay am EP- und am FVI-Platz
MMI	Man-Machine-Interface, dt. Mensch-Maschine-Schnittstelle
MTE	Mission Task Element, repräsentative Flugaufgabe für die Bewertung von Systemfähigkeiten
MTP	Maximum Takeoff Power, 5 min, < 65 kt, vgl. MCP
NRC	National Research Council, Canada
NVG	Night Vision Goggles, dt. Nachtsichtgerät
OEI	One Engine Inoperative, engl. für einseitiger Triebwerksausfall
OTW	out-the-window, vgl. ITC
RASCAL	Rotorcraft Aircrew Systems Concepts Airborne Laboratory
PF	Pilot Flying
PM	Pilot Monitoring, auch Pilot Non Flying (PNF)
RAE	Royal Aerospace Establishment, Bedford, heute Qinetiq
RC	Rate Command
SAETO	Small Arms (Evasion) Takeoff
SAR	Search and Rescue
SAS	Stability Augmentation System
SP	Sicherheitspilot
TC	Turn Coordination
TLX	NASA Task Load Index
TOP	Takeoff Power, bei der H135 der Triebwerksbetriebsbereich zwischen MCP und MTP
TOSS	Takeoff-Safety-Speed, auch V_x , Geschwindigkeit des steilsten Steigens
TRC	Translational Rate Command, steuerproportionale Translationsgeschwindigkeit
UH	Utility Helicopter
VBG	Versuchsbediengerät
VMC	Visual Meteorological Conditions, dt. Sichtflugbedingungen, vgl. IMC
VFR	Visual Flight Rules, dt. Sichtflug-Regeln, vgl. IFR
2PASD	Dual Pilot Active Sidestick Demonstrator

Formelzeichen und Symbole

D	Dämpfungsmaß
F	Steuerkraft
H	Height
Q	Antriebsdrehmoment, eng. Engine Torque, hier in Torque-% (Prozentpunkte)
ROC	Rate of Climb
TC_{off}	Konfiguration ohne <i>Tactile Cue</i>
TC_{STOP}	Konfiguration mit <i>Stop-Cue</i>
TC_{STOP}^{INFO}	Konfiguration mit <i>Stop-Cue</i> und <i>Info-Cue</i>
V	Fluggeschwindigkeit
t	Zeit
δ_i	Steuerposition, Achse i , siehe unten
ϕ, θ, ψ	Roll-, Nick-, Gierwinkel
ρ	Luftdichte

Indizes

<i>Fric</i>	Friction, dt. Reibung
<i>INFO</i>	(Beginn) Info-Torque-Bereich (TOP), zugehörige Kollektivposition (δ_0)
<i>P</i>	zur Pedalsteuerung bzw. Giersteuerung gehörig
<i>STOP</i>	Stop-Torque-Limit (Q), auch MTP, bzw. die zugehörige Kollektivposition (δ_0)
<i>TC</i>	Tactile Cue
<i>cum</i>	cumulated, dt. kumuliert
<i>comp</i>	compensation, dt. zur Kompensation
<i>lim</i>	zu einem Limit bzw. einer Grenze gehörig
<i>mod</i>	Modell
<i>ref</i>	Referenzwert
<i>p</i>	zur Pedalsteuerung gehörig, etwa δ_p
<i>x</i>	in Verbindung mit V: Geschwindigkeit des steilsten Steigens, entspricht V_{TOSS}
<i>y</i>	in Verbindung mit V: Geschwindigkeit des schnellstens Steigens
<i>o</i>	Referenzwert für Luftdichte oder zur Kollektivsteuerung gehörig, δ_0
<i>in-X-s</i>	Vorhersagewert, in x s, in Zusammenhang mit vorhergesagter Fluggeschwindigkeit

Umrechnungen von Einheiten

1 lb $\approx$ 4,448 N (Pound-Force nach Newton)

1 in = 2,54 cm (Inch nach cm)

1 ft/min $\approx$ 0,00508 m/s

1 kt $\approx$ 0.5144 m/s

Rechtschreibung

Nachfolgend wird aus Konsistenzgründen die englische Schreibweise, „STOP“, anstatt der deutschen, „STOPP“, verwendet.

1. Einleitung

„Einen Hubschrauber in der Luft zu halten, ähnelt dem Versuch, auf einem Einrad sitzend einen Teller auf einem Besenstiel zu balancieren“ - so formulierte es der Sprecher einer Wissenschaftssendung auf Deutschlandfunk [9, 05:27 min]. Tatsächlich ist aber die Herausforderung den Hubschrauber „in der Luft zu halten“, d.h. das Koordinieren von vier Steuerachsen mit Händen und Füßen, sogar nur eine von vielen Teilaufgaben von Hubschrauberpiloten. Daneben gibt es noch viele weitere, wie etwa das Navigieren zu einem Ziel, dem Erkennen und Ausweichen von Hindernissen, auch bei schlechten Sichtverhältnissen sowie das korrekte Bedienen der vielen Subsysteme und das Einhalten der unterschiedlichen Betriebsgrenzen des sehr komplexen Gesamtsystems Hubschrauber. Darunter sind etwa Struktur- und Triebwerkslimits oder Flugbereichsgrenzen. Zudem können sich diese Grenzen während eines Fluges noch verändern, was ein Pilot wissen und antizipieren muss. Es ist leicht vorstellbar, dass diese Komplexität eine besondere Herausforderung für die Piloten darstellt. Diese wird noch dadurch verstärkt, wenn der Hubschrauber für Aufgaben eingesetzt wird, für die er besser als andere Transportmittel geeignet ist oder für die er wegen seiner Fähigkeiten sogar alternativlos ist: Dazu gehört, senkrecht zu starten und zu landen sowie auf der Stelle schweben zu können und darüber hinaus noch relativ schnell an Orte zu gelangen, die anders gar nicht oder nur schwer erreicht werden können. Darunter sind etwa Rettungseinsätze, bei denen die Piloten versuchen, so dicht wie möglich an schwer verletzte Personen zu gelangen, um ihnen schnellstmöglich die benötigte medizinische Hilfe zukommen zu lassen oder sie zu bergen. Dies geschieht sowohl in urbanem Gebiet, dicht neben größeren Hindernissen, etwa Gebäuden, aber auch kleineren Hindernissen, wie etwa Verkehrszeichen, Zäunen oder Leitungen, als auch im Gebirge, an zerklüfteten Hängen oder in verschneiten Schluchten. Eine besondere Anforderung stellen zudem militärische Einsätze dar, in denen Hubschrauberpiloten unter Feindeinwirkung und unter Zeitstress die unterschiedlichsten Aufgaben ausführen und dabei oft hindernis- und bodennah operieren. Zivile wie militärische Einsätze erfordern von den Piloten ein hohes Maß an Wachsamkeit und Übersicht, da sich hier viele Teilaufgaben aufsummieren können, die quasi gleichzeitig erkannt, priorisiert und korrekt bearbeitet werden müssen: Das Übersehen der einen Gefahr, etwa des Hindernisses, während man sich der anderen widmet, etwa dem Triebwerkslimit, kann katastrophale Folgen haben.

Tatsächlich nennen mehrere Sammelanalysen von Hubschrauberunfällen aus den vergangenen 20 Jahren immer wieder „Human Factors“ und „Perceptual Errors“ unter den Hauptursachen: Das (ehemalige) European Helicopter Safety Team (EHST) kommt für 311 analysierte Hubschrauberunfälle in den Mitgliedstaaten aus den Jahren 2000 bis 2005 zu dem Schluss, dass „Human Judgement and Actions“ darunter „Human Factors“, wie etwa „Diverted Attention and perceptual errors“, zu deutsch etwa „Ablenkung und Wahrnehmungsfehler“ für rund 70 % der Unfälle ursächlich waren

[10, S.20 ff.]. Auch in der nachfolgenden Analyse der EASA von insgesamt 824¹ Unfällen und Vorfällen der Jahre 2010 bis 2020 werden „*Perception and situational awareness*“ und „*Helicopter Obstacle See and Avoid*“ unter den Hauptursachen in allen zugeordneten Hubschrauber-kategorien, etwa kommerziell und nicht-kommerziell genutzt, identifiziert² [11, S.100 ff.]. Auch eine Untersuchung der US Army kommt zu dem Ergebnis, dass „Loss of Situational Awareness“ verantwortlich für 70 % der Unfälle während verschiedener Einsätze im Nahen Osten waren, vor allem in Form von Bodenberührungen bzw. Controlled Flight into Terrain (CFIT) bei schlechter Sicht, auch Degraded Visual Environment (DVE) genannt [12, S.1]. Explizit werden hier genannt: „*situations where power required exceeded power available*“ [12, S.8]. Jedoch werden die zur Verfügung stehende Leistung und deren Überschreitung auf einem Cockpitdisplay angezeigt. Die genannten Unfallursachen sind ein Indiz dafür, dass in manchen Situationen, wahrscheinlich mit hoher Arbeitsbelastung, relevante Zustandsinformationen und Warnungen durch die Piloten nicht mehr wahrgenommen werden. Dies geschieht möglicherweise, weil sie in Konkurrenz zu anderen Informationen oder Aufgaben stehen, etwa der Vermeidung einer Kollision mit Hindernissen in der unmittelbaren Hubschrauber-umgebung. Diese Annahme wird auch von Piloten geäußert, zusammen mit der Einschätzung, dass die Befreiung von der Notwendigkeit, bestimmte visuelle Anzeigen kontrollieren zu müssen, die Arbeitsbelastung senken sowie die erbrachten Leistungen verbessern würden [13, S. 1-3, 13].

Die Domänen der Flugregelung und Flugführung suchen seit jeher nach technischen Lösungen, um den Piloten bei der Arbeit zu unterstützen, die damit einhergehenden Risiken zu minimieren und damit letztlich auch das Einsatzspektrum auf jene Bereiche und Situationen auszudehnen, die vorher nicht handhabbar gewesen wären. Dies können z.B. Situationen wie das Fliegen bei Nacht oder schlechter Sicht sein. Zu den technischen Lösungen zählen etwa Systeme zur automatischen Stabilisierung des Hubschraubers oder zur automatischen Regelung von Triebwerken. Dazu zählt aber auch die Gestaltung des Man-Machine-Interface (MMI), dt. der Mensch-Maschine-Schnittstelle. Diese ermöglicht zum einen die Eingabe von Steuerkommandos vom Menschen an die Maschine. Zum anderen werden darüber Informationen über den Zustand der Maschine und der durch Sensoren erfassten Umwelt an den Menschen bereitgestellt. Klassischerweise erfolgt dies durch Sichtanzeigen, wie etwa dem Glascockpit in modernen fly-by-wire (fbw) Systemen, und auch durch Audiosignale. Mehr und mehr an Bedeutung für die Pilotenassistenz gewinnt aktuell das „*Tactile Cueing*“ mittels aktiver Steuerorgane und das so genannte „Carefree Maneuvering“. Eine der wichtigsten Anwendungen von *Tactile Cueing* im Hubschrauber ist die *Haptic Torque-Protection*, wie in der nachfolgenden Darstellung des Standes der Technik deutlich werden wird.

1.1. *Tactile Cueing* mit aktiven Steuerorganen im Luftfahrzeug

Tactile Cueing, manchmal auch „haptic Cueing“, bezeichnet die technische Nutzung des haptischen Sinneskanals des Menschen oder, vereinfacht gesagt, dessen Kraftwahrnehmung, für die Informa-

¹Addierte Tabellenwerte aus [11, S.88]

²In der in der Analyse verwendeten Taxonomie werden diese als Faktoren innerhalb so genannter „Key Risk Areas“, wie „*Aircraft Upset*“, „*Collision with Terrain*“, „*Obstacle Collision*“, neben weiteren Einflussfaktoren, wie „*System reliability*“ aufgeführt

tionsübermittlung. Für die genaue Begriffsdefinition siehe Abschnitt 2.1. Auch im Alltag taucht dieses Konzept auf, etwa in Form der Vibration des Smartphones, als Alarm oder Rückmeldung auf Eingaben, oder als „aktive“ Lenkunterstützung im Auto, etwa zur Spurhaltung. Eine etablierte Form des *Tactile Cueings* in der Luftfahrt domäne ist der „*Stickshaker*“, der in manchen fbw-Flugzeugen vor einem drohenden Strömungsabriss warnt. Dabei wird die von Flugzeugen mit direkter Steuerung am Steuer spürbare Oszillation, die bei beginnendem Ablösen der Flügelumströmung an der Steuerfläche natürlicherweise einsetzt, künstlich, aber für den Piloten intuitiv verständlich, nachgebildet [14, S. 20] in [15]. Darüber hinaus wird der Nutzen von erweiterten *Tactile Cues* zur Pilotenassistenz, also solcher, für die es keine natürliche Entsprechung gibt, seit längerem erforscht. So wurde zum Beispiel auch ein *Stickshaker* zur Signalisierung von Triebwerklimitüberschreitungen im Hubschrauber eingesetzt, weil diese ohne Hilfsmittel nicht fühlbar sind [16, S. 5]. Außerdem können am Körper des Piloten angebrachte „Taktoren“, etwa in Form taktiler Westen oder Gurte, dazu verwendet werden, Richtungen von Hindernissen zu kommunizieren [17], [18], [19, S.2]. Zwar können oben genannten Lösungen das Situationsbewusstsein des Piloten unterstützen, jedoch kann keine dieser Lösungen das versehentliche Überschreiten von Limits verhindern. Eine Möglichkeit, dies zu erreichen, wäre das automatische Begrenzen von Steuersignalen bei Erreichen von Limits. Jedoch beschneidet dies zum einen die Autorität des Piloten, der dann keine absichtliche Überschreitung mehr vornehmen kann und schränkt zudem das Situationsbewusstsein ein, da der Pilot keine Rückmeldung über das Abschneiden der Steuereingabe erhält. Eine Lösung dafür, die Vorteile der Automation nutzen zu können, ohne Autorität und Situationsbewusstsein abzugeben, liegt in der Verwendung von *Tactile Cueing* mittels aktiver Steuerorgane.

Ein aktives Steuerorgan unterscheidet sich von einem konventionellen oder passiven Steuerorgan dadurch, dass die Steuerkräfte mittels Aktuatoren „aktiv“ erzeugt werden. Über eine Schnittstelle können dessen Steuerkrafteigenschaften in Echtzeit gezielt moduliert werden und damit unterschiedliche räumliche und zeitliche Kraftverläufe erzeugt werden, siehe Abschnitt 2.2. Der wesentliche Unterschied und beabsichtigte Vorteil von *Tactile Cueing* mittels aktiver Steuer gegenüber anderen technischen Realisierungen liegt darin, dass das aktive Steuer sowohl Eingabe- als auch Anzeigegerät ist. Je nach Art und Intensität übermitteln die *Tactile Cues* damit nicht nur Informationen, sondern wirken mit ihrer Kraft auch auf das Steuer und den Piloten ein. Damit wird es auch möglich, den Piloten durch eine dosierte Gegenkraft am versehentlichen Überschreiten eines Limits zu hindern und zwar genau an der Steuerposition, die mit dem Limit korrespondiert. Wenn sich diese Kraft zudem so bemessen lässt, dass hingegen ein absichtliches Überschreiten möglich ist, behält der Pilot immer die Autorität. Auf diese Weise lassen sich also, insbesondere in fbw-Systemen, die Vorteile einer automatischen Begrenzung nutzen, ohne dass der Pilot an Autorität und Situationsbewusstsein einbüßen muss.

Über das Kraftniveau ließe sich dabei zudem die Dringlichkeit oder Relevanz des korrespondierenden Limits vorgeben. Welche Ausprägungen von *Tactile Cues* für welche Zwecke geeignet und welche Intensitäten erforderlich sind, ist noch weitgehend unerforscht und wird in dieser Arbeit adressiert, siehe Abschnitt 1.3.

Tactile Cueing im Kontext von Hubschrauberpilotenassistenzsystemen zur Vermeidung von Limitüberschreitungen schafft gegenüber der alleinigen visuellen Anzeige auch einen Zeitvorteil. Insbesondere die Kombination aus visuellem und *Tactile Cueing* erweist sich dabei als vorteilhaft, wie vom

WHALLEY, HINDSON ET AL. in einer Simulatorstudie gezeigt werden konnte [20, S.2 f.].³

Für das Prinzip *Tactile Cueing* im Luftfahrzeug nennt die Literatur bereits eine Vielzahl unterschiedlicher Anwendungen. Die Technologie wurde und wird auf verschiedenen Forschungshubschraubern erprobt und die ersten operativen Luftfahrzeuge werden bereits mit aktiven Steuerorganen für *Tactile Cueing* ausgerüstet. Der folgende Abschnitt fasst den State-of-the-Art aus Forschung und Industrie zusammen.

1.1.1. Anwendungen für aktive Steuerorgane im Luftfahrzeug

Die wissenschaftliche Literatur nennt eine große Anzahl von Anwendungen für *Tactile Cueing* zur Unterstützung bei der Vermeidung versehentlicher Überschreitungen von Limits, bzw. dem versehentlichen Verlassen von zulässigen Bereichen, eng. „limit protection“ oder „envelope protection“, aber auch zur Manöverunterstützung, siehe unten. Diese Funktionen wurden zur Prinzipdemonstration meist im Simulator demonstriert und teilweise auch in Simulationen, vereinzelt auch im Flugversuch evaluiert. Die meisten Funktionen kommen aus der Hubschrauberdomäne:

- *Torque Protection* und ihre Derivative für die Belastungs-, bzw. Leistungsgrenzen des Antriebsstrangs, eng. *Drivetrain Protection* oder *Engine Performance*. Darunter sind etwa die maximalen Drehmomente, eng. *Torque-Limits* unterschiedlicher Komponenten, aber auch die Triebwerkstemperatur- und Kompressor-drehzahl-grenzen, siehe auch Abschnitt 1.2 [13, S. 5 f.], [21], [22, S. 1590], [23, S. 671], [20, S. 1], [24], [25, S. 4], [26], [27], [28, S. 10], [29], [30, S. 8], [31, S. 13],⁴ [1],⁵ [32, S. 223-225],⁴ [2],⁴ [33],⁶ [34, S. 2-3], [35, S. 5], [36, S. 5], [37, S. 6], [38, S. 4], [39, S. 8], [40],⁷ [41],⁷ [42], [3],⁸
- *Rotordrehzahlbegrenzung*, eng. *Rotorspeed Protection* [13, S. 5 f.], [25, S. 4], [36, S. 5], [38, S. 4], [43, S. 43],
- *Sinkratenbegrenzung* und Derivate, etwa *Vortex-Ring-State Protection*, auch *Power Settling* und *Landing Descent Rate Limitation* [25, S. 4], [44], [36, S. 5], [37, S. 6], [38, S. 4],
- *Drift-Vermeidung*, bzw. Begrenzung der Lateral- und Rückwärtsgeschwindigkeit [13, S. 5 f.], [38, S. 7 f.],
- *Schiebewinkelbegrenzung* [38, S. 8],
- *Lastvielfachenbegrenzung* [13, S. 5 f.], [45], [30, S. 11], [36, S. 5], [38, S. 6],
- *Energy-Management* [36, S. 5], [38, S. 4 f.] und schließlich
- *Mastmomentenbegrenzung*, eng. *Mast-Moment-Protection* [45] und zur Reduktion unterschiedlicher Bauteillasten zur Lebensdauerverlängerung: Schlag-Dämpfung, *Flapping*- oder

³Die Reaktionszeit war mit *Tactile Cue* um etwa 0.2 s kürzer als bei einer rein visuellen Anzeige des *Torques*.

⁴Eigene Veröffentlichung zur *Haptic Torque-Protection*, Teil dieser Arbeit.

⁵Eigene Veröffentlichung zur *Haptic Torque-Protection*, Teil dieser Arbeit, Kapitel 5.

⁶Parallel zu den Untersuchungen des Autors.

⁷Eigene Folgeveröffentlichung zur *Haptic Torque-Protection*, nicht mehr Teil dieser Arbeit.

⁸Eigene Veröffentlichung zur *Haptic Torque-Protection*, Teil dieser Arbeit, Kapitel 7.

„Droop stop pounding“⁹ [36, S. 5], [38, S. 6-7].

Neben den *Tactile Cueing*-Funktionen für die Limit/Envelope Protection gibt es auch komplexere Anwendungen, welche die Führung des Hubschraubers zum Schutz vor äußeren Bedrohungen betreffen, etwa zum *Automatische Ausweichen bei Beschuss, Rocket Dive Mode* [36, S. 7] und für die Kollisionsvermeidung, eng. *Obstacle Avoidance* [28], [46], [36, S. 7], [47], [48], [49]. Außerdem wurden Funktionen genannt, welche man als Navigationsunterstützung zusammenfassen kann, etwa *Tactile Cues zur automatischen Formationshaltung* [36, S. 7], zur Höhenhaltung, eng. *Altitude Hold Detent* [36, S. 7] und für die Hängewinkelbegrenzung und, in Erweiterung davon, die adaptive, bzw. geschwindigkeitskompensierte Hängewinkelbegrenzung für *Standard Rate* oder *IFR-Turns* [45]. Neuere Anwendungen, die derzeit erforscht werden, liegen in der kooperativen Führung, eng. *shared control*, zukünftiger hochautomatisierter Hubschrauber, die – mit Sensorik und Automation ausgerüstet – in der Lage sein werden, selbstständig einen Pfad ins Ziel zu berechnen, diesem zu folgen und dabei Hindernissen auszuweichen. Dabei werden Modi erprobt, in denen der Hubschrauber meist automatisch navigiert und der Pilot am Stick nur noch höherwertige Kommandos gibt, etwa zur Auswahl alternativer Pfade oder der Ausweichrichtung. Dadurch, dass dabei Steuer gemäß der vom System kommandierten Eingaben nachgeführt werden, erfährt der Pilot stets die Intention der Maschine. Derzeit werden Prototypen implementiert, die auf dieser Basis das gemeinsame Aushandeln von Eingaben durch Variation der Steuerkräfte ermöglichen sollen: Dabei ist das System in der Lage, verschiedene Pfoptionen zu berechnen und die jeweils günstigste in Bezug auf eine Kostenfunktion auszuwählen, wie etwa das Kollisionsrisiko oder den Grad der Zielerreichung. Dies gibt dem Piloten die Möglichkeit, diese Auswahl zu beeinflussen. Dabei stellt das System die Schwierigkeit, bzw. das Risiko einer Änderung des eingeschlagenen Pfades durch Variation der dazu erforderlichen Steuerkräfte dar. Der Pilot kann so auf intuitive und unmittelbare Art seine Autorität variieren und das System durch Erhöhung der Kraft zum Auswählen eines potentiellen alternativen Pfades zwingen oder auch jederzeit durch weitere Erhöhung der Kraft vollständig die manuelle Kontrolle übernehmen [50, S. 10-13].

Neben dem *Tactile Cueing* zur Vermeidung von Limitüberschreitungen oder zur Führung, gibt es noch weitere Anwendungsmöglichkeiten für aktive Steuerorgane. So ist es damit auch möglich, die globalen Steuerkrafteigenschaften, eng. *Flight Control Mechanical Characteristics (FCMC)*, sozusagen auf Knopfdruck, bzw. instantan durch Kommandierung veränderter Konfigurationsparameter zu verändern. Dazu zählt etwa die Federsteifigkeit, der Bewegungswiderstand in Form von Dämpfung oder Reibung und die Trägheit, bzw. Masse des Sticks. So konnte bereits experimentell nachgewiesen werden, dass die Steuerkrafteigenschaften einen Einfluss auf die Flugeigenschaften des Hubschraubers haben und dass das Optimum von der Dynamik des Hubschrauber abhängt [51], [52, S. 139 f.], [53], [54], [55]. Mit aktiven Steuerorgane ist es theoretisch möglich, bei jedem Wechsel des Autopilotenmodus, auch während des Fluges, automatisch eine zugehörige, optimale FCMC-Einstellung zu wählen.

Weitere Forschungsarbeiten zur Verwendung aktiver Steuer im Hubschrauber und Flugzeugen betrachten die Möglichkeit der hybriden Kopplung von Piloten- und Kopilotensteuern mittels „elektronischer Stange“. Dabei können die Steuer wahlweise gekoppelt und entkoppelt werden.

⁹Diese Funktion soll verhindern, dass die Schlagbewegung der Rotorblätter so groß wird, dass sie an die Anschläge stoßen.

Dies vereint die Vorteile einer mechanischen Kopplung, bei welcher der Pilot Monitoring (PM), dt. der „überwachende Pilot“ und Pilot Flying (PF), dt. der „fliegende Pilot“ jeweils fühlen können, was der andere Pilot einsteuert, mit der Möglichkeit, sie in „*Force-Fight*“-Situationen manuell zu entkoppeln oder bei Erreichen einer maximal tolerierbaren Kraft sogar automatisch entkoppeln zu lassen. Bei einem „*Force-Fight*“ machen die Piloten gegenläufige Eingaben, die sich gegenseitig aufheben. Dadurch ist keiner der Piloten mehr in der Lage, den Hubschrauber sicher zu führen. Die bisherige Lösung besteht dann darin, dass sich die Piloten mittels festgelegter Sprechgruppen koordinieren. Es konnte gezeigt werden, dass die automatische Entkopplung bei „*Force-Fight*“ bei einem Steuereingriff des Fluglehrers in einer Ausbildungssituation schneller und sicherer ist als die mündliche Koordination [56, S.147 ff.].

Auch für Flächenflugzeuge wurde die Anwendbarkeit von *Tactile Cueing* untersucht. Dabei wurde z.B. das Konzept des „haptischen“ Flightdirectors entwickelt [57], wobei das aktive Steuer als Fehleranzeiger fungiert: Es bewegt sich in die Richtung der Abweichung von einer Solltrajektorie. Die Größe des Steuerausschlags ist proportional zur Abweichung. Um wieder auf den Pfad zurückzukommen, muss der Pilot das Steuer in die Mitte bewegen, bzw. dort halten. In einer anderen Forschungsarbeit wurde gezeigt, dass durch die haptische Anzeige der Steuerreserve das Situationsbewusstsein der Piloten erhöht werden kann [58]. Zudem konnte auch für Flächenflugzeuge der Nutzen koppelbarer Piloten- und Kopilotensteuer gezeigt werden [59].

1.1.2. Forschungsluftfahrzeuge und Prototypen mit aktiven Steuerorganen

Seit längerem werden aktive Steuerorgane in Forschungshubschraubern staatlicher, bzw. öffentlicher und staatlich-militärischer Forschungseinrichtungen und in Prototypen verschiedener Hersteller erprobt. Eine Übersicht von Forschungshubschraubern mit Eingriff in die Flugsteuerung, so genannte *Variable Stability Helicopter*, liefert [60] und über fbw-Programme [61]. In beiden werden Hubschrauber genannt, in die aktive Steuerorgane integriert wurden.

Das japanische „Advanced Technology Institute of Commuter helicopter“, ein Zusammenschluss der Regierung, Kawasaki Heavy Industries Ltd. (KHI) und anderen Unternehmen, hat einen Experimentalhubschrauber auf der Basis einer Kawasaki BK 117 B-2 mit einem fbw-System und aktiven Steuerorganen ausgerüstet. Diese sollten zur Steuerrückführung der Autopilotenkommandos und für *Tactile Cueing* genutzt werden [62, S. 5].¹⁰

Die US Army betreibt das „Rotorcraft Aircrew Systems Concepts Airborne Laboratory (RASCAL)“, einen Forschungshubschrauber auf der Basis eines UH-60 Transporthubschraubers, in das ein fbw-System und zwei aktive Steuerorgane integriert wurden. Daneben wurde auch mit dem Schwesterhubschrauber EH-60L eine Form von *Tactile Cueing* erprobt. Dieser verfügt zwar nicht über ein fbw-System, jedoch wurden hier die vorhandenen, konventionellen Trimm-Motoren beider Steuerhebel zur automatischen Bahnführung und Anflugführung des Hubschraubers durch einen Flugregler verfahren [63, S. 14-18], [64, S. 3-4].

¹⁰Es lassen sich jedoch keine Veröffentlichungen über den Einsatz dieses Forschungshubschraubers finden. Derweil befindet sich der ATIC in einem Museum in Japan (http://jmaps.ne.jp/sorahaku_new/det.html?data_id=1646).

Die kanadische Forschungseinrichtung NRC betreibt zwei Forschungshubschrauber mit aktiven Steuerorganen, eine Bell 205 und das Advanced Systems Research Aircraft (ASRA), eine Bell 412. Die Bell 205 war zunächst mit einem analog geregelten, aktiven Steuerkraftsystem ausgerüstet, das später mit einem digitalen, aktiven Steuerkraftsystem ersetzt wurde [65], [66], [67, S. 3], [68, S. 7]. Es wird die Erprobung einer *Haptic Torque-Protection* mit dem ASRA beschrieben, wofür die Mechanik zur Kollektivsteuerung um einen federgestützten Aktuator erweitert wurde [24].

Auch der vom Deutschen Zentrum für Luft- und Raumfahrt DLR betriebene Forschungshubschrauber Active Control Technology / Flying Helicopter Simulator (ACT/FHS) [69] und dessen zugehöriger bodengebundener Flugsimulator im Air Vehicle Simulator (AVES) [70] wurden mit aktiven Steuerorganen ausgerüstet,¹¹ siehe Abschnitt 3. In Ergänzung wurde später der „Dual Pilot Active Sidestick Demonstrator (2PASD)“ [72] für die Systementwicklung aufgebaut, der – namensgebend – ebenfalls mit aktiven Sidesticks ausgestattet wurde. Mit diesen Systemen wurden und werden im Rahmen verschiedener Forschungs-¹² und Promotionsvorhaben unterschiedliche Anwendungsmöglichkeiten aktiver Sidesticks im Zusammenspiel mit dem Gesamtsystem Hubschrauber untersucht und mittlerweile fast das gesamte oben genannte Anwendungsspektrum abgedeckt. Darunter sind die oben bereits genannten *Tactile Cueing*-Funktionen zur Sinkratenbegrenzung [44] und Obstacle Avoidance [47], [48], [49], Führungsfunktionen, wie der IFR-Turn-Assistent [45] und letztlich die in dieser Arbeit behandelte *Haptic Torque-Protection* [31, S. 13],¹³ [1],¹³ [2],¹³ [40],¹⁴ [41],¹⁴ [3],¹⁵. Des Weiteren gab es Untersuchungen zur FCMC [52, S. 139 f.], [53], [55]. Darüber hinaus wurde auch die elektronische Kopplung von Piloten- und Kopilotensteuer untersucht [56, S. 147 ff.] sowie auch die Möglichkeit, bei dem potentiellen Fehlerfall eines blockierten Steuerorgans durch Nutzung des Kraftsensordesigns am Griff des aktiven Steuerorgans sicher weiter fliegen zu können [77].

Im Rahmen von staatlich geförderten Entwicklungsprogrammen hat die Industrie die folgenden Hubschraubermuster mit aktiven Steuern für *Tactile Cueing* ausgerüstet. Die Technologie war ein integraler Bestandteil des von der US Regierung finanzierten und vom Konsortium der US Hersteller BOEING und SIKORSKY durchgeführten Entwicklungsprogramms für den Kampfhubschrauber RAH 66 „Comanche“. In dem dazugehörigen Programm „Helicopter Active Control Technology“ (HACT), für die Entwicklung eines neuartigen digitalen Steuerkonzepts mit hoher Reglerunterstützung sollten damit sogenannte „Carefree-Manoeuvring“-Eigenschaften realisiert werden. Dies ist eine Umschreibung der Systemeigenschaft, das versehentliche Überschreiten von Steuergrenzen

¹¹Mit Teilfinanzierung des damaligen Bundesamtes für Wehrtechnik und Beschaffung (BWB), heute Bundesamt für Ausrüstung und Informationswesen in der Bundeswehr (BAAINBW) [71]

¹²Projekte:

„Active control technologies for tilt-rotor (ACT-TILT)“, <https://cordis.europa.eu/project/id/G4RD-CT-2001-00608> [73];

„Assisted Low Level Flight and Landing on Unprepared Landing Sites (ALLFlight)“ [32];

„Assisted Low Level Flight using In-Flight Simulation capability (ALL-In-Flight)“ [74] - nicht öffentlich;

„ARISTO-KAT“ (DLR-Unterauftrag) [75];

„Ermittlung des Spektrums der taktilen Flugassistenzfunktionen für Hubschrauber und Implementierung eines haptischen Vokabulars (SiRaSKoF-H)“ [7];

„Sicherheitssystem zur Erweiterung des Situationsbewusstseins durch haptische Merkmale auf den Steuerorganen eines Hubschraubers (SISTEB)“ [76];

„Safe Landing and Takeoff in low Visibility for advanced Rescue Operations (SALVARE)“ (https://www.dlr.de/fl/desktopdefault.aspx/tabid-1149/1737_read66162/)

¹³Eigene (Vor-)Veröffentlichung zur *Haptic Torque-Protection*, Teil dieser Arbeit, Kapitel 5.

¹⁴Eigene Folgeveröffentlichung zur *Haptic Torque-Protection*, nicht mehr Teil dieser Arbeit.

¹⁵Eigene (Vor-)Veröffentlichung zur *Haptic Torque-Protection*, Teil dieser Arbeit, Kapitel 7.

oder Verlassen eines sicheren Flugzustands zu verhindern, so dass der Pilot sich nicht aktiv darum kümmern muss, sondern „sorgenfrei“ an der Erreichung seiner Missionsziele arbeiten kann. In diesem Zusammenhang wurden u.a. auch ein „*Vertical Flight Controller*“ entwickelt und erprobt, der für das Kollektivsteuer je ein *Tactile Cue* für die obere und untere Steuergrenze kombinierte. Diese wurden jeweils von dem aktuell restriktivsten aus einer ganzen Reihe von Limits angesteuert. Darunter waren unterschiedliche Triebwerksgrößen, wie „Torque“ und „Temperatur“ sowie Zustände, wie „Rotor-Overspeed“ und „Power-Settling“, bzw. „Vortex-Ring-State“ [25, S. 4]. Die Entwicklung des Hubschraubers war bereits weit vorangeschritten, bevor das Programm von der Regierung aus Gründen einer strategischen Neuausrichtung gestoppt wurde [78] in [79]. Stattdessen wurde als Ziel angegeben, in die Erneuerung der bestehenden Flotte zu investieren. Dazu finanzierte die US Regierung das Forschungs- und Entwicklungsprogramm „*Adaptive Vehicle Management System*“ (AVMS). Darin rüstete BOEING die existierenden Hubschrauber, H-6, AH-64E „*Apache*“ und CH-47G „*Chinook*“ testweise, neben anderer Technologie, auch mit aktiven Steuerorganen für *Tactile Cueing*-Funktionen aus und erprobte diese im Flug [33, S.12 ff.], [36, S.1 ff.], [38, S.1 ff.], [37].

1.1.3. Serienluftfahrzeuge mit aktiven Steuerorganen

Die ersten operativen Hubschrauber werden zum Zeitpunkt der Veröffentlichung dieser Arbeit serienmäßig mit aktiven Steuerorganen zur Generierung ausgewählter *Tactile Cues* ausgerüstet. Darunter ist die oben genannte CH-47. Diese erhält in der Variante CH-47F Block II das so genannte Active Parallel Actuation System (APAS). Dabei handelt es sich um Aktuatoren, die in das mechanische Steuergestänge integriert werden und in der Lage sind *Tactile Cues* zur Limit-Einhaltung zu generieren [80, S. 18-19].

Der schwere militärische Transporthubschrauber *CH-53* von *Sikorsky* wird in der Version *CH-53K* mit einem fbw-System und aktiven Steuerorganen ausgerüstet [81, S. 1], [82, S. 18], [83, Abs. 21-22], [39, S. 1], [84, S. 4]. Dabei wird rechts ein aktiver Sidestick für die zyklische Steuerfunktion und links ein aktiver Kollektivhebel verwendet. Die Steuer von Pilot und Kopilot sind elektronisch koppelbar [84, S. 4]. Diesem Schritt waren Systemerprobungen auf dem RASCAL-Forschungshubschrauber der US-Army [85], [30, S. 1] und dem ASRA Forschungshubschrauber des kanadischen National Research Council, Canada (NRC) vorausgegangen [84, S. 1].

Auch für den mittelschweren militärischen Militärtransporter UH-60 gab es zumindest Pläne, diesen in der Variante UH-60M und dem UH-60M Upgrade mit einer fbw-Avionik und in diesem Zuge auch mit aktiven Steuern auszurüsten [81, S. 1], [86, S. 60-61]. Dazu wurden vorab Untersuchungen mit dem Forschungshubschrauber RASCAL der US Army durchgeführt [87], [85].

Als einzige komplette Neuentwicklung eines zivilen Hubschraubers, der *Tactile Cueing* nutzt, ist die zivile *Bell 525* - „*relentless*“ zu nennen. Dort werden *Tactile Cues* zur Vermeidung der Überschreitung von Triebwerkslimits und die automatische Nachführung der Steuer als Anwendungsfälle genannt [34, S. 2-3], [35, S. 5]. Hier werden jeweils aktive Sidesticks für die linke und rechte Hand in Verbindung mit fbw verwendet. Die Steuer von Pilot und Kopilot sind jedoch permanent mechanisch gekoppelt.

Zwar kein Hubschrauber, aber dennoch eine Neuentwicklung eines senkrecht start- und landefähigen so genannten Kippprotorflugzeugs, ist die zivile AW609, vormals BA609. Auch dieses wird mit einem System ausgerüstet, mit dem *Tactile Cues* dargestellt werden können [88], [43, S. 45], [42]. Für das *Tactile Cueing* wird hier die elektromechanische Trimmung genutzt.

Neben Hubschraubern, kommen aktive Steuerorgane auch in anderen Luftfahrzeugen zum Einsatz: Der koreanische Kampfflugzeugtrainer T-50 beinhaltet ein aktives Steuer [81, S. 1].¹⁶ Der senkrecht start- und landefähige Kampffjet F-35 Joint-Strike-Fighter (JSF) wird mit zwei aktiven Steuerorganen gesteuert, einem aktiven, linear bewegter Schubhebel, eng. „*throttle*“ und einem aktiver Sidestick [81, S. 1]. Die Businessjets *Gulfstream 500* und *600* und der Militärtransporter *Embraer KC 390* erhalten aktive Steuerorgane. Dies erfolgte, damit sich die Steuer von Pilot und Kopilot koppeln lassen und für das *Tactile Cueing* von Enveloppengrenzen [89], [90]. Der neuentwickelte russische Passagierjet *Irkut 21* sollte ebenfalls mit aktiven Steuerorganen gesteuert werden [91].

Die große Zahl der in vielen staatlichen und industriellen Forschungsprogrammen erprobten Funktionen und die Tatsache, dass die ersten Luftfahrzeuge serienmäßig mit aktiven Steuern ausgerüstet werden, zeigt das hohe Potential aktiver Steuerorgane und die hohen Erwartungen an diese Technologie durch Hersteller, staatliche Behörden und zukünftige Betreiber.

1.2. Haptic Torque-Protection

Gegenstand dieser Arbeit ist die *Haptic Torque-Protection*. Nachfolgend wird zunächst deren Zweck und Intention und die grundsätzliche Funktionsweise erläutert und dann der Stand der Wissenschaft wieder gegeben. Eine *Haptic Torque-Protection* soll die versehentliche Überschreitung des Torques verhindern. Der *Torque*, dt. „Drehmoment“ oder „Verwindungsmoment“, ist ein Maß für die Leistung und damit Belastung des Antriebsstrangs. Dieser beinhaltet die gesamte Kette von der Leistungsgenerierung in den Triebwerken bis zu den Leistungsabnehmern, im wesentlichen dem Haupt- und dem Heckrotor des Hubschraubers, einschließlich des Getriebes und aller Wellen, wie etwa des Rotormasts. Den größten Anteil hat der Hauptrotor, welcher die Kräfte Auftrieb und Vorschub des Hubschraubers generiert. Ein Torsionsmoment erzeugt etwa Torsionsspannungen in den Wellen und Flankenpressung, Abbau des Schmierfilms, Überhitzung und Abrieb in den Getriebestufen. Wenn diese zu hoch werden, können die Bauteile versagen, etwa durch plastische Verformung oder Bruch. Um dies zu vermeiden, definiert der Hersteller Belastungslimits für die unterschiedlichen Komponenten. Das dem Piloten angezeigte Torquelimit wird dabei letztlich durch das schwächste Glied der Kette definiert. Dieses kann je nach Hubschraubertyp unterschiedlich sein. Dabei ist es wichtig zu wissen, dass sich grundsätzlich mehr Leistung durch den Piloten kommandieren und vom Triebwerk erzeugen lässt, als der Antriebsstrang, ohne Schaden zu nehmen, „verkräften“ kann. Daher werden dem Piloten die aktuellen, relevanten Antriebszustandsgrößen und ihre Belastungsgrenzen im Cockpit angezeigt, normalerweise visuell, siehe Abschnitt 3.3. Neben den Torquelimits, gibt es noch weitere limitierte Kenngrößen, wie etwa die Triebwerkstemperatur oder die Kompressordrehzahl. Die Höhe des Torques hängt von der Konfiguration des Hubschraubers, wie Masse und Flugzustand, und den Steuereingaben ab. Den wesentlichen Einfluss hat dabei das

¹⁶Über die implementierten Funktionen liegen keine Informationen vor

Kollektivsteuer. Die *Haptic Torque-Protection* hat die Aufgabe durch eine Modulation der Kräfte am Hebel zur Kollektivsteuerung des Hubschraubers ungewollte Überschreitungen definierter Limits und damit eine Überlastung von Komponenten des Antriebsstrangs zu verhindern.

1.2.1. Relevanz von Torquelimitüberschreitungen

Die versehentliche Überschreitung des zulässigen *Torques* gehört zu den häufigsten Vorkommnissen im Flugdienst, wie eine Untersuchung bei einem großen deutschen Betreiber von Hubschraubern im Bereich *Polizei, Transport und Ausbildung* zeigt [4, S. 5]. Dabei wurden die Vorkommnisse der Jahre 2007 bis 2011 stichprobenartig ausgewertet und gegenübergestellt.

Eine Torqueüberschreitung führt, wie oben erwähnt, nicht in jedem Fall automatisch und unmittelbar zu einem Ausfall des Triebwerks, zieht jedoch wegen der hohen Sicherheitsanforderungen in der Luftfahrt Inspektionen nach sich und erfordert nötigenfalls den Austausch überbeanspruchter Komponenten. Dies erzeugt hohe Kosten, die laut einer Untersuchung der US Army in den Jahren 2001 bis 2003 pro Fall zwischen 34.000 \$ und 140.000 \$ lagen, bei 9 bis 10 Überschreitungen pro Jahr, zusätzlich zu anderen Limit Überschreitungen. Diese wurden zu 80 % von der Flotte der damals 3000 „attack and scout“ Hubschrauber der US Army hervorgerufen [92, S.4]. Diese Kosten erscheinen im Verhältnis zu den wahrscheinlich sehr viel höheren Gesamtbetriebskosten solch einer Hubschrauberflotte eher gering, dennoch ist natürlich besser, wenn sie gar nicht anfallen. Viel wichtiger als die Kosten dürfte aber gerade während militärischer Missionen mit begrenzten Ressourcen wahrscheinlich sein, dass der Hubschrauber während der Reparaturzeit nicht eingesetzt werden kann.

Piloteneinschätzung

Bereits 1988 zeigte sich in einer gemeinsam von Westland Helicopter und Royal Aerospace Establishment (RAE) Bedford durchgeführten Pilotenbefragung zur Einschätzung des Potentials unterschiedlicher Assistenzfunktionen, dass dreiviertel der 70 befragten Piloten das Monitoring der Torqueanzeigen als größten Anteil an der Workload befanden, bzw. die Befreiung von dieser Aufgabe den größten workloadreduzierenden Effekt hätte [13, S.21 - 13-14] zitiert in [21].

Dieser Annahme entsprechend schätzen Piloten die Relevanz des Torquelimits und an Unterstützungsfunktionen zu dessen Einhaltung hoch ein: Bei dem oben genannten großen deutschen Betreiber von Hubschraubern wurden in der gleichen Studie zehn dort arbeitende Hubschrauberpiloten danach befragt, wie wünschenswert sie unterschiedliche, in einer Liste dargelegte haptische Assistenzfunktionen finden. Die *Haptic Torque-Protection* wurde als am wünschenswertesten befunden, mit 9 von 10 Punkten. Dabei sei angemerkt, dass keiner der befragten Piloten zum Zeitpunkt der Befragung bereits praktische Erfahrung mit *Tactile Cueing* im Hubschrauber gehabt hatte [4, S.10].

Auch der US amerikanische Hubschrauberhersteller Boeing bewertete in einer internen Studie

zur Auswahl relevanter Technologien und Funktionen, aktive Steuerorgane, Carefree-Handling und konkret die Einhaltung von Triebwerkbetriebsbereichsgrenzen unter die relevantesten zehn [33, S. 6].

Die genannten Daten zeigen den Bedarf an technischer Unterstützung zur Einhaltung der zulässigen Antriebslimits. Diese darf jedoch nicht in einer automatischen, nicht übersteuerbaren Limitierung durch einen Regler bestehen. So wird das Konzept „direct intervention - no over-ride“ durch die Hubschrauberpiloten in der Umfrage von Westland und des RAE auch durchweg als „unpopulär“ bewertet [13, S.21 - 4, 21-14]. Das ist verständlich, da es Notsituationen gibt, in denen der Pilot die Option haben muss, Limits zu überschreiten, um unmittelbares, größeres Unheil, etwa eine Kollision, abzuwenden. Unter diesen Umständen kann nämlich das Risiko einer Beschädigung des Antriebsstrangs und der Erforderlichkeit einer sofortigen oder baldigen Landung das geringere Problem sein. Durch eine *Haptic Torque-Protection* mit einem aktiven Steuerorgan, lassen sich diese Anforderungen verknüpfen: Das *Tactile Cue* zeigt dabei unmissverständlich an, bis zu welcher Position der Pilot das Steuer maximal bewegen darf, um unterhalb oder genau am Limit zu bleiben und verhindert das versehentliche Übersteuern, aber lässt die bewusste Überschreitung, auf intuitive Art mittels höherer Steuerkräfte, oder kräftigerem „Ziehen“ zu. Diese Anforderung wird gestützt durch die o.g. Westland-RAE-Studie, in der die Piloten dem Konzept „direct intervention - with over-ride“ ein hohes Wirksamkeitspotential zuordnen.

Den State-of-the-Art der *Haptic Torque-Protection*, ihr Potential und letztlich die offenen Fragen und ungelösten Probleme, die zur wissenschaftlichen Fragestellung dieser Arbeit führen, werden im nächsten Abschnitt aufgezeigt.

1.2.2. Stand der Wissenschaft *Haptic Torque-Protection*

Wie oben bereits ausgeführt wurde, wurde das Prinzip der *Haptic Torque-Protection* bereits an mehreren Stellen in der Simulation und in Versuchshubschraubern untersucht. Sie wurde darüber hinaus zur Anwendung in operationellen Hubschraubermustern angekündigt. Auch am DLR sollte diese Funktion für den Forschungshubschrauber ACT/FHS zur Demonstration und zur Beantwortung offener wissenschaftlicher Fragestellungen ausgelegt und implementiert werden. An dieser Stelle wird der Stand-der-Wissenschaft aus Untersuchungen der Wirksamkeit einer *Haptic Torque-Protection*, samt benannter Probleme und offener Fragen dargelegt. Auf frühere technische Umsetzungen wird im Abschnitt 4 näher eingegangen.

MASSEY UND WELLS beschrieben schon 1988 *Tactile Cueing* für so genanntes „Carefree Handling“ für Hubschrauber und erprobten dies in Kombination mit anderen Technologien, darunter visuelle und auditive Cues, mit sechs Piloten im Simulator [13, S. 5 f.]. Dabei gab es Konfigurationen mit *Tactile Cues* und solche ohne, jedoch keine mit ausschließlich *Tactile Cues*. Diese wurden miteinander verglichen. In den Konfigurationen wurden die unterschiedlichen Modalitäten dazu genutzt, vor der Überschreitung unterschiedlicher Limits, wie Torque, Rotorspeed, Lateralgeschwindigkeit und Lastvielfachen zu warnen, oder diese durch automatischen Steuereingriff, eng. „direct Intervention“ sogar zu verhindern. Je nach Konfiguration wurden dazu auch unterschiedlichen Formen von *Tactile Cues*, sowohl am Centerstick also auch am Kollektivhebel, verwendet. Zur reinen Warnungen vor

drohenden Überschreitungen wurden *Stickshaker* verwandt. Bei direktem Reglereingriff wurde zur Information des Piloten das Steuer durch Gegenkräfte oder Verschiebung des Endanschlags, eng. *Hardstop* informiert. Zudem wurde ein neuer Regler-Modus getestet, bei dem Kollektivhebel zur Vorgabe des Torquesollwerts verwendet wurde. Per *Softstop* und Federgradient wurde in Verbindung damit der Bereich oberhalb des Torque Limits abgegrenzt. Die *Tactile Cues* werden nicht detaillierter beschrieben. Die Untersuchung kam in Bezug auf das *Tactile Cueing* auf die folgenden Ergebnisse: Die Konfigurationen mit *Tactile Cueing* waren am effektivsten in Bezug auf die Reduktion der Pilotenarbeitsbelastung und Einhaltung der Limits. Für die *Torque-Protection* werden allerdings keine quantitativen Bewertungsergebnisse aufgeführt. Zudem hätten die warnenden *Tactile Cues*, wie auch die auditiven, die Notwendigkeit reduziert, kontinuierlich auf die Anzeigen zu schauen. Diese Aussage wurde jedoch nicht objektiviert, bzw. mit Messdaten hinterlegt. Allerdings wurde die Befürchtung geäußert, dass der *Stickshaker* störend sein könnte oder, ganz im Gegenteil, wegen der Vibration im Cockpit eines realen Hubschraubers gar nicht spürbar sein könnte. Die Konfiguration „direct intervention“ wurde am besten bewertet, da die Piloten hier nicht selbst die korrigierenden Eingaben, eng. „corrective actions“ machen mussten. Jedoch wurde angemerkt, dass sie damit aggressiver steuern würden und daher insbesondere für ein „Carefree Handling“ eine sehr hohe Systemzuverlässigkeit erforderlich sei. Insgesamt wurde geschlussfolgert, dass *Tactile Cueing* für Warnungen das größte Potential hätte, weil sie am wenigsten Interpretation durch die Piloten bedurften [13, S. 7-10].

HOWITT wies in einer Simulatorstudie mit vier Piloten anhand zweier Manöver nach, dass mit einem *Softstop* am Kollektivsteuer, in Verbindung mit einem Regelungssystem, die unwillentlichen Torque-Überschreitungen und die Arbeitsbelastung der Piloten reduziert werden kann. Sie begründen die Reduktion der Arbeitsbelastung damit, dass die Piloten mit dem *Tactile Cue* die Cockpitinstrumente nicht mehr (visuell) zu überwachen brauchten [21].

WHALLEY UND ACHACHE haben mehrere Assistenzfunktionen für unterschiedliche Hubschrauberlimits in zwei Simulatorstudien mit insgesamt sieben Piloten evaluiert. Diese beinhaltete ein *Tactile Cue* zur Torque-Begrenzung. In den Studien wurde gezeigt, dass *Tactile Cueing* zu einer Verbesserung der subjektiven Flugeigenschaftsbewertungen und kürzeren Manöverzeiten führte. Im Vergleich mit anderen, visuellen oder auditiven, Darstellungen, war die Reaktionszeit mit *Tactile Cueing* um bis zu 200 ms kürzer. Die Piloten wünschten sich, dass idealerweise eine mit dem *Tactile Cue* konsistente, erläuternde und bestätigende Information auf einer weiteren Modalität erfolgt, damit man die durch das *Tactile Cue* veränderte Steuerkraft nicht etwa für einen Hydraulikfehler hält. Zudem wurde ausdrücklich empfohlen, zu prüfen, in welchen Phasen, bzw. unter welchen Bedingungen das *Tactile Cue* deaktiviert werden muss, um die Flugsicherheit nicht zu gefährden [22, S. 1592-1594 und 1597].

BATEMAN, WARD ET AL. beschreiben den Systementwurf einer *Haptic Torque-Protection* und deren Untersuchung in zwei Studien in unterschiedlichen Simulatoren, mit vermutlich elf¹⁷ Piloten. Die *Haptic Torque-Protection* wurde in Kombination mit anderen *Tactile Cues* und visuellen Cues untersucht [23]. Dabei bewerteten die Piloten die Arbeitsbelastung¹⁸ von Konfigurationen mit *Tactile*

¹⁷Die Anzahl der Piloten in der zweiten Studie wird nicht explizit genannt, aber in den Ergebnissen werden Kommentare der Piloten A-H benannt. Die Versuchsbeschreibung lässt darauf schließen, dass es sich bei der zweiten Teilstudie in [23] um die dieselbe Studie handelt, wie in [20]

¹⁸in Form von Handling Qualities Rating (HQR)

Cueing besser als von denen ohne. Die dargestellten Pilotenkommentare waren durchweg positiv in Bezug auf das *Tactile Cueing*. Dabei wurden die gute Wahrnehmbarkeit von Überschreitungen und das Vertrauen in die Zuverlässigkeit wiederholt genannt [23, S. 669-672].

WHALLEY, HINDSON UND THIERS beschreiben weitere, nun quantitative Ergebnisse der zweiten der oben genannten Teilstudien.¹⁷ Mit *Tactile Cueing* wurde gegenüber dem Referenzfall die Zeit bis zum Erreichen des Limits signifikant reduziert, die Überschreitungen reduziert und die Verweildauer am Limit, eng. *dwelt time*, erhöht. Das *Tactile Cue* ermöglichte den Piloten am Limit zu bleiben, während sie aggressive Manöver durchführten und dabei, laut subjektiver Aussagen, dem System vertrauten und die „Aufmerksamkeit“ außerhalb des Cockpits fokussieren konnten [20, S. 24].

AUGUSTIN, DREIER ET AL. beschreiben ein *Tactile Cueing*-System für den ASRA-Forschungshubschrauber (Bell-412) und dessen Erprobung mit drei unterschiedlichen Flugmanövern und drei Testpiloten im Realflug. Dazu wurde ein Aktuator in das Steuergestänge integriert. Der Grad der Überschreitungen konnte damit reduziert werden, aber es kam bei aggressiven Steuereingaben noch zu Überschreitungen, weil die Piloten das *Tactile Cue* dann nicht (rechtzeitig) gespürt hatten. Es war den Piloten dann jedoch möglich, die erfolgte Überschreitung durch das *Tactile Cue* zu fühlen und das Kollektiv zum Beenden der Überschreitung wieder nach unten zu bewegen. Die Piloten bewerteten das System rein subjektiv, ohne Erfassung der Pilotenarbeitsbelastung. Sie gaben an, dass sie mit *Tactile Cue* mehr nach draußen schauen konnten, „*more opportunity to have 'eyes-out'*“ und dass eine Überarbeitung der *Tactile Cueing*-Kräfte erforderlich sei [24, S. 6-7].

SAHASRABUDHE, SPAULDING ET AL. haben ein *Tactile Cueing* System für die Kollektivachse in einer Simulatorstudie mit acht Piloten untersucht. Auch dabei zeigte sich, dass sowohl die Pilotenarbeitsbelastung als auch die Dauer der durchgeführten Manöver mit dem *Tactile Cue* signifikant reduziert werden konnten. Zudem gaben sie an, dass das *Tactile Cueing* den Piloten ermöglichte, auch während eines simulierten Triebwerksfehlers den visuellen Fokus draußen zu halten [27, S. 1].

Im Rahmen des Helicopter Active Control Technology (HACT) Programms haben EINTHOVEN UND MILLER ein Carefree-Manoeuvring System mit *Tactile Cues* am Kollektivhebel, bzw. „*Verical Controller*“ entwickelt und im Simulator evaluiert. Dabei fehlt die Angabe über die Anzahl an Probanden. Sie geben jedoch an, dass das System vielversprechend sei in Bezug auf die Einhaltung unterschiedlicher Limits, u.a. Torque und dass die Pilotenarbeitsbelastung „*dramatisch*“ reduziert sei, weil die Pilotenaufgabe beim Fliegen am Limit auf eine Steuereingabe, nämlich den Stick an das Limit zu ziehen, reduziert worden sei [25, S. 4].

SAHANI UND HORN haben verschiedene Ansätze für die Berechnung der *Tactile Cueing*-Position am Kollektivhebel vorgestellt und verglichen [26], siehe auch Abschnitt 3.

BELL, KING ET AL. beschreiben ein System für Carefree Maneuvering mit *Tactile Cues* unter anderem für Engine Limits des neu entwickelten Kipprotorflugzeugs AW609/BA609 und geben an, die Pilotenarbeitsbelastung sei damit reduziert worden. Dabei werden weder Information über die Methode noch über die Anzahl der Piloten geliefert [29], auch nicht in den dort zitierten Quellen [93], [94] und [95].

GREENFIELD, KUBIK ET AL. haben zur Vorerprobung von Funktionen für ein Upgrade des CH-53K

Hubschraubers mit dem Forschungshubschrauber RASCAL unter anderem auch eine *Haptic Torque-Protection* bzw. „*Power Limit Cueing*“ implementiert und die Funktion technisch erprobt und optimiert. Dabei haben die Piloten die Genauigkeit und die *Tactile Cues* und Kräfte kommentiert, siehe auch Abschnitt 5.1 [30, S. 8-10].

SUNG, BOTHWELL UND FORTENBAUGH und HOELSCHER UND BOTHWELL beschreiben die Cockpit-funktionen des neu entwickelten fly-by-wire Hubschraubers Bell-525. Dieser verfügt auch über aktive Steuerorgane, mit denen u.a. auch eine *Haptic Torque-Protection*, bzw. „*Engine Performance Limit Protection*“ umgesetzt wurde. Auch hier wurde das Ziel benannt, die maximale Leistung des Hubschraubers nutzen zu können, während der visuelle Fokus nach draußen gerichtet ist [34, S. 2-3], bzw. das Situationsbewusstsein für die Triebwerkslimits zu erhöhen [35, S. 5].

Die jüngsten Untersuchungsergebnisse zu *Tactile Cueing*, die parallel zu dieser Arbeit veröffentlicht wurden, stammen von der Firma BOEING, die im Rahmen des schon genannten Advanced Vehicle Management System (AVMS)-Programms gleich mehrere verschiedene *Tactile Cueing*-Funktionen auf unterschiedlichen Modifikationen der Hubschrauber H-6, AH-64E (Apache), und MH-47G (Chinook) demonstriert und untersucht hatten. Darunter sind mehrere antriebsstrangbezogene *Tactile Cueing*-Funktionen, wie etwa für das *Transmission Torque* und *Engine Performance Limits*, neben weiteren, wie dem *Energy Management* und *Overspeed Limits* [38, S. 3]. Bei der Bewertung ergaben sich im Mittel über alle getesteten Manöver und Funktionen Reduktionen der Arbeitsbelastung von 20 % (Simulator) bis 30 % (Flug) für die MH-47G und 30 % für die AH-64 (Flug) [38, S. 12]. Diese Veröffentlichung bleibt jedoch vage in Bezug auf die Methode. Zwar beschreibt sie die getesteten Funktionen und Manöver, aber sie sagt nichts über die Größe der Stichprobe, bzw. die Anzahl der Probanden und der Wiederholungen. Die Berücksichtigung subjektiver Pilotenbewertungen zielte vor allem auf die Erfassung unbeabsichtigter „Nebenwirkungen“ ab. Lediglich die Untersuchung der *Tactile Cueing*-Funktionen für die AH-64E wurde noch einmal gesondert und ausführlicher behandelt. Darin wird nach den einzelnen *Tactile Cueing*-Funktionen differenziert. Für die *Torque-Protection*, bzw. *Engine-Limits* zeigte sich dabei eine Verringerung der Arbeitsbelastung von ca. 3-8 % für ein *Vertical Maneuver*, je nach Konfiguration der ebenfalls in jener Studie untersuchten Flugregler [37, S. 9]. Ganz konkret wird gesagt, dass die Technologie an der Schwelle zur Produktion sei, aber dass es nun noch weiterer Studien zu Pilotenpräferenzen und benötigten Kräften von *Tactile Cues* und zur Ermittlung der Performance und Systemspezifikation bedürfe [36, S. 16] sowie zur Unterscheidbarkeit zwischen verschiedenen *Tactile Cues* [33, S. 22].

Zusammenfassend lässt sich auch den oben genannten Arbeiten schließen, dass sich mit einer *Haptic Torque-Protection* die Arbeitsbelastung der Piloten reduzieren und damit die subjektiven Flugeigenschaftsbewertungen verbessern lassen. Die Rezeption der Funktion durch Piloten, d.h. die wiedergegebenen Pilotenkommentare waren durchweg positiv. Die angewandten objektiven Metriken zeigten ebenfalls durchgehend Verbesserungen durch eine *Haptic Torque-Protection*. Dies betraf z.B. neben der Präzision der Limiteinhaltung und -nutzung auch die Reduktion der Dauer der durchgeführten Versuchsmanöver. Jedoch benennen nicht alle Quellen die verwendeten Forschungsmethoden.

Wiederholt wurde auch beschrieben, dass mit einer *Haptic Torque-Protection* die Ressourcen visueller Aufmerksamkeit nach außerhalb des Cockpits verlagert wurden, siehe oben: Dadurch, dass der Pilot am aktiven Steuern spüren konnte, wo das Limit ist, musste er weniger auf die Anzeigen

schauen und konnte mehr die Umgebung des Hubschraubers betrachten. In manchen Quellen wird dies jedoch nur als Ziel der Funktion angegeben, in anderen als subjektive Beobachtung der Piloten beschrieben. In keiner der genannten Quellen wurde dies systematisch untersucht und quantifiziert.

In Gesprächen mit Herstellern und potentiellen Anwendern aktiver Steuerorgane wurde gelegentlich die Vermutung geäußert, dass die maximal aufbringbaren Kräfte der, auch von ihnen selbst angebotenen, aktiven Steuerorgane viel höher sein dürften als tatsächlich benötigt. Dabei bestand Unklarheit darüber, welche Kräfte behördlich für eine Zulassung als Primärsteuer in einem Luftfahrzeug gefordert seien. Grundsätzlich sei es anzustreben, das geforderte Kraftvermögen zu minimieren. Damit könnten auch die erforderliche Motorleistung und damit einhergehend die Motorengröße und damit der Größe und des Gewichts aktiver Steuerorgane reduziert werden, was die Integrierbarkeit dieser Technologie in Luftfahrzeugcockpits vereinfachen dürfte. Wenn die Steuerkräfte minimiert werden können, hätte dies nicht nur Auswirkungen auf den Leistungsbedarf, sondern auch auf die Sicherheit: Aus anderen Untersuchungen ist bekannt, dass es bei einem plötzlichen Einbrechen der Motorkraft, etwa bei einem Ausfall des Sidestick-Motors, zu unbeabsichtigten Steuereingaben kommen kann [96]. Die Höhe dieser Überschreitungen ist dabei um so höher, je mehr Kraft der Pilot im Moment des Fehlers gerade aufgebracht hat. Es hat also einen Sicherheitsvorteil, wenn die Piloten grundsätzlich möglichst niedrige Kräfte am *Tactile Cue* aufwenden.

In manchen der o.g. Quellen werden die verwendeten *Tactile Cueing*-Formen und Kräfte beschrieben oder illustriert, wobei meist nicht deutlich wird, ob und wie diese ermittelt oder optimiert worden sind. Dabei gibt es vereinzelt Aussagen darüber, ob diese zu intensiv waren oder zu schwach, siehe Abschnitt 2.3. Die SAE, ein internationaler Verband, der sich mit der Standardisierung und Normierung beschäftigt, nennt in ihrer *Aerospace Recommended Practice* mit dem Titel *Aerospace Active Inceptor Systems for Aircraft Flight and Engine Controls* (SAE-ARP 5764) zwar „typische“, eng. „typical“, Maximalkräfte aktiver Steuerorgane [97]. Es fehlen jedoch auf systematischen Untersuchungen basierende Regeln für die Auswahl von *Tactile Cue*-Formen und Kräften zur Anwendung mit aktiven Steuerorganen. Die Ermittlung geeigneter *Tactile Cue*-Formen und benötigter Steuerkräfte wurde als eines von vielen Zielen für die Integration aktiver Steuerorgane bereits in der Entwicklungsphase des ACT/FHS genannt [69, S. 12]. Ein Ansatz für die Entwicklung einer haptischen Sprache in Verbindung mit körpergetragenen Taktoren für die Übermittlung taktischer Informationen für Infanteristen wird in [98] vorgestellt.

Sehr häufig wurde in den genannten Quellen für die *Haptic Torque-Protection* ein so genannter *Softstop* als *Tactile Cue* genutzt. Das ist ein lokaler, räumlich begrenzter, der globalen Kraft-Weg-Kennlinie überlagerter Kraftgradient, der als Kraftschwelle spürbar wird, die sich überschreiten lässt, bzw. lassen sollte, siehe Abschnitt 2.2. Dies steht exemplarisch für eine Kernfunktion von *Tactile Cueing* zur Vermeidung versehentlicher Überschreitungen von Limits, bei gleichzeitiger Möglichkeit zur absichtlichen Überschreitung. Die Kraftschwelle muss dazu so hoch gesetzt werden, dass eine versehentliche Überschreitung unwahrscheinlich ist, dabei aber so niedrig sein, dass die absichtliche Überschreitung immer möglich ist. Auch wurden mit einer Ausnahme nur Funktionen zur Einhaltung der maximalen Betriebsgrenze untersucht. Dafür passte der *Softstop*. Es ist noch nicht bekannt, wie andere Informationen, bzw. Intentionen, z.B. Warnungen, Betriebsbereiche etc. in eine haptische Formen, bzw. *Tactile Cue* übersetzt werden sollten. Die genannten Quellen

enthalten nur vereinzelte Aussagen darüber, ob die im Zusammenhang mit der Erprobung des Prinzips *Tactile Cueing* genutzten Kraftschwellen zu hoch oder zu niedrig waren. Es fehlt an dieser Stelle klare Standards oder Regeln für gute *Tactile Cues*, sowohl die Form, als auch die Ausprägung betreffend. Nur wenn dies bekannt ist, lassen sich optimale, d.h. maßgeschneiderte technische Lösungen erzeugen, welche die beabsichtigte Wirkung in Form von verständlichen und wirksamer Pilotenunterstützung bei minimalem Gewicht, Bauraum und Energieaufwand ermöglichen.

1.3. Wissenschaftliche Fragestellungen

Die in der Einleitung beschriebenen Probleme münden in die folgenden wissenschaftlichen Fragestellungen:

1. *Wie wirkt sich Tactile Cueing am Kollektivsteuer eines Hubschraubers zur Vermeidung einer unwillentlichen Überschreitung des Triebwerk-Drehmomenten-Limits und zur Information über den genutzten Arbeitsbereich, eng. Haptic Torque-Protection, auf die **Präzision**, d.h. auf die Einhaltung des Limits und die Ausschöpfung des zur Verfügung stehenden Torques aus?*

Die notwendige Bedingung für den Einsatz einer *Tactile Cueing*-Funktion zur Limiteinhaltung ist deren Wirksamkeit zur Einhaltung von Grenzen und die bessere Nutzung der vorhandenen Systemleistung.

2. *Welchen Einfluss hat eine Haptic Torque-Protection auf die **Arbeitsbelastung** von Piloten?*
Eine weitere Anforderung an ein System zur *Haptic Torque-Protection* ist dessen Nützlichkeit. Da das System in der Mensch-Maschine-Schnittstelle angesiedelt ist, ist dessen Auswirkung auf die Pilotenarbeitsbelastung von hoher Relevanz.
3. *Welchen Einfluss hat eine Haptic Torque-Protection auf die Verteilung der **visuellen Aufmerksamkeit** von Piloten?*

Wenn es mittels *Tactile Cueing* gelänge, visuelle Ressourcen, welche sonst durch die Überwachung visueller Anzeigen gebunden sind, freizugeben, um etwa das Umfeld des Hubschraubers gründlicher erfassen zu können, stellte dies einen realen Vorteil der Technologie gegenüber rein visuellen Anzeigen dar. Die Überprüfung und Quantifizierung dieser Annahme hat damit eine Relevanz für die Entscheidung zur Verwendung von aktiven Steuerorganen und *Tactile Cueing*.

4. *Welche **Kräfte** bringen Piloten bei der Interaktion mit Tactile Cues auf?*
Für die Dimensionierung von *Tactile Cues* zur Vermeidung unbeabsichtigter Limitüberschreitungen soll bestimmt werden, welche Kräfte Piloten bei der Interaktion mit dem *Tactile Cue* aufbringen.
5. *Wie ist die **Pilotenakzeptanz**? Welche **Ausprägungen** von Tactile Cues erweisen sich als nützlich?*

Neben den oben genannten quantitativen Kriterien zielt diese Frage darauf ab, die subjektive

Pilotenbewertung zu erfassen. Dabei soll zunächst untersucht werden, wie die Piloten einer *Haptic Torque-Protection* allgemein gegenüberstehen. Darüber hinaus soll erfasst werden, welche *Tactile Cueing*-Formen für die gegebene Aufgabe geeignet sind. Häufig wird in der Literatur der *Softstop* aufgeführt. Hier soll untersucht werden, welche alternativen Ausprägungen von *Tactile Cues* sich eignen und welche Anforderungen an diese bestehen.

1.4. Abgrenzung und Einschränkungen

In der Einleitung wurde ein breites Spektrum an Ausführungsbeispielen für die Verwendung von *Tactile Cueing* im Hubschrauber benannt. In dieser Arbeit wird *Haptic Torque-Protection* am aktiven Sidesticks zur Kollektivsteuerung untersucht. Dabei ergeben sich die folgenden Einschränkungen: Das Übertragungsverhalten einer Kollektivsteuereingabe auf das Antriebsdrehmoment, bzw. den Torque, kann als „quasi-proportional“ betrachtet werden. Das bedeutet, dass sich auf eine Kollektivsteuereingabe ein „quasi-stationärer“ Torque-Wert einstellt. Quasi-stationär bedeutet, dass dieser nur für den aktuellen Gesamtzustand des Systems gilt. Da ein veränderter Torque sich aber auf das Gesamtgleichgewicht auswirkt, also andere Zustände, z.B. die Steigrate, Höhe und die Geschwindigkeit beeinflussen kann, kann sich dieser Trimmwert kontinuierlich oder dynamisch verändern, siehe Abschnitt 4.4. Daher spricht man auch von „dynamic trim“ [99, S. 3]. Umgekehrt bedeutet dies, dass es genau eine mit dem Torque-Limit korrespondierende Steuerposition gibt, bis zu der die Steuer bewegt werden kann, ohne das Limit zu überschreiten. Dies ist insofern wichtig zu erwähnen, weil es andere Limits, bzw. Zustandsgrößen gibt, welche ein anderes Übertragungsverhalten auf Steuereingaben haben. So kann ein Zustand auch von der Stellrate beeinflusst werden, d.h. von der Geschwindigkeit, mit welcher der Pilot die Steuer bewegt wird. Man spricht dann von einem differentiellen Übertragungsverhalten. Ist der betrachtete Zustand von der Dauer und Höhe des Stellauschlags abhängig, spricht man von einem integralen Übertragungsverhalten. Ein differentielles Übertragungsverhalten besteht zum Beispiel bei der Reaktion des Hubschrauber-Mastmoments auf Eingaben an die zyklische Steuer. Da die Stellrate nur kurzzeitig bestehen kann, ergibt sich ein transientes Maximum, engl. „transient peak“ [99, S. 3]. Außerdem gibt es Mischformen aus „transient peak“ und „dynamic trim“, wie etwa auch beim Torque, welcher Hubschraubertypenabhängig auch zum Überschwingen neigen kann. Anders als beim proportionalen Limit, wo sich eine quasi ortsfixe Position des limitierenden *Tactile Cues* ergibt, erfordern transiente und integrale Limits eine Beeinflussung der Bewegung der Steuer. Neben der Kollektivsteuerung hat auch die Giersteuer Einfluss auf den Torque, siehe Abschnitt 4.4. Dessen Einfluss wird zwar in der hier entwickelten *Haptic Torque-Protection* berücksichtigt, es erfolgt aber keine Untersuchung von *Tactile Cueing* für die Giersteuer.

Für die Untersuchungen werden der ACT/FHS und die zugehörigen Simulatoren genutzt. Diese sind mit aktiven Sidesticks ausgerüstet, siehe Abschnitte 2.2 und 3. Gegenüber konventionellen Hubschrauber-Steuerorganen, d.h. Centerstick und Kollektivhebel, haben Sidesticks eine geringere Hebelarmlänge. Die Hebelarmlänge hat, zusammen mit der Größe des Steuerwinkelbereichs, Einfluss auf den effektiven Steuerweg und damit auf die Stellsensitivität. Zudem sind die Sidesticks jeweils rechts und links seitlich des Piloten angeordnet. Damit ergibt sich zumindest für die zyklische Steuerung, bzw. das mit der rechten Hand geführte Steuer, auch eine ergonomische Veränderung.

Der ergonomische Unterschied zwischen linkem Sidestick und Kollektivhebel dürfte hier hingegen gering sein, da sich konventionell der Kollektivhebel sowie links seitlich des Piloten befindet. Hier ist der linke Sidestick zudem nach vorne geneigt, so dass der Bewegungsraum in etwa dem eines Kollektivhebels entsprach.

1.5. Methode und Aufbau der Arbeit

Die Beantwortung der oben genannten Fragestellungen erfolgt experimentell. Dazu wird eine *Haptic Torque-Protection* ausgelegt und in den Experimentalhubschrauber und die zugehörigen Simulatoren implementiert, wo sie durch Piloten anhand standardisierter Testverfahren erprobt wird. Das *Tactile Cue*-Design erfolgt dabei in Anlehnung an die Norm „ISO 9241-210 - 2020-03 Ergonomie der Mensch-System-Interaktion - Teil 210: Menschzentrierte Gestaltung interaktiver Systeme / Human-centered design for interactive systems“ [100]. Dies beinhaltet die Einbindung der Zielgruppe, hier Hubschrauberpiloten in den Design- und Evaluationsprozess sowie ein iteratives Vorgehen mit mehreren, hier drei, Entwicklungszyklen, siehe Abbildung 1.1. Dabei werden unterschiedliche qualitative und quantitative Daten zur Beantwortung der oben genannten wissenschaftlichen Fragestellung erhoben und ausgewertet, siehe unten. Daraus ergibt sich der folgende Aufbau der Arbeit, der auch in Abbildung 1.2 illustriert wird.

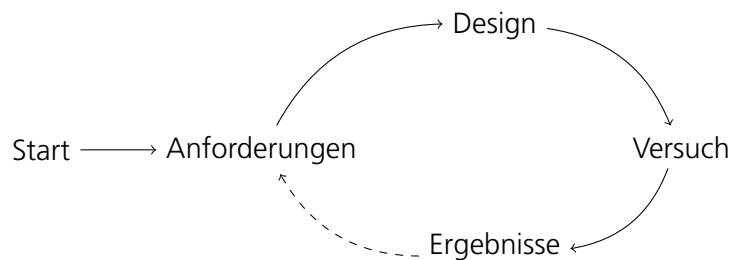


Abbildung 1.1.: **Entwicklungszyklus**

In der *Einleitung* wird zunächst die Problemstellung dargelegt und der beabsichtigte Nutzen einer *Haptic Torque-Protection*. Danach werden der Stand der Technik von Pilotenunterstützung durch aktive Steuerorgane allgemein und zur *Haptic Torque-Protection* im Speziellen aufgezeigt und daraus die Motivation und die wissenschaftlichen Fragestellungen dieser Arbeit abgeleitet.

Im Kapitel *Grundlagen und Erläuterungen* werden vertiefende Details aus dem State-of-the-Art aufgelistet, die für die Systemauslegung und Interpretation benötigt werden. Dazu gehören etwa Begriffsdefinitionen, die Funktionsweise von aktiven Sidesticks und *Tactile Cueing* sowie typische Formen und bisher genutzte Kraftwerte von *Tactile Cues*.

Im Kapitel *Versuchsumgebung ACT/FHS mit aktiven Sidesticks und Simulator* wird die in den nachfolgend beschriebenen Studien verwendete Versuchsinfrastruktur dargestellt. Die Torque-Limits des ACT/FHS und die dort verwendete, serienmäßige visuelle Anzeige für die Triebwerkszustände First-Limit-Indicator (FLI) dienen als Grundlage für die Auslegung und als Referenz für die nachfolgende

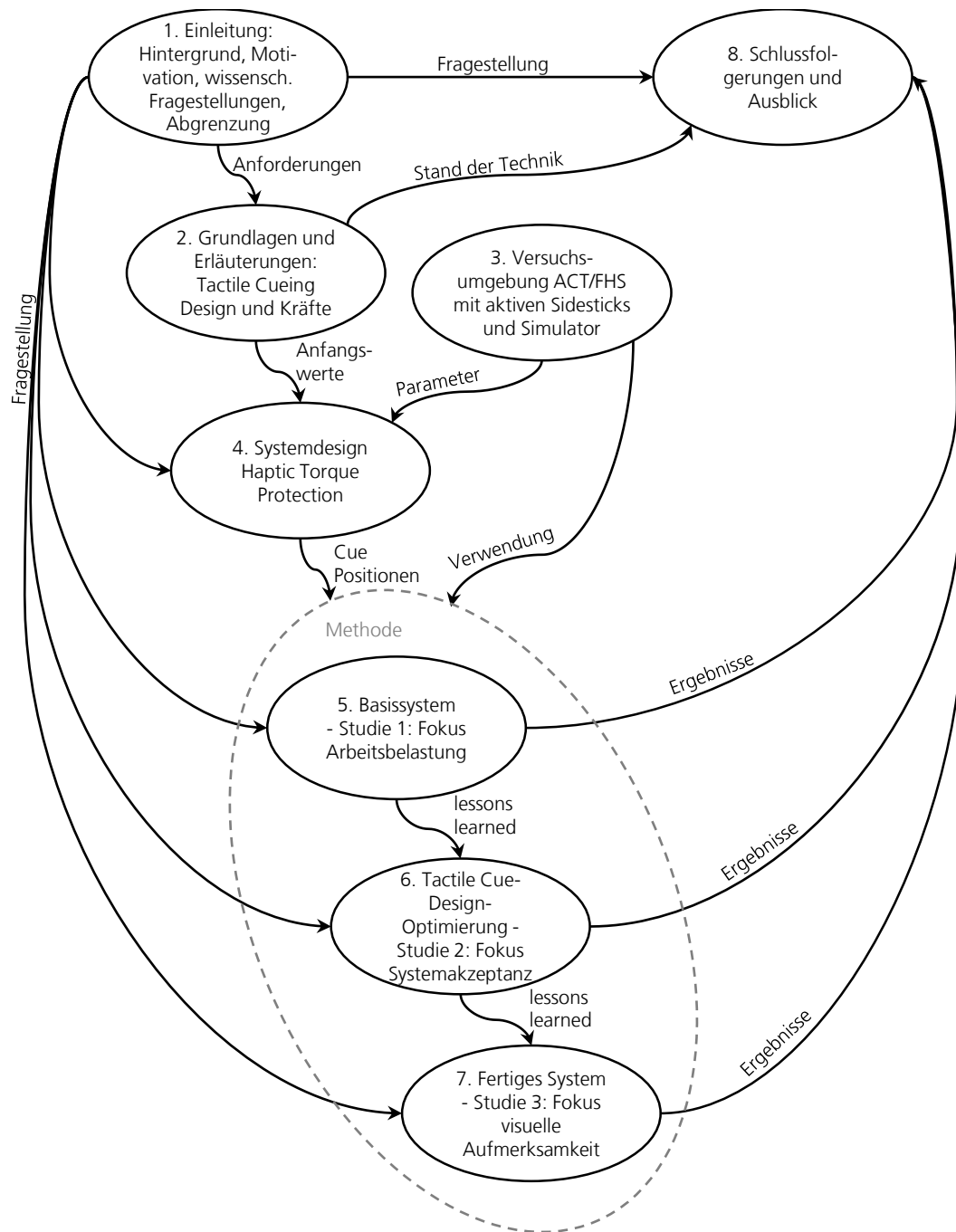


Abbildung 1.2.: Struktur dieser Arbeit – Kapitel im Zusammenhang

Evaluation der *Haptic Torque-Protection*. Deshalb werden sie dort detailliert beschrieben.

Das Kapitel *Systemdesign Haptic Torque-Protection* stellt die zunächst die Anforderungen und den daraus abgeleiteten Systementwurf, bzw. der Struktur der *Haptic Torque-Protection* dar. Danach wird die Umsetzung des Basissystems dokumentiert, welches zur Auswahl der für den aktuellen Flugzustand relevanten Torque-Limits und der Bestimmung der mit den diesen Limits korrespondierenden, nicht zu überschreitenden Steuerposition als Referenzwert für die *Tactile Cues* dient.

Die *Methode* erstreckt sich über drei nacheinander erfolgte experimentelle *Studien*, die als Flugversuche, vorwiegend im Simulator und in einem Fall auch im ACT/FHS, durchgeführt werden. Dabei werden subjektive und objektive Daten erhoben und ausgewertet. Jede Studie hat einen anderen Schwerpunkt, wobei manche Fragen in mehreren Studien behandelt werden und manche Studie mehrere Fragen behandeln. Das *Tactile Cue-Design* wird von Studie zu Studie iterativ optimiert, siehe oben und Abbildung 1.1. Die Tabelle 1.1 gibt einen Überblick über die durchgeführten Studien, samt erhobener Daten, zusammen mit den durchgeführten Manövern und Teilnehmerzahlen. Manche der Metriken wurden zu Vergleichszwecken wiederholt verwendet. Jede der Studien wird in sich vollständig beschrieben, von der Beschreibung und Herleitung des Designs, über die Evaluationsmethode, samt verwendeter Verfahren, Versuchsaufbau, Manöverbeschreibung bis zur Auswertung und Ergebnisdarstellung.

Tabelle 1.1.: **Versuchsmatrix und Methodenübersicht**

Studie	Manöver	Prototyp	Piloten	WL ¹	Kräfte	Akzept.	Blickbew.
1	a) Whiteout-Escape	1	4	x	x		
	b) Fog-Departure	1	4	x	x		
2	Freies Fliegen	2	11			x	
3	Small-Arms-Takeoff	3	3	x	x	x	x

¹ WL: Workload/Arbeitsbelastung

Der Schwerpunkt von *Basissystem - Studie 1: Fokus Funktionsnachweis und Arbeitsbelastung* liegt neben dem Nachweis der Wirksamkeit des Basissystems in der Bestimmung des Einflusses der *Haptic Torque-Protection* auf die Piloten-Arbeitsbelastung. Auch die von den Piloten aufgewandten Kräfte werden ermittelt. In *Tactile Cue-Design-Optimierung - Studie 2: Fokus Systemakzeptanz* wird eine Akzeptanzstudie und Optimierung von *Tactile Cues* aus Pilotensicht vorgenommen. In *Finales System - Studie 3: Fokus visuelle Aufmerksamkeit* wird die *Haptic Torque-Protection* zusammen mit der hier finalen Version des *Tactile Cue-Design* evaluiert. Der Schwerpunkt liegt dabei in der Ermittlung des Einflusses einer *Haptic Torque-Protection* auf die visuelle Aufmerksamkeit.

Schließlich werden im Kapitel *Schlussfolgerungen und Ausblick* die ausgewählten Teilergebnisse der Studien zur Beantwortung der in der *Einleitung* aufgestellten wissenschaftlichen Fragestellung herangezogen und diskutiert. Ausblickend werden die Übertragbarkeit und deren Grenzen der gefundenen Antworten auf andere Anwendungen diskutiert und daraus folgende Anschlussfragen für zukünftige Forschungsarbeiten aufgestellt.

2. Grundlagen und Erläuterungen

An dieser Stelle werden weitere Grundlagen geliefert, die für das Verständnis der nachfolgenden Untersuchung erforderlich sind und welche in der Einleitung zugunsten einer kompakten Hinführung zum Thema nur oberflächlich benannt wurden.

2.1. Begriffsdefinitionen „Tactile Cueing“ und „Haptic“

In der Literatur zur Mensch-Maschine-Interaktion werden die Begriffe *taktile*, eng. *tactile*, und *haptisch*, eng. *haptic* verwendet. In der Rezeption kommt es mitunter zu Unsicherheiten darüber, welcher der Begriffe der Richtige sei. Die EUROPÄISCHE NORM ZUR ERGONOMIE DER MENSCH-SYSTEM-INTERAKTION, TEIL 910: RAHMEN FÜR DIE TAKTILE UND HAPTISCHE INTERAKTION [101, S. 8] erläutert die Begriffe folgender Maßen: Die *haptische Wahrnehmung* betrifft die „*sensorische und/oder motorische Aktivität, die in der Haut, in den Muskeln, Gelenken und Sehnen begründet ist*“. Sie umfasst damit die „*taktile*“ oder „*kutane*“, d.h. Haut-Wahrnehmung und die „*kinästhetische*“ Wahrnehmung oder auch „*Propriozeption*“, d.h. die Eigenwahrnehmung des Bewegungs- und Stützapparates. Die „*taktile*“ Wahrnehmung ist sensibel für mechanische, thermische, chemische und elektrische Stimulation. Die „*kinästhetische*“ Wahrnehmung ermöglicht die Erfassung von Kräften, Position und Lage von Objekten im Raum, und damit im zeitlichen Verlauf auch deren Beweglichkeit. Aus der Relation von Kraft und Position, wird auch mittelbar deren Nachgiebigkeit erfassbar. Wann immer der Mensch sich oder etwas bewegt, „erfasst“ er meist unbewusst diese haptischen Reize und nutzt sie zusammen mit anderen „Eindrücken“ zur Orientierung: Beim Stehen und Gehen, beim Tasten im Dunkeln, beim Hemdknöpfe schließen, Zähneputzen, Türen öffnen, Essen und Trinken usw. - quasi immer ist die haptische Wahrnehmung beteiligt. Dabei lernt der Mensch die haptischen Eigenschaften seiner Umwelt unbewusst zu nutzen, unabhängig davon, ob diese inhärent oder technisch gewollt sind. Inhärent oder natürlicher sind etwa die Oberflächenbeschaffenheit, die Temperatur und das Gewicht des gegriffenen Trinkglases, oder die Form eines Hemdknopfes. Wenn diese künstlich oder mit einer Intention erzeugt werden, so spricht man von *Tactile Cues*.

Das englische Wort „*cue*“ bedeutet „*Stichwort, Signal, Hinweis*“ [102] und kann im übertragenen Sinne auch als „*Hinweisreiz*“ interpretiert werden. *Haptic* oder *Tactile Cueing* bezeichnet damit das gezielte Ansprechen der haptischen Wahrnehmung zur Informationsübermittlung. Dabei werden die natürlichen oder inhärente Beschaffenheit von Objekten verändert um eine beabsichtigte Wirkung zu erzielen. Neben den oben bereits erwähnten Ausführungsbeispielen, die allesamt aktives *Tactile Cueing* beschrieben, also Aktuatoren benötigen, gibt es auch passive *Tactile Cues*: Die kleinen

Erhebungen auf den Tasten F und J der Computertastatur oder die Blindenschrift sind nur einige Beispiele technischer Realisierungen von passiven *Tactile Cues* aus dem Alltag, die es ermöglichen, ohne hinzuschauen ein Gerät bedienen oder Informationen übermitteln oder erfassen zu können.

Die „*taktile*“ Wahrnehmung ist somit streng genommen eine Form der „*haptischen*“ Wahrnehmung. Die o.g. Norm gibt jedoch an, dass diese Begriffe häufig synonym gebraucht werden. Auch der Literatur zur (Hubschrauber-) Pilotenassistenz findet man den Begriff „*Haptic Cueing*“ als auch „*Tactile Cueing*“ im synonymen Gebrauch. Daher werden auch in dieser Arbeit die Begriffe „haptisch“ und „taktil“ nicht streng nach Definition genutzt, sondern in folgender Weise standardisiert:

- „*Tactile Cueing*“ beschreibt hier das Prinzip, im Sinn von „taktilen Informieren“,
- „*Tactile Cue*“ bezeichnet hier ein konkretes Kraft- oder Reizmuster,
- „*Haptic*“ wird hier im Zusammenhang mit der konkreten Applikation genutzt: „*Haptic Torque-Protection*“.

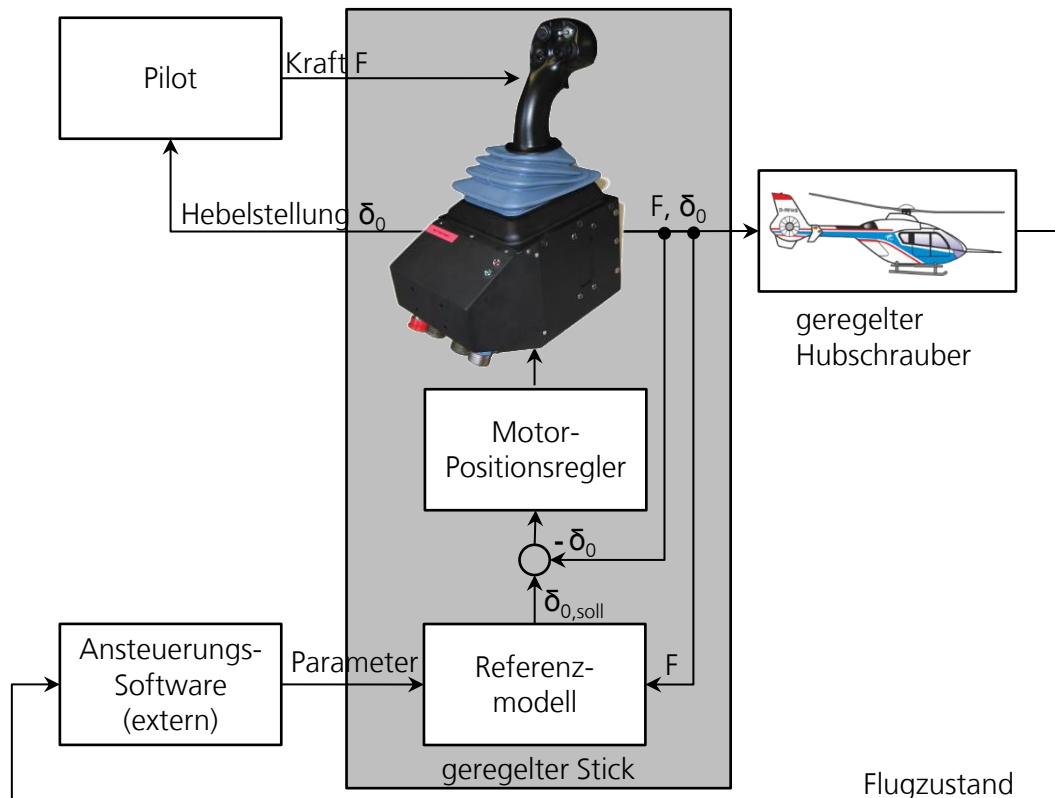
Zur Nutzung von *Tactile Cueing*, bzw. dem Erzeugen von *Tactile Cues* sind entsprechende Geräte erforderlich. Eine ausführliche, allgemeine Übersicht über Theorie und Technik haptischer Geräte, die nicht auf aktive Steuerorgane beschränkt ist, geben KERN ET. AL in ENGINEERING HAPTIC DEVICES [103]. Hier soll es jedoch weiter nur um aktive Steuerorgane gehen.

2.2. Aktive Steuerorgane und *Tactile Cues*

Die SAE-ARP 5764 definiert aktive Steuerorgane wie folgt [97]:

„An active control inceptor uses high bandwidth actuation to generate the primary control forces felt by the pilot and thereby provide augmented control. This augmentation may include tactile pilot cues in real-time, such as variable spring gradients, force breakouts, detents, ramps, gates and soft stops, to warn of mode engagements or impending operating or envelope exceedances. (...)“

Eine Übersicht über die Anfänge und historische Entwicklung aktiver Steuerorgane gibt TICHY [104]. So wurde das Prinzip aktiver Steuerorgane bereits im Jahr 1967 durch HERZOG erfunden [105] in [104, S. 18]. TICHY beschreibt auch bereits die technische Realisierung eines aktiven Steuerorgans. In den oben einleitend genannten Forschungsarbeiten wurden meist so genannten Steuerkraftsysteme, eng. Control Loading System (CLS) genutzt. Diese entsprechen im Grunde aktiven Steuerorganen, kommen jedoch aus der Simulationstechnik, wo sie zur originalgetreuen Simulation der Steuerkräfte des simulierten Flugzeugmusters eingesetzt werden. Auch diese besitzen bereits die Fähigkeit, die Steuerkräfte im Betrieb gezielt zu verändern, wodurch *Tactile Cue* möglich wird. Allerdings wurden diese noch nicht für die Verwendung in fliegendem Gerät mit den entsprechenden Zuverlässigkeitsanforderungen entwickelt. Die Entwicklung flugtauglicher aktiver Steuerorgane begann laut TAYLOR, GREENFIELD UND SAHASRABUDHE Anfang der 2000er Jahre [81, S. 3].

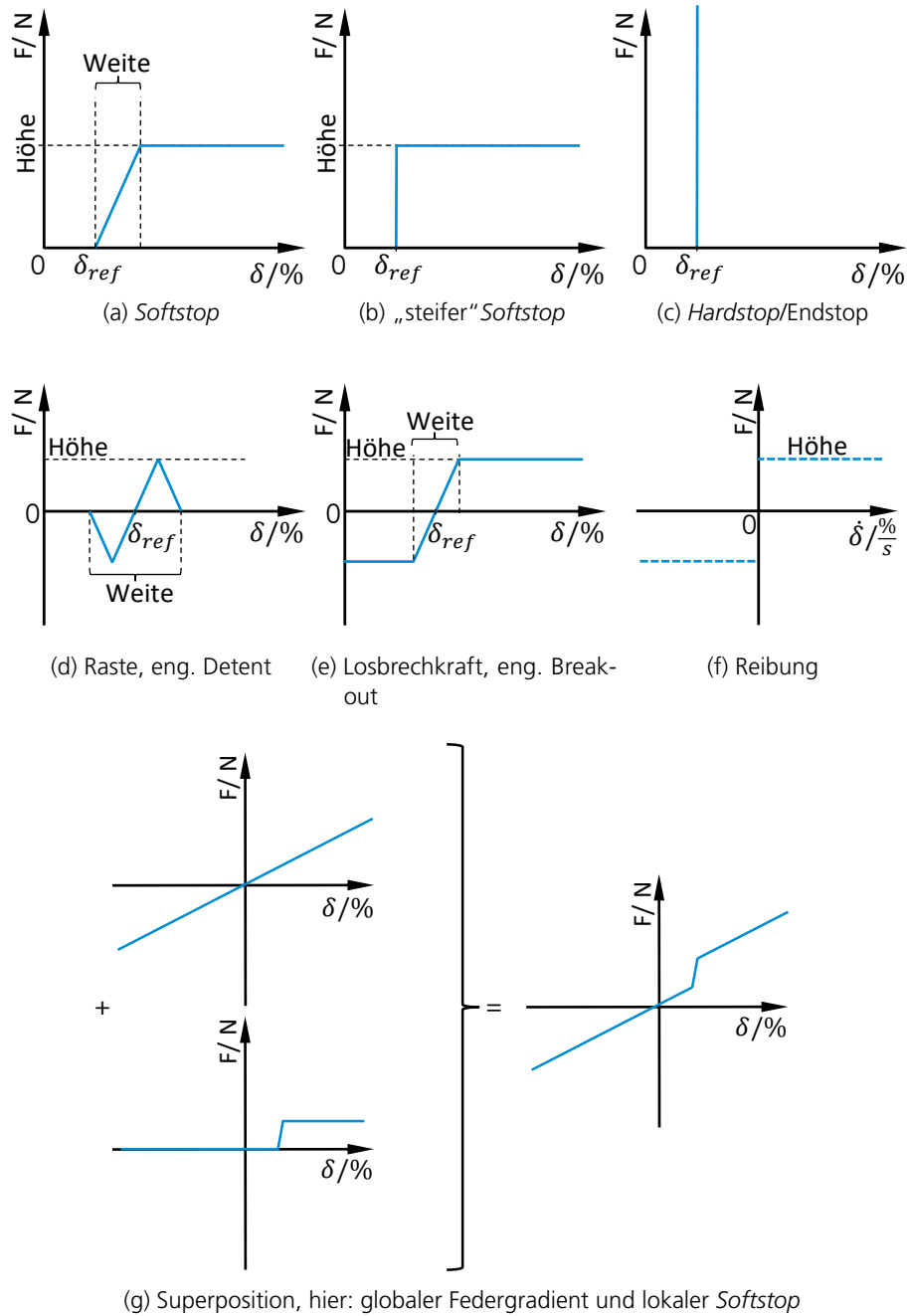

Abbildung 2.1.: **Prinzip der Sidestick Modellfolgeregelung**

Ebendort wird auch die Funktionsweise von aktiven Steuerorganen übersichtlich dargestellt. Die Steuerkräfte werden durch Servoaktuatoren generiert. Dies sind zumeist Elektromotoren. Die Regelung stellt den beabsichtigten Zusammenhang zwischen Kraft und Position her, siehe nächster Absatz. Für die Regelung verfügt der Stick über Positions- und Kraftsensoren. Das Positionssignal dient als primäres Steuersignal für den Hubschrauber. Alternativ lässt sich auch das Kraft-Signal zur Steuerung nutzen, z.B. im Fehlerfall [77]. Über einen Datenbus erfolgt der Datenaustausch mit der Hubschrauber-Regelung, eng. Flight Control System (FCS). Dieses sendet die Mess-Signale und Daten zum Betriebszustand an das FCS und empfängt die Konfigurationsdaten für die interne Regelung. Die Regelung besteht üblicherweise aus dem Referenzmodell und einer nachgeschalteten Motorregelung, siehe Abbildung 2.1. Die Motoregelung ist hier als Positionsregelung dargestellt. Es ist aber auch möglich, die Kraft des Referenzmodells als Führungsgröße für die Motorregelung zu nutzen. In der dargestellten Realisierung wird das Referenzmodell mit dem gemessenen Kraftsignal beaufschlagt. Dieses berechnet basierend auf seiner Struktur und seiner aktuellen Parameterkonfiguration fortwährend die Sollzustände Position und Geschwindigkeit des Sticks, welche als Führungsgrößen der Motorregelung dienen. Sowohl Referenzmodell als auch die Motorregelung müssen mit einer ausreichend hohen Taktrate ausgeführt werden, damit für den Piloten der Eindruck einer kontinuierlichen Bewegung entsteht. Dabei ist zu berücksichtigen, dass die Wahrnehmung des Menschen für taktile Reize bis in den kHz-Bereich geht und ihr Optimum im Bereich einiger hundert Hertz hat KERN ET AL. [103, S. 56]. Wenn die Konfigurationsparameter über die Nutzerschnittstelle geändert werden, werden diese unmittelbar nach Empfang im Referenzmodell aktualisiert. Damit ist es möglich, auch das *Tactile Cueing* dynamisch zu gestalten und die *Tactile Cues* an aktuelle Ereignisse anzupassen, sie z.B. an- und auszuschalten, sie zu verschieben oder sie kräftiger oder

schwächer zu machen. Die Berechnung der gewünschten Konfigurationen, wie etwa die Sollpositionen der *Tactile Cues* findet außerhalb des Stick statt, siehe unten. Dadurch hängt die empfundene Kontinuität, bzw. die Laufruhe, eng. *smoothness*, im Kontakt mit einem sich bewegenden *Tactile Cues* nicht nur von der Taktrate der internen Regelung, sondern auch von der Taktrate des externen Prozesses und der Signalübertragungsgeschwindigkeit der Konfigurationsparameter zum aktiven Steuerorgan ab.

Typischerweise simuliert das Referenzmodell ein mechanisches Ersatzmodell 2. Ordnung, mit Feder, Masse und Dämpfer, siehe auch „SAE-ARP 5764“ [97, S. 21-25]. Dessen Parameter, wie Federsteifigkeit, oder Kennlinie, virtuelle Masse, bzw. Eigenfrequenz und Dämpfungskonstante usw. lassen sich über eine Nutzerschnittstelle, idealerweise zur Laufzeit, verändern sowie an- und abschalten. Zur Trimmung des Steuers lässt sich z.B. der Nullpunkt der Federkennlinie verschieben, eng. *Offset*. Die Basiskonfiguration des Steuers kann durch das An- und Abschalten weiterer vordefinierter *Tactile Cues*, wie z.B. lokal wirkender Rasten oder Gradienten überlagert werden. Die Abbildungen 2.2a-2.2f stellen typische *Tactile Cues* dar. Abbildung 2.2g zeigt beispielhaft die Überlagerung bzw. Superposition einer Basiskennlinie mit einem so genannten *Softstop*. Ein *Softstop* (Abbildung 2.2a) ist ein lokal wirkender, aber in der Kraftstärke begrenzter zusätzlicher Federkraftgradient, der z.B. als *Tactile Cue* für die -überschreitbare- Begrenzung des Steuerwegs verwendet werden kann. Die Position, an welcher das *Tactile Cue* wirksam werden soll, wird ebenso über die Nutzerschnittstelle definiert, wie weitere Parameter zur Beschreibung der Form, bzw. Intensität. Bei Erreichen des *Hardstops* (Abbildung 2.2c), auch als *Endstop* bezeichnet, versucht die Motorregelung hingegen dessen Überschreitung zu verhindern. Als Kombination aus *Softstop* und *Hardstop*, wird in der „SAE-ARP 5764“ ein „endlicher *Hardstop*“ bzw. „steifer *Softstop*“ (Abbildung 2.2b) beschrieben und dort einfach „Stop“ genannt. Weitere typische *Tactile Cue*-Elemente sind etwa die Raste, eng. *Detent* (Abbildung 2.2d), und die Losbrechkraft, eng. *Breakout* (Abbildung 2.2e). Auch nichtlineare Effekte, wie Haft- und Gleitreibung, *dry friction* (Abbildung 2.2f) lassen sich konfigurieren und mit den anderen Effekten kombinieren. Welche Formen mit welchen Kraftwerten bisher in *Tactile Cue*-Experimenten genutzt worden sind, ist im nachfolgenden Abschnitt 2.3 zusammengefasst.

Ein aktives Steuerorgan kann als fbw-Steuer ausgeführt sein, dann ist die Steuersignalübertragung zum Luftfahrzeug elektronisch, es kann aber aus einem mechanischen Steuer bestehen, das durch Hinzufügen eines Aktuators zur Generierung von *Tactile Cues* ausgerüstet worden ist [33, S. 12]. Zwar können mit beiden Varianten *Tactile Cues* erzeugt werden, jedoch weist das fbw-Steuer die zusätzliche Eigenschaft auf, dass Steuerflächen und Steuer entkoppelt sind. Das bedeutet zum einen, dass die Steuerung rückwirkungsfrei ist, d.h. dass die zur Verstellung Steuerflächen aufzubringenden Kräfte und auf diese einwirkenden aerodynamischen Kräfte sowie Störkräfte im Steuerweg nicht am Steuerorgan spürbar werden. Zum anderen schafft dies aber die Möglichkeit, in Verbindung mit einem Flugregler, eng. FCS, höhere Kommandomodern, engl. *upper modes* oder *response types* bereit zu stellen. Es bewegt dann die Steuerflächen des Hubschraubers nicht mehr proportional, sondern dient als Sollwertvorgabe oder Führungsgröße für einen Flugregler. Je nach Betriebsart führt dieser den Hubschrauber dann auf einem dem Steuerausschlag proportionalen Zustandsgröße des Hubschraubers, etwa Drehrate, eng. *Rate Command (RC)*, Fluglagewinkel, eng. *Attitude Command (AC)* oder Horizontalgeschwindigkeit, eng. *Translational Rate Command (TRC)* [31, S. 10-11]. Auch in diesem Zusammenhang könnte ein aktives Steuerorgan nützlich sein, da, mit Hilfe aktiver Steuerorgane, nachgewiesen werden konnte, dass sich für denselben Hubschrauber bei unterschiedlichen *upper modes* die optimalen Flugeigenschaften jeweils bei unterschiedlichen


 Abbildung 2.2.: **Typische Tactile Cue-Elemente und Superposition**

Steuerkraftcharakteristiken in Form von Federsteifigkeit, Eigenfrequenz und Dämpfung einstellen [52, S. 139 f.]. Ein aktives Steuer würde die automatisierte synchrone Nachführung der optimalen Steuerkraftcharakteristik bei Wechsel des *upper mode* ermöglichen.

Je nach Bauform bzw. Anordnung unterscheidet man zwischen *Centerstick* und *Sidestick*. Klassischerweise ist bei einem Hubschrauber das zyklische Steuer, eng. *cyclic*, als *Centerstick* mittig vor dem Pilotensitz angeordnet, der Kollektivhebel, eng. *collective* oder *collective pitch* seitlich links. Die übliche Hebelarmlängen liegen in der Größenordnung von etwa 40-50 cm zwischen Drehachse und Griff Referenz Punkt (GRP), d.h. dort, wo der Mittelfinger normalerweise den Griff berührt. Sidesticks hingegen werden seitlich des Pilotensitzes angeordnet und weisen kürzere Hebelarmlängen auf, in der Größenordnung 10-25 cm [97, S. 9-10]. Jede Variante hat Vor- und Nachteile. Eine kürzere Hebelarmlänge, mit einem niedrigeren Massenträgheitsmoment, lässt sich, bei begrenzter Leistung des verwendeten Aktuators im aktiven Steuer, schneller beschleunigen und abbremsen und erreicht damit höhere Bandbreiten, d.h. die *Tactile Cues* fühlen sich definierter oder „knackiger“ an. Im Gegensatz dazu können lange Hebelarme oder zusätzliche mitbewegte Massen eines Steuergestänges durch ihre hohe Trägheit dazu führen, dass sich die realisierbaren *Tactile Cues* so schwammig anfühlen, dass sie quasi nutzlos werden, wie der Autor selbst feststellen konnte. Andererseits ist die Steuersensitivität bei kürzeren Hebelarmlängen – und gleichem Winkelbereich – niedriger, als es die Piloten bei klassischen langarmigen Steuern gewohnt sind. Dies kann sich negativ auf die Flugeigenschaften auswirken, wie im direkten Vergleich gezeigt worden ist [20, S. 12]. Durch Nutzung von *Tactile Cueing* zur Vermeidung versehentlicher Torqueüberschreitungen könne dieser Unterschied allerdings wieder kompensiert werden. Vor einem Wechsel der Bauform sollte daher überprüft werden, ob die Steuerbarkeit noch gegeben ist, z.B. experimentell, wie es auch vor der Integration der in diese Arbeit verwendeten aktiven Sidesticks zur Kollektivsteuerung in den ACT/FHS geschehen ist, siehe Abschnitt 3.

2.3. *Tactile Cue*-Formen und Kräfte für eine *Haptic Torque-Protection* in der Literatur

In der Literatur zu bisherigen Realisierungen von *Haptic Torque-Protection* und anderen *Tactile Cueing*-Funktionen wurde meist ein *Softstop* genutzt, da dieser, seinem Namen gemäß, eine Begrenzung des Steuerwegs bewirkt. Dieser muss also an jener Steuerposition platziert sein, die mit dem zu schützenden Limit, hier dem Torquelimit, korrespondiert. Dabei soll er eine versehentliche Überschreitung verhindern, aber so bemessen sein, dass er die absichtliche Überschreitung zulässt, woher der Name „Soft“-stop rührt. Es lassen sich Beispiele finden, wo dieser einzeln oder in Kombination mit anderen *Tactile Cues* genutzt wurde, etwa mit einem *Stickshaker*, der anzeigt, wenn der *Softstop* und damit das Torque-Limit überschritten wurden [27, S. 6], [28, S. 10]. Der *Stickshaker* wurde in Experimenten auch als mögliche Alternative zum *Softstop* mit diesem verglichen, wobei der *Softstop* wegen seiner limitierenden Wirkung bevorzugt wurde [20], [41].¹ Außerdem besteht die Gefahr, dass ein *Stickshaker* wegen der immanenten Vibration im Hubschrauber, die in verschiedenen Flugphasen unterschiedlich intensiv sein kann, nicht wahrgenommen wird, wie Piloten nach

¹Eigene, spätere Studie des Autors.

einem Flugversuch geäußert hatten [30, S. 10].

Tabelle 2.1 fasst die Kraftschwellen und andere Parameter der in der Literatur gefundenen Beispiele für *Softstops* auf dem Kollektivsteuer zusammen. Neben der *Höhe*, bzw. Maximalkraft der Kraftschwelle sind dies ihre *Weite* und der daraus resultierende *Gradient* sowie die *Basis*-Konfiguration des Steuerers, soweit angegeben. Grundsätzlich lässt sich hier unterscheiden, ob ein Federkraftgradient oder eine *Reibkraft* eingestellt waren. Manche Quellen geben auch den *Steuerweg* an. In einigen Untersuchungen wurden mehrere Konfigurationen getestet. Diese sind hier zur Unterscheidung mit den in den Quellen genutzten Bezeichnungen benannt.

Tabelle 2.1.: Einzelbeispiele für Softstop-Parameter aus der Literatur

Beschreibung	Softstop			Basis		
	Höhe N	Weite mm	Grad. N/mm	Reib. N	Grad. N/mm	Steuerweg mm
Konventionell, Langarm						
BATEMAN, WARD & WHALLEY ¹	36	7,8	5	13	0,7	+/- 127
AUGUSTIN, DREIER ET AL. ²	36	n.n.	n.n.	n.n.	n.n.	n.n.
KLEIN, KASHAWLIC & ENNS ³						
„Harmonisch“	37	2,5	15	0	0,7	n.n.
„Höhe zu niedrig“	19	1,5	13	0	1,6	n.n.
„Gradient zu niedrig“	19	1,5	13	0	0,2	n.n.
Sidestick, Kurzarm						
WHALLEY, HINDSON ET AL. ⁴	20	1,4	14	6	0,4	+/- 72
BURGMAYER, ALFORD ET AL. ⁵						
„conv. min“	25	0,6	42	10	0,0	+/- 62
„conv. max“	50	1,2	42	10	0,0	+/- 62
„novel min“	20	0,3	67	8	0,0	+/- 76
„novel max“	40	0,5	80	8	0,0	+/- 76

¹ [23, S. 664] und [20, S. 9]; ²[24, S. 3]; ³[37, S. 6]; ⁴[20, S. 9]; ⁵[73, S. 5]

Die *Softstop-Höhen* rangieren von 19 bis 50 N, wobei 19 N in der Quelle als zu niedrig angegeben wurden „*Hard to feel*“ [37, S. 6]. Zur weiteren Eingrenzung des optimalen Einstellwertes für die Kraftschwelle eines *Softstops* werden nachfolgend Kennwerte aus weiteren Untersuchungen, Zulassungsanforderungen und anthropometrischen Messungen genannt und in Abbildung 2.3 gegenübergestellt.

Die SAE-ARP 5764 benennt die Maximalkraft am GRP mit 133 N für Sidesticks und 267 N für Centersticks [97, S. 31]. Für die *Softstops* werden keine maximalen Kräfte benannt, lediglich typische Werte für die Gradienten, siehe unten.

Der AERONAUTICAL DESIGN STANDARD ADS-33 und der ADS-33 USER'S GUIDE klassifizieren, welche Steuerkräfte im Hubschrauber für unterschiedliche Flugeigenschaften maximal tolerierbar sind. Sie geben diese Werte (bisher) nur für konventionelle Steuer mit langem Hebelarmen an: Sie

betragen für den Kollektivhebel: 44 N, die Nick-Achse des Centersticks 67 N für Level 1 im Hover bis 178 N für Level 3 im Vorwärtsflug, dessen Rollachse 44 N (Level 1-Hover) bis 111 N (Level 3 Vorwärtsflug). [106, S. 70] und [107, S. 520]. Die ADS-33 fordert also niedrigere Maximalkräfte als SAE-ARP 5764. Demnach sollten für das Kollektivsteuer 44 N nicht überschritten werden. Laut allgemeiner Normen, etwa dem HUMAN FACTORS DESIGN HANDBOOK ist der Mensch aber fähig, auch höhere Kräfte aufzubringen. Das 5. Perzentil der maximal aufbringbaren Kraft liegt für eine zur Betätigung eines Sidesticks in Längsrichtung typischen Pose mit der linken Hand etwa bei 100 N (23 lbs) drückend und bei 173 N (39 lbs) ziehend HUMAN FACTORS DESIGN HANDBOOK [108, S. 612]. Auch die Zulassungsvorschriften der EASA für kleine Hubschrauber CS-27 und große Hubschrauber CS-29 definieren: „(a) Except as provided in sub-paragraph (b) the limit pilot forces are as follows: (1) For foot controls, 578 N (130 lbs). (2) For stick controls, 445 N (100 lbs) fore and aft, and 298 N (67 lbs) laterally“. Dies sind die Kräfte, von denen angenommen wird, dass sie maximal auf die Steuer wirken können. Sie dienen als Referenzkräfte, denen die Steuerstruktur und durch das Aufbringen dieser Kräfte betroffene weitere Struktur standhalten muss, wobei unter Berücksichtigung der individuellen Einbausituation eine Reduktion auf 60 % dieser Werte möglich ist [109, 1-C-3] und [110, 1-C-3].²

ABILDGAARD hat die Piloten-Sidestick-Interaktion im ACT/FHS, bzw. der Bodensimulation für ein *Tactile Cue* zur Sinkratenbegrenzung mit demselben aktiven Sidestick untersucht, der auch in dieser Arbeit genutzt wurde. Für diesen Anwendungsfall wirkte das *Tactile Cue* allerdings in die entgegengesetzte Richtung. Er hat dabei in einem Vorversuch auch die Pilotenkraft am *Softstops* betrachtet. Dazu hat er den Probanden die Steuerkräfte schrittweise von 5 N beginnend um jeweils 5 N erhöhen und die empfundene Intensität qualitativ bewerten lassen. Er kam zu dem folgenden Schluss: Steuerkräfte bis 10 N erscheinen zu niedrig, der Pilot tendiert dazu, die Kräfte weiter zu erhöhen. Im Bereich von 15 bis 20 N erscheinen sie plausibel. Ab 25 N fühlen sie sich zu kräftig an. Diese Versuche wurden von einem einzigen Probanden durchgeführt [44, S. 64].

DOS SANTOS SAMPAIO hat für den optimalen, bzw. minimalen Schwellwert für eine automatische Entkoppelung von elektronisch gekoppelten aktiven Steuerorganen experimentell ein Minimum von 20 N bestimmt. Dieser Wert bezieht sich auf die Pitch-Achse, also die longitudinale Achse des mit der rechten Hand bedienten Sidesticks. Bei geringeren Werten kam es zu unbeabsichtigten Entkopplungen, wobei das Risiko mit sinkenden Werten stieg DOS SANTOS SAMPAIO [56, S.121-122]. Die obere Grenze gibt er mit, dem nächst höheren Wert aus der Testreihe, 30 N an. Bei dem übernächsten getesteten Wert von 40 N war das bei der Entkopplung auftretende sprunghafte Überschießen der Steuerposition, bzw. waren die daraus resultierenden Störungen der Hubschrauberbewegung mit Lageoszillationen, trotz Maßnahmen zu langsamen Überblendung, bereits inakzeptabel hoch. Dieses Maximum ist aber nicht direkt auf die hier vorgesehene Anwendung übertragbar, da die Kraftschwelle hier auch nach deren Überschreitung bestehen bleibt und es somit nicht zu einem Steuersprung kommen kann.

Schließlich hat PRIETO-AGUILAR in ihrer Arbeit zur Modellierung der Interaktion von Mensch- und *Tactile Cue* am aktiven Sidestick zur Kollektivsteuerung untersucht, wie Piloten unterschiedliche *Softstop*-Schwellwerte empfinden.³ Dazu ließ sie 16 Piloten, darunter männliche und weibliche Piloten, auf 6 Stufen, 10 N bis 60 N in 10 N Abständen für eine Dauer von jeweils etwa 150 s

²Weitere Werte, auch für andere Achsen wurden in der Abschlusarbeit von BEHRENS zusammengestellt [111, S. 41-43]

³Die Arbeit und Veröffentlichung fand parallel zu dieser Arbeit statt.

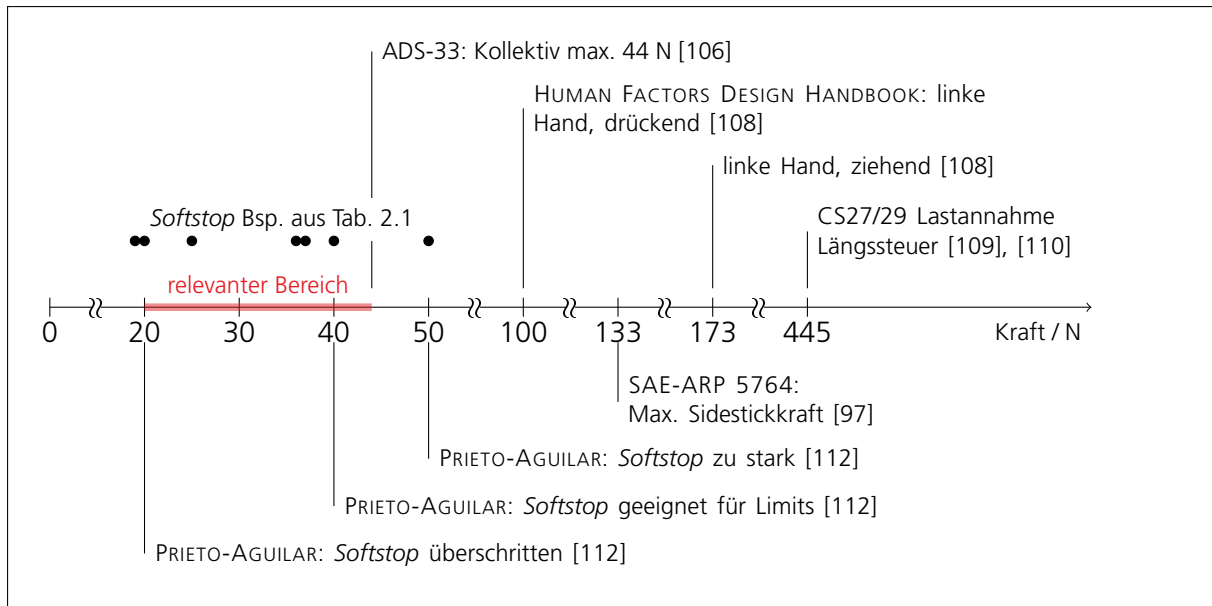


Abbildung 2.3.: **Relevanter Bereich für *Softstop*-Kraftschwelle im Verhältnis zu Literaturwerten (Zulassungskriterien, Flugeigenschaftskriterien, Anthropometrie)**

mit einem vorgegebenen Bewegungsprofil mit den *Softstops* interagieren. Ab einer Kraft von 30 N empfanden es die ersten Piloten als unangenehm, frz. *insupportable*. [112, S. 73]. Die Autorin empfiehlt letztlich Kraftschwellen auf der Stufe von 20 N für die Pilotenunterstützung, „Aide au pilotage“, zu verwenden, wobei bei hohen Steuerraten die Gefahr der versehentlichen Überschreitung bestehe. Dagegen eigneten sich Kraftschwellen auf der Stufe von 40 N für Limits, „Limitations de vol/machine“. Kraftschwellen darüber und darunter seien zu vermeiden, „A éviter“ [112, S. 77].

Zusammenfassend lässt sich also sagen, dass der für die Kraftschwelle eines *Softstops* relevante Bereich zwischen 20 und 44 N liegt, siehe auch Abbildung 2.3. Geringere Werte können zu einer versehentlichen Überschreitung führen und höhere Werte könnten im Fall absichtlicher Überschreitung zu einer Verschlechterung der Flugeigenschaften führen.

Neben dem Schwellwert ist auch die Steifigkeit des *Softstops* einstellbar. Laut SAE-ARP 5764 sollte sie 35 bis 350 N/mm betragen, wobei diese Werte nicht weiter begründet werden [97]. Die Beispiele aus der Literatur liegen zwischen 5 und 80 N/mm, siehe Tabelle 2.1. ABILDGAARD gibt einen Mindestwert von 8 N/mm an [44, S. 146].

Zur Vermeidung transienter Überschreitungen beim Kontakt mit dem *Softstop* schlagen KLEIN, KASHAWLIC ET AL. vor, den Gradienten des *Softstops* zu minimieren, da er dann durch die Piloten früher spürbar sei. Demgegenüber stünde allerdings ein schlechteres, bzw. langsames Rückführen des Stick. Letztlich wurde das Problem also durch Beibehalten der höheren Steifigkeit und Erhöhen der Kraftschwelle gelöst, siehe auch Tabelle 2.1. Als alternative Lösung schlagen sie vor, die Dämpfung bei Kontakt mit dem *Softstop* zu erhöhen [37, S. 5].

WHALLEY, HINDSON ET AL. schlagen vor, den *Softstop* so zu positionieren, dass er auf der Referenzposition endet, da das Ende wegen der Veränderung des Gradienten gut spürbar sei [20]. Dagegen spricht allerdings, dass stets die volle Kraft aufgebracht werden muss, um das korrespondierende Limit auch zu erreichen. Außerdem besteht die Gefahr, das Limit versehentlich zu überschreiten, weil der Gradient dort wieder abnimmt.

Die oben genannten Informationen und Daten bilden die Grundlage für das Design der *Haptic Torque-Protection* in den folgenden Kapiteln.

3. Versuchsumgebung ACT/FHS mit aktiven Sidesticks und Simulator

In diesem Kapitel wird die für die Untersuchung von *Tactile Cueing* verwendete spezifische Versuchsinfrastruktur beschrieben. Diese beinhaltet den realen Versuchshubschrauber ACT/FHS, bzw. den zugehörigen, bodengebundenen Flugsimulator. Diese wurden jeweils am rechten Cockpitsitz für den Experimentalpiloten mit zwei aktiven Sidesticks ausgerüstet, einer für die linke Hand und einer für die rechte Hand. Zunächst wird der ACT/FHS beschrieben, mit seinen Möglichkeiten und Beschränkungen für die Integration und Erprobung experimenteller Hard- und Software. Dann wird der verwendete aktive Sidestick beschrieben. Abschließend wird die in der H135 verwendete visuelle Triebwerksanzeige dargestellt, der so genannte FLI und die zugehörigen unterschiedlichen Torque-Limits und Arbeitsbereiche. Diese spezifischen Limits und Bereiche sollen exemplarisch in dieser Arbeit als *Tactile Cues* dargestellt und untersucht werden.

3.1. Versuchsträger ACT/FHS und Flugsimulator

Der ACT/FHS ist ein realer Hubschrauber (siehe Abbildung 3.1) mit einer Sicherheitsarchitektur, welche die Integration von experimenteller Hard- und Software in die Hubschraubersteuerung und deren Erprobung im Realflug ermöglicht, ohne dass für diese komplizierte Sicherheitsbetrachtungen nötig werden. Der ACT/FHS und sein Sicherheitskonzept werden in einem Beitrag von KALETKA, KURSCHEID & BUTTER [69] näher erläutert. Nachfolgend wird vereinfacht erläutert wie das Sicherheitskonzept ihn als Integrations- und Erprobungsplattform für aktive Sidesticks befähigt. Der ACT/FHS wurde auf der Basis des leichten Mehrzweckhubschraubers Hubschraubers H135 von Airbus Helicopters, vormals EC135 von Eurocopter, aufgebaut, dessen Avionik-System dafür stark modifiziert wurde. Beim Aufbau des ACT/FHS wurde die mechanische Steuerung der H135 durch eine fly-by-wire-Steuerung, streckenweise sogar eine fly-by-light-Steuerung, ersetzt. Dabei wurde auch die Sicherheits- und Experimentalarchitektur integriert. Sie besteht aus einem sicheren Basis-System und einem zuschaltbaren potentiell nicht sicheren Experimentalsystem. Zum Basissystem gehören die Aktuatoren für jede Steuerachse an Hauptrotor und am Heckrotor sowie der zur Erreichung der geforderten Zuverlässigkeit vierfach redundant ausgeführte Basis-System-Computer. Über den Basis-System-Computer kann zwischen verschiedenen Betriebsarten hin- und hergeschaltet werden. Im sicheren Modus werden die Steuersignale des Sicherheitspilot (SP), linker Steuerstand an die Aktuatoren gesendet. Dem SP obliegt es, per Tastendruck den Experimentalmodus zu aktivieren. Dann werden die Signale des Experimentalsystems an die Aktuatoren weitergeleitet. Dieses beinhaltet sowohl die Steuer des Experimentalpilot (EP), der rechts sitzt, als auch auch den



Abbildung 3.1.: **Forschungshubschrauber ACT/FHS auf Basis einer H135**

Experimentalcomputer (EC). Je nach Experiment und Konfiguration stehen dazu konventionelle Hubschraubersteuer, aktive Sidesticks oder sogar ein Lenkrad zur Verfügung [113]. Auf dem EC lassen sich Flugregler implementieren. Dazu stehen dort die Sensordaten des Hubschraubers zur Verfügung. Während des Experimentalmodus überwacht der SP den Flug und kann jederzeit die Kontrolle übernehmen. Dazu werden die Aktuatorstellungen durch eine mechanische Verbindung auf seine Steuer zurückgeführt. Die Übernahme der Kontrolle erfolgt durch Knopfdruck oder durch Überschreiten einer vordefinierten Differenzkraft in einer beliebigen Steuerachse.

Anhand der Abbildung 3.2 werden die weiteren Komponenten des Cockpits erläutert. Der EP-Sitz ist mit einem Experimentaldisplay, bzw. Multifunktionsdisplay (MFD) ausgerüstet, das je nach Experiment frei programmiert werden kann. Über ein Versuchsbediengerät (VBG) können Parameter der Experimentalsoftware modifiziert werden. Neben dem SP und dem EP gibt es noch ein drittes Besatzungsmitglied. Der Flugversuchingenieur (FVI) ist für die Steuerung der Experimente verantwortlich. Dazu hat er ebenfalls ein Display und ein VBG. Über weitere Schalter kann es die Datenaufzeichnung starten und stoppen sowie verdeckt Systemfunktionen auslösen, z.B. Fehler einspielen.

Auf dem EC läuft ein Softwareframework, welches die Integration der Nutzersoftware erlaubt und diese in Echtzeit mit einer individuell vorgegebenen Simulationsrate ausführt. Das Framework ist nach verschiedenen Teilfunktionen gegliedert. Es gibt derzeit u.a. Module für die Flugregelung (FCS), die Navigation und zur Ansteuerung der aktiven Sidesticks (ACS). Die Programmierung der Module erfolgt am PC in Matlab/Simulink. Durch eine automatische Codegenerierung werden aus dem Matlab/Simulink Code heraus die Echtzeitanwendungen für das Experimentalsystem erzeugt. Für das ACS-Modul ist derzeit eine Rechenzeit von 32 ms eingestellt.

Für den ACT/FHS gibt es eine bodengebundene Flug- und Systemsimulation. Diese verfügt über ein realistisches mathematisches Flugmodell des ACT/FHS, samt Cockpit und Sichtsystem. Sie verfügt zudem über eine Schnittstelle, an die ein identischer Zwilling des ACT/FHS Experimentalsystems

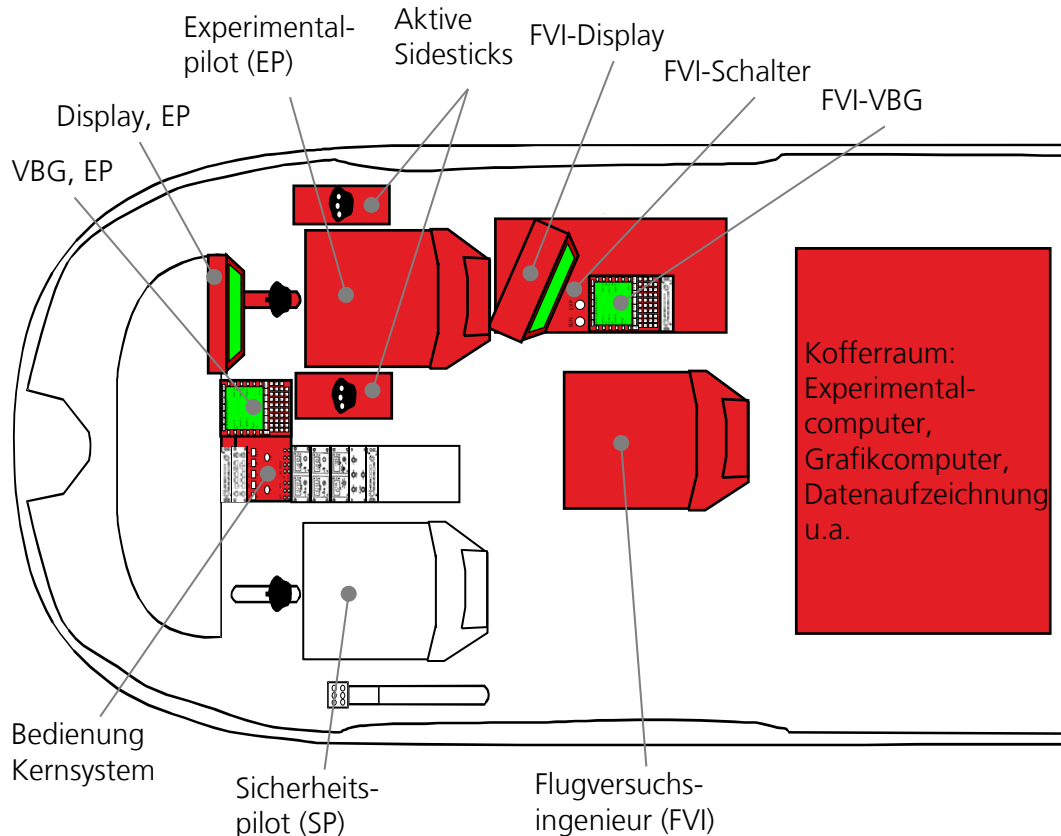


Abbildung 3.2.: **FHS Cockpit Komponenten, rot = Experimentalsystem**

eingebunden werden kann. Dies betrifft sowohl die Hardware inklusive Experimentalcomputer als auch das Softwareframework. Das ist Bestandteil der Gesamt-Versuchsinfrastruktur und ermöglicht es, Hard- und Software vor dem eigentlichen Flug zu testen. Durch den hohen Realitätsgrad eignet sich der Simulator auch zur Durchführung von Pilotenstudien.

Die Flugsimulation hat zwischen den im Verlaufe dieser Arbeit durchgeführten Studien eine Weiterentwicklung erfahren. Zunächst handelte es sich um den so genannten „Bodensimulator“, ein Festsitzsimulator, der über ein Bo105 Cockpit mit zylindrischer Sichtprojektion mit einem vertikalen Sichtbereich von -30° bis $+20^\circ$ und einem horizontalen Sichtbereich von 200° verfügte. Später wurde er durch einen vorbildgetreuen Nachbau des ACT/FHS Cockpits, samt Eingabe- und Anzeigenelementen im neuen Simulatorzentrum AVES ersetzt, mit sphärischer Sichtprojektion mit einem Sichtfeld von -53° bis $+40^\circ$ vertikal und 240° horizontal [70].

3.2. Integrierte aktive Sidesticks

Der ACT/FHS und das zugehörige Simulationscockpit im AVES wurden jeweils mit einem Paar aktiver Sidesticks ausgestattet, wie von GRÜNHAGEN, ABILDGAARD UND MÜLLHÄUSER beschrieben [114],

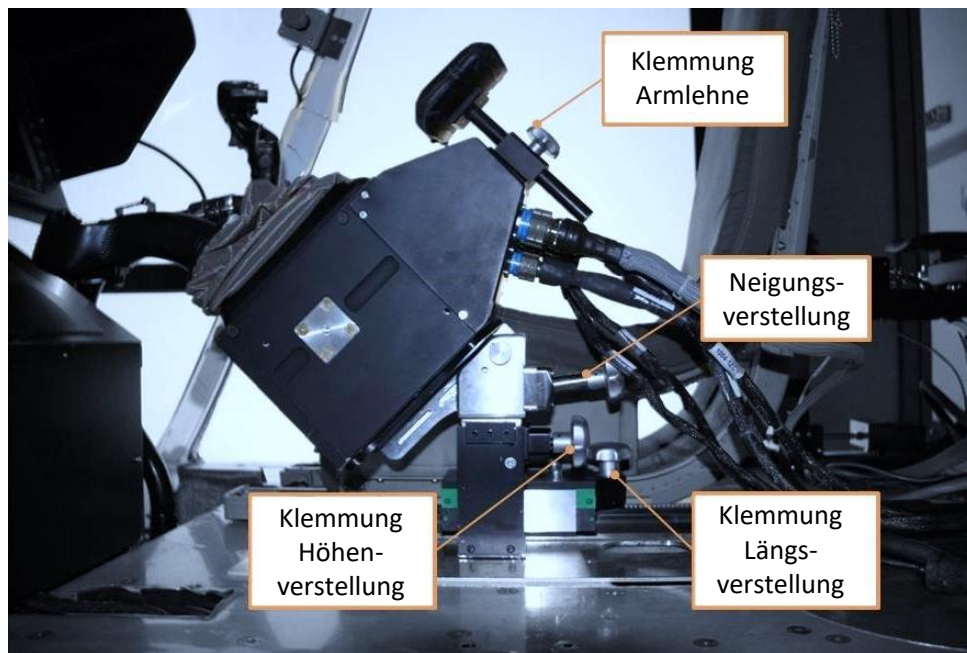


Abbildung 3.3.: **Sidestick auf Halterung, neigbar, längs- und höhenverstellbar**

[71]. Diese wurden in den Experimentalzweig des ACT/FHS integriert [115], [116].¹

Für die *Haptic Torque-Protection* wird der linke Sidesticks, welcher der Kollektivsteuerung dient, verwendet. Dabei handelt es sich um einen Prototypen der Firma Liebherr Aerospace Lindenberg GmbH (LLI). Er wurde in das Experimentalsystem des ACT/FHS integriert und kann alternativ zum konventionellen Kollektivhebel eingerüstet werden. Die Funktionsweise entspricht im Wesentlichen dem im Abschnitt 2 erläuterten Funktionsprinzip. Die Spezifikation der Hardware und die Kalibrierfaktoren des Sticks sind im Anhang, Abschnitt E beschrieben. Der LLI-Sidestick bildet als Basis das mechanische System eines Schwingers 2. Ordnung ab, mit Feder-, Dämpfungs- und Trägheitskraft. Die Federkraft-Kennlinie wird durch eine Kraft-Weg-Tabelle vorgegeben, analog dazu die Dämpfungskraft über eine Kraft-Geschwindigkeitstabelle. Die Trägheitskräfte sind für den LLI-Stick nicht veränderbar. Es lassen sich unterschiedliche *Tactile Cue*-Elemente konfigurieren, wie etwa *Softstop*, *Hardstop*, Losbrechkraft (eng. Breakout), Raste (eng. Detent), Haft- und Gleitreibung.

Die aktiven Steuerorgane im ACT/FHS wurden nicht exklusiv für die Untersuchung der *Haptic Torque-Protection* verwendet, sondern auch für andere Themen, siehe Abschnitt 1.1.2.

Der Beschaffung und Integration des Sidesticks ging eine Akzeptanzstudie in der Bodensimulation des ACT/FHS voraus, die durch den Autor dieser Arbeit durchgeführt wurde. Darin wurde von vier Einsatzpiloten bestätigt, dass auch ein Sidestick mit vergleichsweise kurzem Hebelarm zur Steuerung des Kollektivs geeignet ist, obwohl diese Achse normalerweise durch einen Kollektiv mit langem Hebelarm erfolgt [117, S. 8-13]. Dazu wurde der einst am DLR entwickelte Prototyp des „*electro-magnetic Sidestick*“, kurz „*MAGSI*“ verwendet [118]. Nach erfolgter Akzeptanzstudie wurde die Anforderungen an den Sidestick definiert und von der Herstellerfirma LLI iterativ umgesetzt.

¹ nicht öffentlich



Abbildung 3.4.: **Fly-side-by-side im ACT/FHS und AVES: Aktiver Sidestick links (Bild Vordergrund) und rechts (Bildmitte), dazwischen der Centerstick**

Der Autor dieser Arbeit war an Anforderungsdefinition und Abnahme des Sidestick beteiligt. Zur Integration des LLI Sidesticks in den ACT/FHS wurde eine Halterung hergestellt. Die Halterung lässt es zu, den Sidestick aufrecht zu stellen oder ihn stufenlos bis zu 45° nach vorne zu neigen, siehe Abbildung 3.3.

In Kontext dieser Arbeit wurde der linke Sidestick immer in der maximal nach vorne geneigten Stellung (45°) verwendet. Position und Höhe wurden jeweils nach Ermessen der Piloten an deren individuelle Körperergonomie angepasst. Dabei wurde darauf geachtet, dass die Schulter entspannt war und der Pilot sich an die Rückenlehne des Sitzes anlehnen konnte, d.h. sich zum Betätigen des Stick nicht nach vorne beugen musste. Neben dem hier im Fokus stehenden Sidestick für die linke Hand wurde in allen Versuchen auch für die rechte Hand ein aktiver Sidestick verwendet. Für diesen waren hier allerdings keine *Tactile Cue*-Funktionen aktiv. Dabei handelt es sich um den *Goldstick* der Firma *Stirling Dynamics*. Abbildung 3.4 zeigt den Sitz des EP mit den beiden Sidesticks im Simulatorcockpit.

3.3. Triebwerksanzeige First-Limit-Indicator (FLI)

Die visuelle Anzeige für die Triebwerkszustände ist bei dem hier beispielhaft betrachteten ACT/FHS, bzw. der H135, wie auch in manchen anderen Hubschraubern von Airbus, als so genannter FLI ausgeführt, siehe Abbildung 3.5. Dabei handelt es sich laut Flughandbuch [119]² um ein Kombinationsinstrument, das die triebwerksrelevanten Parameter Torque (*TRQ*), Turbinenauslasstemperatur

²Diese Quelle ist nicht öffentlich zugänglich.



Abbildung 3.5.: FLI Triebwerksanzeige im ACT/FHS

(turbine outlet temperature -TOT) und Kompressordrehzahl (N1) darstellt. Da Hubschrauber dieser Größenordnung typischer Weise mit zwei Triebwerken ausgestattet sind, erfolgt die Darstellung für beide Triebwerke. Das besondere an dieser Art von Anzeige ist, dass alle drei genannten Größen nur noch durch einen Zeiger pro Triebwerk auf einer gemeinsamen dimensionslosen FLI-Skala angezeigt werden. Dessen Stellungen werden durch die kritischste Größe bestimmt. So muss der Pilot nicht mehr drei verschiedene Instrumente, bzw. sechs Zeiger beachten, sondern nur noch eine Anzeige mit zwei Zeigern. Farbige Markierungen auf der Skala zeigen die Betriebsbereiche und Begrenzungen an. Die Farbgebung ist in den Luftfahrtregularien der European Union Aviation Safety Agency (EASA) festgelegt [110, CS 29.1521 1-G-4 ff.]. Dabei wird zwischen Limits für den Normalbetrieb All Engines Operative (AEO) und den Betrieb bei einseitigem Triebwerksausfall One Engine Inoperative (OEI) unterschieden. In beiden Betriebsarten gibt es kontinuierliche Leistungslimits, das Maximum Continuous Power (MCP) bei 9 FLI für AEO bzw. das MCP-OEI bei 11 FLI, mit denen die Triebwerke unbegrenzt betrieben werden können, ohne Schaden zu nehmen. Die zugehörigen Markierungen sind gelb.

Zusätzlich gibt es zeitlich beschränkte Limits höherer Leistung. Diese zugehörigen Markierungen sind rot. So ist es bei AEO erlaubt, mittelfristig, d.h. für einige Minuten, eine erhöhte Startleistung, die so genannte Takeoff Power (TOP) bis zum Maximum Takeoff Power (MTP)-Limit bei 10 FLI zu nutzen. Damit wird berücksichtigt, dass ein Hubschrauber beim Start und Langsamflug einen höheren Leistungsbedarf hat. Es wird dabei toleriert, wenn diese Limits kurzzeitig, d.h. für einige Sekunden und „unbeabsichtigt“ leicht überschritten werden, so lange die Überschreitungen unterhalb des so genannten Transienten-Limits, eng. *transient limit* bei 10,4 FLI bleiben, normalerweise durch einen roten Punkt im FLI dargestellt. Im OEI-Betrieb gibt es zusätzlich, wie in der EASA Zulassungsvorschrift CS-29 gefordert, zu dem MCP-OEI Limit noch zwei zeitlich befristete Limitabstufungen erhöhter Übergangsleistung [110, CS 29.1521 1-G-3 ff.]. Mit dem 30 s Limit, OEI-30-s bei 13,5 FLI, und dem anschließenden 2-min Limit, OEI-2-min bei 13 FLI, wird den Piloten genug Leistung zur Verfügung gestellt, um den Hubschrauber aus Phasen erhöhten Leistungsbedarfs, z.B. Langsamflug während des Start in einen Flugzustand mit geringerem Leistungsbedarf zu überführen, etwa aus dem

Tabelle 3.1.: FLI und Torque Limits [119]

Limit	FLI	Torque	Farbe
		Torque-%	
MCP ¹	9,0	2 x 69	gelb
TOP Bereich ¹	9,0-10,0	2 x 69 - 2 x 78	gelb
MTP ¹	10,0	2 x 78 ²	rot
Transient Limit	10,4	2 x 82 ³	rot
OEI-MCP ¹	11,0	1 x 89	gelb, gestrichelt
OEI-2-min	13,0	1 x 125	rot, gestrichelt
OEI-30-s	13,5	1 x 128	rot, gestrichelt

¹ MCP: Max. Continuous Power, TOP: Takeoff Power, MTP: Maximum Takeoff Power, OEI: One Engine Inoperative ($\equiv$ 1 Triebwerk)

² für max. 5 min und $V \leq V_y = 65$ kt

³ für max. 10 s, „unbeabsichtigt“

Schwebeflug in den Vorwärtsflug mit v_y . Überschreitungen sind durch den Piloten zu vermeiden. Erfolgt eine Überschreitung, wird der Pilot durch ein akustisches Signal, den „Gong“ darauf hingewiesen und die Überschreitung wird elektronisch im System gespeichert, um den Technikern bei der routinemäßigen Nachflugkontrolle Hinweise für evtl. erforderliche zusätzliche Kontrollen und Wartungsmaßnahmen zu geben. Die nachfolgende Übersicht fasst die oben genannten Limits zusammen, Tabelle 3.1. Weil in dieser Arbeit beispielhaft nur der Torque betrachtet wird, sind auch die zugehörigen Torque-Werte genannt. Die Zuordnung der Torquelimits zu den FLI Skalenwerten ist nicht linear. Das bedeutet, dass der Abstand zwischen zwei FLI-Skalenwerten nicht immer dem gleichen Unterschied von Torque-Prozentwerten entspricht.

Zusätzlich zur FLI-Skala werden die Werte der einzelnen Parameter in Form von Digitalzahlen jeweils rechts und links von der FLI-Skala angezeigt, wobei derjenige Parameter, welcher aktuell den FLI-Zeiger ansteuert, durch ein weißes Quadrat an seiner Außenseite markiert wird. Wenn Werte kritisch werden, werden diese durch farbige Unterstreichungen hervorgehoben. Es ist zu beachten, dass der Torque hier in der Einheit „%“ gemessen wird. Um Verwechselungen mit relativen Werten zu vermeiden, wird hier nachfolgend die Einheit „Torque-%“ für den Torque verwendet. In der unteren rechten Hälfte im inneren der Rundskala erscheint zudem ein Countdown, wenn in zeitlich beschränkten Betriebsbereichen, d.h. dem TOP-Bereich und mit 30 s und 2 min-OEI-Leistung operiert wird.

Weil die ACT/FHS-Simulation zum Zeitpunkt dieser Arbeit nur über ein ungenaues Triebwerksmodell verfügte, welches den Torque und andere Triebwerksparameter des nicht oder nur unzureichend wiedergeben hat, wurde ein Ersatzmodell verwendet, siehe Abschnitt 4.5.

4. Systemdesign Haptic Torque-Protection

Die Funktion der *Haptic Torque-Protection* ist es, die Triebwerklimits und -betriebsbereiche gemäß Cockpitanzeige, hier die FLI-Anzeige mit ihren unterschiedlichen Markierungen, siehe Abschnitt 3.3, durch geeignete, wirksame *Tactile Cues* am Kollektivsteuer taktile darzustellen. Dazu ist ein technisches System nötig, das nachfolgend im Abschnitt 4.1 spezifiziert wird. Anschließend wird im Abschnitt 4.2 dessen Umsetzung beschrieben.

4.1. Spezifikation und Begriffsdefinition

Als Grundlage für die Systemstruktur und für das *Tactile Cue*-Design soll hier die Intention der *Tactile Cues* herausgearbeitet werden. Da das *Tactile Cueing* hier grundsätzlich die visuelle Cockpitanzeige komplementieren soll, ergeben sich die Anforderungen an die *Tactile Cues* aus der Dekomposition der unterschiedlichen Markierungen der FLI-Anzeige, welche als *Tactile Cue* repräsentiert werden sollen. Weil ein *Tactile Cue* direkt auf das Steuer wirkt und damit auch eine führende Komponente haben kann, wird neben der Intention auch der Appell der Anzeige benötigt, d.h. die vom Piloten gewünschte Handlungsweise. Intention, Appell und weitere Bedingungen oder Einschränkungen dienen als übergeordnete Anforderungen, welche von Studie zu Studie in den *Tactile Cue*-Designs umgesetzt werden sollen. Grundsätzlich lassen sich dabei gemäß Farbsprache des FLI-Displays zwei Kategorien bilden, nämlich gelbe und rote Markierungen, welche sich in folgender Weise interpretieren lassen, siehe Boxen.

Neben der gelben und roten Farbe für die Markierungen im visuellen FLI-Display, unterscheiden sich diese noch durch den Linientyp. Zum einen gibt durchgezogene Linien. Diese gelten im Normalbetrieb (AEO). Daneben gibt es gestrichelte Linien, diese gelten für den einseitigen Triebwerksausfall (OEI). Im Display sind immer alle Markierungen zu sehen. Die *Haptic Torque-Protection* soll aber immer nur die aktuell gültigen Limits und Betriebsbereiche darstellen: Jeweils ein *Info-Cue*, das mit dem gültigen Torque-Info-Bereich korrespondiert und ein *Stop-Cue*, das mit dem gültigen Torque-Limit korrespondiert. Dabei müssen Intention und Appell der *Tactile Cues* zur Bedeutung der Markierungen passen, siehe Kästen. Zudem müssen sie voneinander unterscheidbar sein. Zur Reduktion der Komplexität, sollen für die Entsprechungen der *Stop-Cues*, bzw. *Info-Cues* im OEI-Betrieb dieselben *Tactile Cue*-Ausprägungen verwendet werden wie im Normalbetrieb (AEO).

Info-Cue

- Farbliche Entsprechung im FLI-Display: gelb.
- Intention:
 - Das Eintreten und ggf. auch das Verlassen des zeitliche eingeschränkt erlaubten Betriebsbereichs soll vermittelt werden.
 - Es soll spürbar sein, wenn aktuell in diesem Bereich operiert wird.
- Appell: „Achtung, beachten Sie, dass dieser Leistungsbereich nur zeitweise zur Verfügung steht!“
- Einschränkungen:
 - Die Steuerbarkeit in diesem Bereich darf durch das *Tactile Cue* nicht eingeschränkt werden.
 - Weil längere Zeit in diesem Bereich operiert werden darf, sollte die Interaktion mit dem *Tactile Cue* nicht physisch ermüdend sein.

Stop-Cue

- Farbliche Entsprechung im FLI-Display: rot oder gelb, siehe oben.
- Intention:
 - Es soll eine unbeabsichtigte Überschreitung verhindern, so genanntes „carefree handling“.
 - Es soll möglich sein, das Limit maximal auszunutzen.
 - Es soll den Piloten am Limit führen, ohne dass dieser aktiv nachsteuern muss. Der Pilot muss dazu nur den Kontakt zum *Tactile Cue* halten.
- Appell: „STOPP, nicht überschreiten!“
- Einschränkungen: Das *Stop-Cue* soll sich bewusst überschreiten lassen.

Weitere Merkmale der FLI-Anzeige sind etwa der Countdown für die zeitlich beschränkten Betriebsbereiche und das transiente Limit oder die Anzeige des Triebwerksparameters, welcher aktuell den FLI-Zeiger ansteuert. Auch diese könnten grundsätzlich in den Designprozess des *Tactile Cueings* mit einbezogen werden, worauf aber in dieser Arbeit zur Vereinfachung zunächst verzichtet wurde.

Nachfolgend werden zum besseren Verständnis die folgenden Begrifflichkeiten und Symbole eingeführt, siehe auch Tabelle 4.1. Das nicht zu überschreitende Torquelimit wird nachfolgend als

Torque-Limit (Q_{STOP}) bezeichnet. Es entspricht je nach Fluggeschwindigkeit entweder dem MTP- oder dem MCP-Limit. Das *Tactile Cue* für das Torque-Limit wird nachfolgend *Stop-Cue* genannt. Damit es gemäß Spezifikation eine Referenz zur Führung am Torquelimit liefern kann, muss es an der korrekten Steuerposition dargestellt werden, nachfolgend als Stop-Position ($\delta_{0,STOP}$) bezeichnet. Der zeitweise erlaubte „gelbe“ TOP-Bereich wird nachfolgend Torque-Info-Bereich (Q_{INFO}) genannt, weil es die Hauptintention des *Tactile Cues* ist, den Piloten zu informieren. Das zugehörige *Tactile Cue* wird *Info-Cue* genannt. Der mit dem Torquebereich korrespondierende Steuerbereich wird Info-Bereich genannt, der Beginn des Bereichs Info-Position ($\delta_{0,INFO}$). Das *Info-Cue* liegt grundsätzlich direkt vor dem *Stop-Cue*. Es gibt Bedingungen, in denen der Torque-Info-Bereich gesperrt ist, siehe oben. Dann liegt das *Stop-Cue* auf dieser Position und das *Info-Cue* entfällt.

Tabelle 4.1.: **Begriffsdefinition und Zuordnung der mit dem *Info-Cue* und dem *Stop-Cue* assoziierten Werte**

Kontext / <i>Tactile Cue</i>	<i>Info-Cue</i>	<i>Stop-Cue</i>
FLI ¹	MCP ²	MTP ³ oder MCP
	OEI-MCP ⁴	OEI-2-min, OEI-30-s oder OEI-MCP
Farbe	gelb	rot oder gelb ³
Torque	Torque-Info-Bereich	Torque-Limit
Steuerorgan	Info-Bereich/Info-Position	Stop-Position
Formelzeichen	$\delta_{0,INFO}$	$\delta_{0,STOP}$

¹ FLI: First-Limit-Indicator

² MCP: Maximum Continuous Power

³ MTP: Maximum Takeoff Power; für $v < v_y$ darf MCP nicht überschritten werden.

⁴ OEI: One Engine Inoperative

4.2. Systemstruktur

Zur Erfüllung der oben genannten Anforderungen wurde das nachfolgend beschriebene System in das Experimentalsystem des ACT/FHS implementiert. Die Abbildung 4.1 stellt die Gesamtstruktur mit ihren Teilfunktionen und dem Signalfuss sowie ihre Schnittstellen dar. Die Implementierung der Systemarchitektur folgt im Groben dem von JERAM vorgeschlagenen Konzept „Open Platform for Limit Protection“ [92, S. 18]. Dabei wird das Gesamtsystem nach bestimmten Teilfunktionen strukturiert bzw. modularisiert.

Weil nur der aktuell gültige Torque-Info-Bereich und das Torque-Limit als *Tactile Cues* dargestellt werden sollen, bedarf es zunächst eines Teilsystems, welches die aktuell gültigen Limits auswählt. Dies geschieht durch einen *Zustandsautomaten*. Dazu wurden die Werte sowie die Bedingungen gemäß Flughandbuch implementiert. Die Schaltbedingungen sind Fluggeschwindigkeit und Fehlerzustand des Triebwerks, siehe Abschnitt 4.3.

Zur Bestimmung der *Tactile-Cue-Positionen*, d.h. der Steuerposition, an welchen die *Tactile Cues* wirksam werden sollen, um die o.g. Intention zu erfüllen, wird eine Vorsteuerung, bzw. ein Prädiktor gewählt, so wie es zu diesem Zweck in der Literatur beschrieben ist [20], [26], [81], [23, S. 664]. Ein einfacher Feedback-Regler ist für diese Aufgabe nicht geeignet. Das liegt an den besonderen

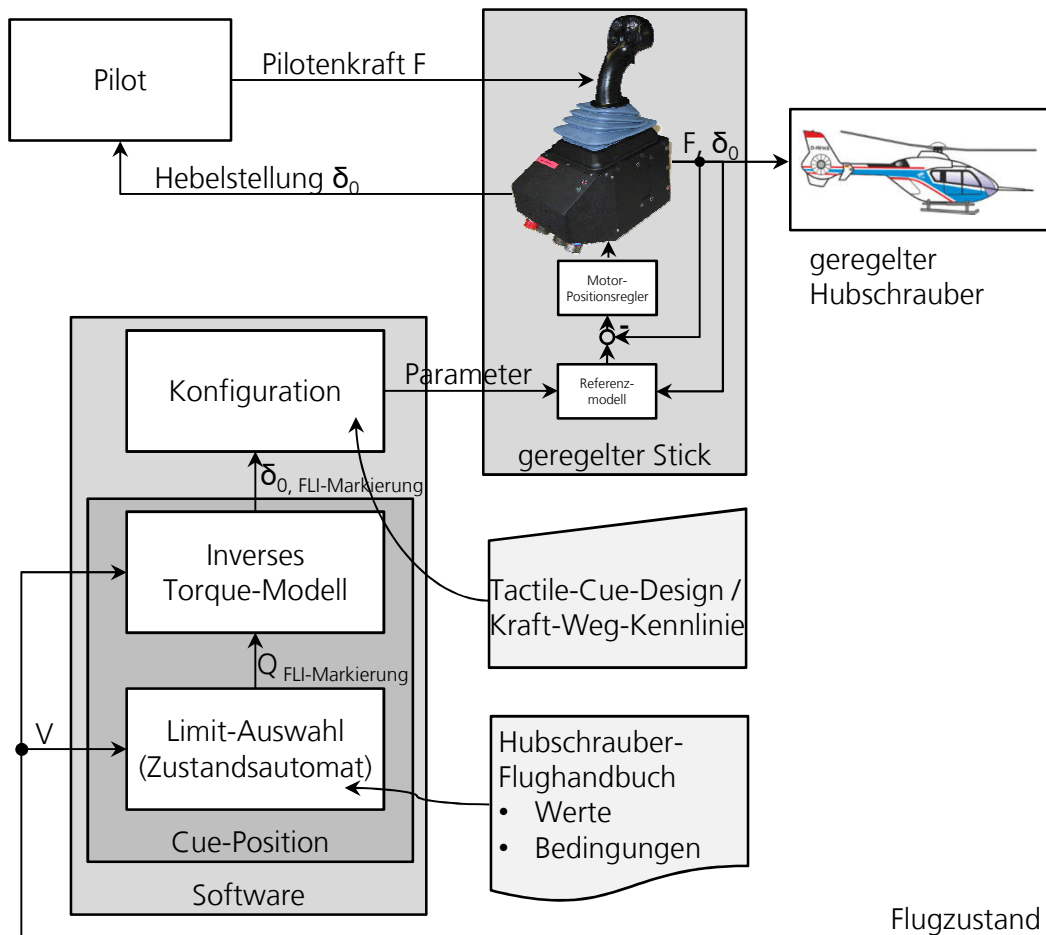


Abbildung 4.1.: Systemkomponenten der Torque-Protection

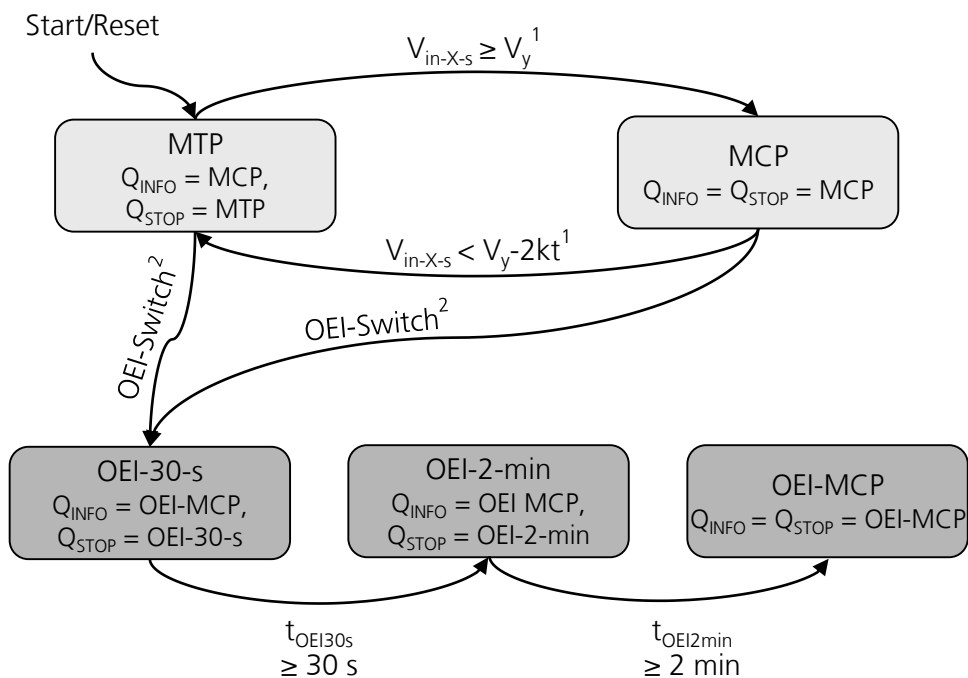
Anforderungen: Zum einen wird eine hohe Präzision gefordert, zum anderen soll sich das *Tactile Cue* möglichst wenig bewegen, da Piloten dies irritierend finden würden, was aus Vorversuchen bekannt ist. Ein Prädiktor ermöglicht, dass das *Tactile Cue* „immer schon da ist“, d.h. an der mit dem Torque-Limit korrespondierenden stationären Steuerposition „wartet“. Die *Tactile Cue*-Position wird nicht durch die Bewegung des Steuers beeinflusst. Die Position des *Tactile Cues* wird dann lediglich durch die Kompensation der äußeren Einflüsse verändert, siehe Abschnitt 4.4.

Schließlich erfolgt die Konfiguration des aktiven Steuerorgans zur haptischen Darstellung eines gewünschten *Tactile Cue*-Designs an den zuvor berechneten *Tactile-Cue-Positionen*. Die Konfiguration wird als Parametersatz an den aktiven Sidestick gesendet. Das Design geeigneter *Tactile Cues*-Formen und deren Erprobung ist Teil der im Rahmen dieser Arbeit durchgeführten Studien und wird in den nachfolgenden Kapiteln 5, 6 und 7 beschrieben.

4.3. Zustandsautomat zur Auswahl der geltenden Torque-Limits

Die Aufgabe des Zustandsautomaten ist es, die jeweils gültigen Torquewerte für das „rote“ Limit Q_{STOP} und den „gelben“ Torque-Info-Bereich Q_{INFO} gemäß der geltenden Bedingungen und Einflussfaktoren auszugeben, siehe Abschnitt 3.3.

Die Abbildung 4.2 zeigt die verschiedenen Zustände und Transitionsbedingungen des in dieser Arbeit implementierten Zustandsautomaten. Im Anfangszustand gilt der Zustand MTP. Darin entspricht das Torque-Limit (Q_{STOP}) dem MTP-Limit und das Q_{INFO} dem MCP. Bei Überschreiten der Fluggeschwindigkeit von V_y , hier 65 kt, gilt der Zustand MCP. Darin wird das Torque-Limit auf MCP reduziert. Dies geht mit einer Verschiebung des *Tactile Cues* auf eine niedrigere Position einher. Damit die *Tactile Cues* bei einer Veränderung des Torque-Limits nicht springen, werden die vom Zustandsautomaten ausgegebenen Werte für die Torque-Info-Bereich und das Torque-Limit langsam überblendet, mit einer Rate von derzeit 10 Torque-%/s. Da zwischen dem MTP-Limit und dem MCP-Limit 9 Torque-% liegen, dauert es ca. eine Sekunde bis sich das *Tactile Cue* auf die neue Position verschoben hat.



¹ Dieses Schema zeigt den in dieser Arbeit umgesetzten Zustandsautomaten. Das Handbuch sieht weitere Bedingungen vor, die zur Vereinfachung weggelassen wurden, bzw. in der Erprobung nicht verwendet wurden, z.B. dass das MTP-Limit nur für 5 min genutzt werden darf.

² Der simulierte Triebwerksausfall kann manuell, z.B. durch den Versuchsleiter oder den Flugversuchingenieur mittels Betätigung eines vor dem Versuchspiloten verborgenen Schalters ausgelöst werden.

Abbildung 4.2.: Zustandsautomat für die Limit- und Konfigurationsauswahl

Damit die Umschaltung rechtzeitig vor Erreichen von V_y abgeschlossen ist, wird eine vorherge-

sagte Geschwindigkeit ($V_{in-\chi-s}$) verwendet, die voraussichtlich unter Beibehaltung der aktuellen Konfiguration innerhalb eines zeitlichen Horizonts t_p erreicht werden wird. Als zeitlicher Horizont wurde zunächst ein Wert von 5,0 s verwendet, jedoch im Verlaufe der Untersuchungen auf 2,5 s reduziert. $V_{in-\chi-s}$ wird im Experimentalsystem aus der aktuellen Geschwindigkeit und weiteren Flugzustandsgrößen, insbesondere der aktuellen Beschleunigung abgeschätzt. Um zu vermeiden, dass der Zustandsautomat bei leichten Variationen der Geschwindigkeit um V_y herum hin- und herspringt, wurde eine Hysterese definiert. Die Umschaltung zurück in den MTP-Zustand erfolgt erst bei Unterschreiten von V_y-2 kt.

Bei Ausfall eines Triebwerks gelten die OEI-Limits. Diese sind zeitlich gestaffelt. In den ersten 30 s darf dem verbleibenden Triebwerk eine höhere Leistung abverlangt werden, das *OEI-30-s-Limit*. Danach erfolgt eine Reduktion auf das *OEI-2-min-Limit* und nach Ablauf weiterer 2 min gilt das OEI-MCP-Limit bis zur Landung des Hubschraubers. Hier wird der simulierte Triebwerksausfall durch Betätigung eines vom EP nicht sichtbaren Schalters am FVI-Sitz ausgelöst, im Diagramm als „OEI-Switch“ gekennzeichnet. Eine erneute Betätigung „repariert“ das Triebwerk und erzeugt eine Transition zurück in den normalen Betrieb.

4.4. Torque-Modellierung (Prädiktor)

Laut der oben definierten Anforderungen, siehe Abschnitt 4.1, soll die *Haptic Torque-Protection* den Piloten nicht nur vor einer Torqueüberschreitung warnen, sondern eine versehentliche Torqueüberschreitung verhindern, aber die volle Ausnutzung des zur Verfügung stehenden Torques ermöglichen. Deshalb ist es erforderlich, dass das *Tactile Cue* genau an der korrekten, d.h. mit den Limits korrespondierenden Steuerpositionen wirksam ist. Dazu bedarf es einer Zuordnung, d.h. eines Modells, welche das Torque-Limit in jene korrespondierende Steuerposition umrechnet. Dies entspricht im Grunde einer Trimmrechnung, bei der die zu einem Wunschflugzustand zugehörigen Steuerpositionen bestimmt und eingestellt werden. Nachfolgend werden die Einflüsse auf den Torque benannt und anschließend ein mathematisches Torquemodell bestimmt bzw. aus der Literatur abgeleitet.

Im Falle der hier verwendeten H135 sind die Torsionsmomente der beiden Triebwerke relevant [119].¹ Diese werden, zusammen mit weiteren Parametern auf der FLI-Anzeige im Cockpit zur Anzeige gebracht, siehe oben. Die Triebwerke stellen den Gesamttorque, bzw. die dazu proportionale Gesamtleistung, für alle Verbraucher des Hubschraubers zur Verfügung. Der größte Beitrag entfällt dabei auf den Hauptrotor.

Da die analytische Lösung des Einflusses der Kollektivsteuerung auf den Rotor-Torque nur in Näherung erfolgen kann und dabei aufwendig und rechenintensiv ist,² soll hier, wie in der Literatur

¹Flughandbuch EC 135 T2+, Quelle nicht öffentlich zugänglich.

²„Entweder man bedient sich analytischer Lösungen für die Blattbewegung und die resultierenden Kräfte mit entsprechenden Vereinfachungen (auch in den induzierten Geschwindigkeiten), um eine - meist rechte gute - erste Näherung zu erhalten. Oder man verwendet eine numerische Lösung der Blattelemententheorie mit beliebigem Grad an Komplexität in den Modellen. In jedem Fall ist eine iterative Lösung der Trimmgleichungen nötig.“[120, S.301]

vorgeschlagen, ein Ersatzmodell des Torques in Abhängigkeit von der Kollektivposition und weiterer, relevanter Parameter approximiert werden [20], [26], [81], [23, S. 664].

Gemäß der Klassifikation der Antwortverhalten von SAHANI AND HORN ist der Zusammenhang zwischen Kollektiv und Torque quasi-stationär, eng. quasi-steady [26, S. 2], [121, S. 373]. Das bedeutet, dass eine Sprungeingabe am Kollektiv nach einer Übergangsphase zu einem neuen stationären Torquewert führt. Damit ist es umgekehrt möglich, eine stationäre Zuordnung der Torque-Limits zu einer korrespondierenden Steuerpositionen am Kollektiv vorzunehmen. Weil die Höhe des sich ergebenden Torques vom Flugzustand und anderen Steuergrößen abhängt, müssen die relevanten Größen dabei mit berücksichtigt werden.

Für die Approximation des Torques in Abhängigkeit vom Kollektivsteuerwinkel, werden in der Literatur unterschiedliche Ansätze genannt. Die verschiedenen Modelle schätzen den Torque auf Basis unterschiedlicher Kombinationen von Eingangsparametern, darunter in jedem Fall die Steuerpositionen von Kollektiv (δ_0) und Pedalen (δ_p) und die Fluggeschwindigkeit (V_{TAS}). Zum einen werden neuronale Netze verwendet [20, S. 3], [26, S. 3], [27, S. 3]. Zum anderen wird ein algebraisches, hier quadratisches Polynom verwendet und mit einem neuronalen Netz verglichen [26, S. 5]. Die erreichte Genauigkeit des Polynoms war zwar geringer als die der neuronalen Netze, dennoch sprach für diesen Ansatz, dass er zum einen weniger rechenintensiv und zum anderen leichter zu validieren sei.

Auch in dieser Arbeit wurde zunächst mit einem sehr einfachen, linearen Polynom gearbeitet. Dieses erwies sich als zu ungenau [31, S. 13]. Aus diesem Grund wurde ein quadratisches Polynom wie in [26] als Ansatz für die eigene Modellbildung gewählt. Weil jenes Modell für die UH-60 entwickelt wurde, musste es für diese Arbeit an den ACT/FHS, der auf einer H135 basiert, angepasst werden. Während die Grundidee eines quadratischen Polynoms dabei erhalten blieb, unterscheiden sich die Modelle in manchen Einflussfaktoren und natürlich in den Zahlenwerten, siehe unten und in [1, S. 3-4].³

Die Systemidentifizierung erfolgte in zwei Schritten. Zunächst wurde anhand „sauberer“ Trimmdaten aus einer genauen Hubschraubersimulation ein plausibles Polynom, bzw. relevante Einflussparameter des Polynoms identifiziert. Danach wurden die Parameter des resultierenden Polynoms mit realen ACT/FHS Flugdaten „gefittet“, d.h. an den ACT/FHS angepasst. Diese Schritte werden nachfolgend beschrieben.

Für den ersten Schritt erfolgte zunächst die Bestimmung einer Matrix von Trimmwerten, die einen weiten Betriebsbereich von Vorwärts- und Vertikalgeschwindigkeiten abdeckte. Dazu wurde die nichtlineare Hubschraubersimulation HOST [122] verwendet, die über ein genaues Modell des ACT/FHS und der Möglichkeit einer automatisierten Durchführung von Trimmrechnungen gemäß einer vorab definierten Liste mit Trimmbedingungen verfügt. Diese Liste bestand aus einem äquidistanten Raster von 51 Horizontalgeschwindigkeiten zwischen 0 und 200 km/h etwa (56 m/s) und 13 Vertikalgeschwindigkeiten zwischen -10 und 10 m/s.

Im nächsten Schritt wurde ein Polynom identifiziert, das den Torque für die Matrix der Trimmrech-

³Eigene Vorveröffentlichung der in diesem Abschnitt dokumentierten Studie. Die dort genannte Auflösung der Formel nach $\delta_{0,max}$ ist jedoch fehlerhaft. Die korrekte Form ist in Abschnitt 4.6 angegeben.

nungen möglichst genau wiedergibt, siehe Gleichung (Gl.) 4.1. Dazu wurde die Systemidentifizierungssoftware FITLAB verwendet [123].⁴ Ausgegangen wurde zunächst von einem allgemeinen quadratischen Polynom mit den Flugzuständen Kollektivsteuer (δ_0) und Fluggeschwindigkeit (V_{TAS}). Bei der Identifizierung wurden zur Vereinfachung alle Terme, deren Beitrag sehr klein war, vernachlässigt.

Diesem Polynom wurde ein linearer Term für den Pedaleinfluss hinzugefügt und die Koeffizienten auf Basis realer Flugdaten des ACT/FHS identifiziert. Dazu wurden zunächst 28 Datensätzen aus archivierten Flugdaten des ACT/FHS ausgewählt. Diese decken einen Bereich von 0 bis 135 kn (≈ 70 m/s) Vorwärtsgeschwindigkeit und 0 bis 3000 ft Höhe ab, siehe Anhang, Abschnitt F.1. Die ausgewählten Daten stammen von möglichst stationären Flugzuständen aus Abschnitten mit horizontalem oder geneigtem Geradeausflug. Zur Berücksichtigung des Umstands, dass der Torque gemäß seiner Dynamik verzögert auf Kollektiv- und Pedaleingaben reagiert, wurden die Kollektiv- und Pedaleingaben jeweils um ein Totzeitglied τ erweitert, dessen Wert zusammen mit den anderen Parametern durch FITLAB geschätzt wurde.

Während der Identifikation zeigte sich, dass das Modell den Torque im Bereich von unterhalb 20 Torque% nicht gut abbilden konnte. Da dieser Bereich weit unterhalb des für die *Haptic Torque-Protection* relevanten Arbeitsbereiches liegt, wurden Torquewerte unterhalb von 20 Torque% in der Parameteridentifizierung ignoriert. Außerdem wurden im Modell Fluggeschwindigkeiten unterhalb von 10 m/s zu Null gesetzt (Gl. 4.2), weil die Messung geringer Geschwindigkeiten durch den Rotorabwind des Hubschraubers ungenau ist. Tabelle 4.2 zeigt die identifizierten Werte.

$$Q_{mod}(s) = \frac{\rho}{\rho_0} \left(\delta_0^2 (q_{\delta_0^2} + q_{V_{TAS}\delta_0^2} V_{TAS}) + \delta_0 (q_{\delta_0} + q_{V_{TAS}\delta_0} V_{TAS} + q_{V_{TAS}^2\delta_0} V_{TAS}^2) + \delta_p q_{\delta_p} + Q_0 \right) e^{-\tau s} \quad (4.1)$$

$$V_{TAS} = \begin{cases} 0, & \text{wenn } V_{TAS} < 10 \text{ m/s} \\ V_{TAS}, & \text{sonst} \end{cases} \quad (4.2)$$

In Abbildung 4.3 wurden zur Veranschaulichung die in den Flugversuchen gemessenen Torque-Werte über den mit dem Modell ermittelten Werten aufgetragen. Das Modell erreicht eine Genauigkeit von ± 2 % für 95 % der verwendeten Daten. Diese Genauigkeit ist hoch genug für eine Demonstration des Prinzips. Für den operativen Einsatz einer *Haptic Torque-Protection* wird vermutlich eine höhere Genauigkeit und dazu ein komplexeres Modell benötigt, das weitere Einflussfaktoren berücksichtigt. Um das Modell zur Bestimmung des zu einem Torquelimit Torque-Limit gehörenden Trimmwerts

⁴FITLAB ist ein am DLR entwickeltes, Matlab basiertes Werkzeug zur Systemidentifizierung, bzw. systematischen Schätzung von Parametern, die ein durch den Nutzer vorgegebenes Modell optimal an gegebene Messdaten anpassen. Dazu verändert FITLAB systematisch die Parameter des Modells, so dass dieses die Messdaten möglichst genau vorhersagt. Dabei wird der Fehler zwischen Modell und Messdaten mit Hilfe von Gütefunktionen minimiert. FITLAB kann sowohl Daten und Modelle im Zeitbereich als auch Frequenzbereich verarbeiten. Dabei kann zwischen verschiedenen Optimierern gewählt werden. Hier wurde ein Gauss-Newton-Verfahren genutzt.

Tabelle 4.2.: Identifizierte Parameter stat. Torquemodell (Gl. 4.1)

Parameter	Wert	Einheit	Std.-Abw. ¹	rel. / %
q_{δ_0}	$5,6440 \cdot 10^{-2}$	—	$1,0503 \cdot 10^{-4}$	0,19
$q_{\delta_0^2}$	$1,3673 \cdot 10^{-2}$	$\%^{-1}$	$2,4183 \cdot 10^{-6}$	0,02
$q_{V_{TAS}\delta_0}$	$5,4339 \cdot 10^{-3}$	$\frac{m}{s}^{-1}$	$8,0401 \cdot 10^{-6}$	0,15
$q_{V_{TAS}\delta_0^2}$	$-4,8150 \cdot 10^{-5}$	$\% \frac{m}{s}^{-1}$	$2,0474 \cdot 10^{-7}$	0,43
$q_{V_{TAS}^2\delta_0}$	$-6,0370 \cdot 10^{-5}$	$\frac{m^2}{s^2}^{-1}$	$1,6425 \cdot 10^{-7}$	0,27
q_{δ_p}	$-1,6640 \cdot 10^{-1}$	—	$1,1795 \cdot 10^{-4}$	0,07
Q_0	$1,8880 \cdot 10^{+1}$	%	$7,2569 \cdot 10^{-4}$	0,00
τ	$1,1482 \cdot 10^{+0}$	s	nicht notiert	

¹ Die Standardabweichung gibt an, wie genau die Schätzung des Parameters ist.
 - „rel“ ist die Standardabweichung im Verhältnis zum Schätzwert. Je kleiner der Wert, desto genauer die Schätzung.

$\delta_{0,max}$ verwenden zu können, muss es noch umgestellt werden, siehe Abschnitt 4.6.

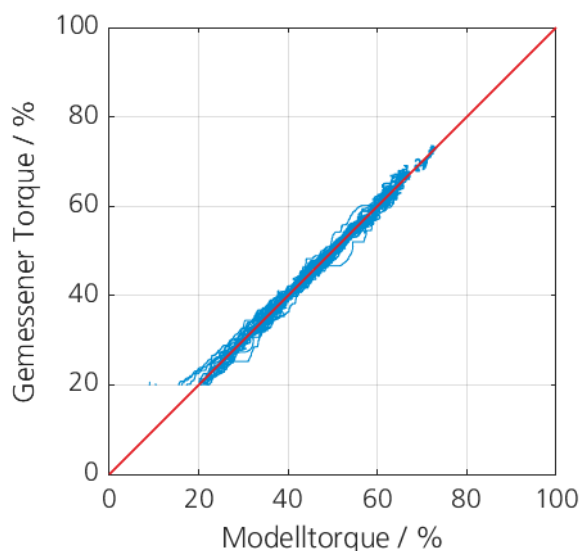


Abbildung 4.3.: Gegenüberstellung gemessener Torque vs. Modell

4.5. Simulator Torquemodell

Zur Ansteuerung der Torque-Anzeige in der Bodensimulation, bzw. dem AVES wird ein realistisches Torquesignal benötigt. Da das dort verwendete flugdynamische Simulationsmodell des ACT/FHS keinen Torque ausgibt, bzw. nicht über diesen Zustand verfügt, sollte im Rahmen dieser Arbeit das hier identifizierte Modell gemäß Gl. 4.1 verwendet werden. Dieses berechnet jedoch nur den stationären Torque und simuliert nicht die Dynamik, bzw. den zeitlichen Verlauf des Torques auf Steuereingaben. Der Zeiger auf der FLI-Anzeige würde sich also ohne Zeitverzug synchron mit

Kollektiv- und Pedaleingaben bewegen. Deshalb wurde es in Näherung um zwei Übertragungsfunktionen, jeweils für Kollektiv- und Pedaleingaben erweitert. Diese wurden aus weiteren Flugdaten, mit entsprechender Steueraktivität, identifiziert. Die Übertragungsfunktion für das Kollektivsteuer wurde mit einem reinen Verzögerungsglied 4. Ordnung (T4) und einem Totzeitglied approximiert (siehe Anhang F Gl. F.1), die Pedale mit einem Verzögerungsglied 1. Ordnung (T1) plus Totzeit (F.2). Tabelle F.1 zeigt die identifizierten Parameter. Für die Kollektivdynamik (Gl. F.1) wurde zunächst eine Totzeit von $\tau_c = 0.65\text{ s}$ identifiziert. Sie wurde später auf $\tau_c = 0.10\text{ s}$ reduziert, nachdem einige Piloten kommentiert hatten, dass die Torqueanzeige zu stark verzögert auf Kollektiveingaben reagieren würde. Die Torque Dynamik Erweiterung erfüllt die Kriterien für Level 1 Flugeigenschaften gemäß ADS-33 [106, S. 82], siehe Abbildung F.2, siehe auch Abschnitt F.2.

4.6. Korrespondierende Steuerposition

Nachdem der Einfluss des Kollektiv-Ausschlags auf den Torque nun durch das mathematische Torquemodell bekannt ist, bedarf es einer Invertierung, um die zu einem Torque-Limit Q_{max} gehörende Steuerposition $\delta_{0,max}$ bestimmen zu können. Die Literatur benennt eine Methode, bei welcher zunächst das Torquemodell genutzt wird, um unter Verwendung der aktuellen Flugzustandsparameter und Steuerstellungen den Modelltorque zu berechnen [26, S. 3]. Nachfolgend kann dann die Torquemarge als Differenz des Modelltorques zum Torque-Limit Q_{max} zu erhalten. Durch Dividieren der Torquemarge durch die aus dem Modell abgeleitete, lokale Steuersensitivität erhalte man dann die Steuermarge. Durch Addition der Steuermarge auf die aktuelle Steuerposition erhalte man $\delta_{0,max}$. Nach einem kurzen Versuch, wurde dieser Ansatz jedoch verworfen, weil das *Tactile Cue* dabei zu viel spürbare Bewegung aufwies, wenn man das Steuer bewegte. Die Ursachen dafür waren wahrscheinlich zum einen, dass dieser Ansatz eine lineare Approximation eines eigentlich quadratischen Verlaufs darstellt. Das bewirkt, dass sich für $\delta_{0,max}$ ein Offset ergibt, der umso größer ist, je größer die Torquemarge ist. Gerade bei schnellen Steuereingaben kann dies aufgrund der begrenzten Aktualisierungsrate, mit der die *Tactile Cueing* Software ausgeführt wird, dazu führen, dass das *Tactile Cue* nacheilt, noch nicht an der richtigen Position ist, während das Steuer diese schon überschreitet. Dies führt dazu, dass $\delta_{0,max}$ zunächst überschritten werden konnte. Das nacheilende *Tactile Cue* bewirkte dann ein spürbare Verschiebung des Sticks in die entgegengesetzte Richtung. Dieser Effekt war zum anderen möglicher Weise auch dadurch stark ausgeprägt, weil zunächst eine vorab bestimmte konstante, mittlere Steuersensitivität, anstatt einer kontinuierlich aus dem Modell bestimmten, lokalen Steuersensitivität genutzt wurde.

Es wurde eine Lösung für die Bestimmung der Position des *Tactile Cue* gefunden, die unabhängig von der aktuellen Steuerposition ist, so dass das *Tactile Cue* „immer schon da ist“. Dies wird durch die vollständige Invertierung des Modells erreicht. Dies ist für ein quadratisches Polynom (gegenüber einem neuronalen Netz) einfach möglich. Bringt man die Modellgleichung (4.1) auf die Normalform (4.3), so lässt sie sich mit der allgemeinen Lösung für eine quadratische Funktion nach δ_0 auflösen, wobei hier das Torquelimit Q_{lim} für Q_{pred} eingesetzt wurde (Gl. 4.4). Die größere von maximal zwei möglichen Teillösungen ist die gesuchte Steuerposition $\delta_{0,max}$, da nur diese im gültigen Wertebereich des Kollektivsteuers, 0 bis 100%, liegt.

$$0 = \delta_0^2 + \delta_0 \frac{\overbrace{(q_{\delta_0} + q_{V_{TAS}\delta_0} V_{TAS} + q_{V_{TAS}^2\delta_0} V_{TAS}^2)}^{p_{pq}}}{q_{\delta_0^2} + q_{V_{TAS}\delta_0^2} V_{TAS}} \quad (4.3)$$

$$+ \frac{\overbrace{\delta_p q_{\delta_p} + Q_0 - Q_{lim} \frac{\rho_0}{\rho}}^{q_{pq}}}{q_{\delta_0^2} + q_{V_{TAS}\delta_0^2} V_{TAS}}$$

$$\delta_{0,max} = -\frac{p_{pq}}{2} \underset{(-)}{+} \sqrt{\frac{p_{pq}^2}{4} - q_{pq}} \quad (4.4)$$

5. Basissystem - Studie 1: Fokus Funktionsnachweis und Arbeitsbelastung

Der Schwerpunkt dieses Kapitels liegt auf der experimentellen Untersuchung der korrekten Funktion der *Haptic Torque-Protection*, bzw. ihrer **Wirksamkeit** hinsichtlich ihrer **Präzision** (wissenschaftliche Frage 1) und ihres Einflusses auf die **Arbeitsbelastung** (wissenschaftliche Frage 2). Dazu werden Versuche im Bodensimulator und auch Flugversuche mit dem ACT/FHS durchgeführt. Daneben werden hier auch die Höhe der auftretenden **Kräfte** bei der Interaktion mit dem *Tactile Cue* (wissenschaftliche Frage 4) und die von den Piloten geäußerten Kommentare zur **Systemakzeptanz** und Systemverbesserung (wissenschaftliche Frage 5) erfasst.

Zunächst wird das *Tactile Cue* Design beschrieben. Daran schließt sich die Untersuchungsmethode an. Schließlich werden die Ergebnisse dargestellt und diskutiert. Die wichtigsten Erkenntnisse werden am Ende zusammengefasst.

5.1. Tactile Cue Design 1

Das *Tactile Cue*-Design richtet sich nach den in Abschnitt 4.1 definierten Anforderungen an die *Haptic Torque-Protection*.

Obwohl die FLI-Anzeige über mehrere Limits, bzw. Arbeitsbereiche verfügt, wurde in dieser ersten Design-Iteration bewusst nur das Torque-Limit zur Darstellung als *Tactile Cue* ausgewählt, um die Komplexität des Systems zunächst gering zu halten. Es gibt hier zunächst nur ein *Tactile Cue* für die Stop-Position $\delta_{0,STOP}$, welches durch das momentan höchste erlaubte Limit angesteuert wird. Das ist hier entweder das MTP-Limit oder das MCP-Limit, siehe auch Tabelle 4.1. Dieses wird gemäß der automatischen Limitauswahl automatisch verschoben, siehe auch Abschnitt 4.3. Für den Info-Bereich und die OEI-Limits werden hier noch keine *Tactile Cues* dargestellt. Hier wurde daher zur Vermeidung unabsichtlicher Überschreitungen und zur Führung der Piloten der bis dato gebräuchliche *Softstop* als *Tactile Cue* gewählt, siehe auch Abschnitt 2.2. Er wird an der aktuellen Stop-Position der Basiskraftcharakteristik überlagert. Dabei handelt es sich um Reibung, eng. *dry friction*, siehe Abbildung 5.1. Die zugehörigen Parameter und ihre Werte stehen in Tabelle 5.1.

Damit gemessen werden kann, welche Kräfte die Piloten bei der Interaktion mit dem *Softstop* naiv

aufbringen, d.h. ohne dass sie aus Rücksicht vor einer versehentlichen Überschreitung Vorsicht walten lassen müssen, wurde der Schwellwert, bzw. die *Softstop*-Höhe hier mit 50 N relativ hoch gewählt. Zur Verbesserung der Wahrnehmbarkeit sollte der *Softstop* so steif wie möglich eingestellt werden. Die Grenze bildete dabei eine mit höheren Steifigkeiten und niedrigeren viskosen Dämpfungen zunehmende Oszillationstendenz, die dann wirksam wird, wenn der Stick in den Wirkbereich des *Softstops* bewegt wird. Zwar lässt sich diese Tendenz durch Erhöhen der viskosen Dämpfung verringern, jedoch empfindet der Pilot diese als störend, wenn sie zu hoch wird. Die eingestellte Kombination aus Steifigkeit und Dämpfung war also letztlich ein Kompromiss aus guter Wahrnehmbarkeit und geringer Oszillationsneigung des *Softstops* und geringer Störung der Dämpfung.

Damit der *Softstop* wirksam wird, muss der Pilot mindestens soviel Kraft aufbringen, damit er ihn spüren kann, bzw. mit ihm in Kontakt kommt. Er muss also leicht in den Gradienten hineinziehen. Daher wurde der *Softstop* bereits etwas vor der berechneten Limitposition $\delta_{0,STOP}$ platziert. Hier wurde auf Basis von Vorversuchen ein Wert von $\delta_{0,comp} = 1\%$, d.h. ca. 1 mm gewählt, dies entspricht bei dem gewählten *Softstop*-Gradienten einer Haltekraft von ca. 12,5 N.

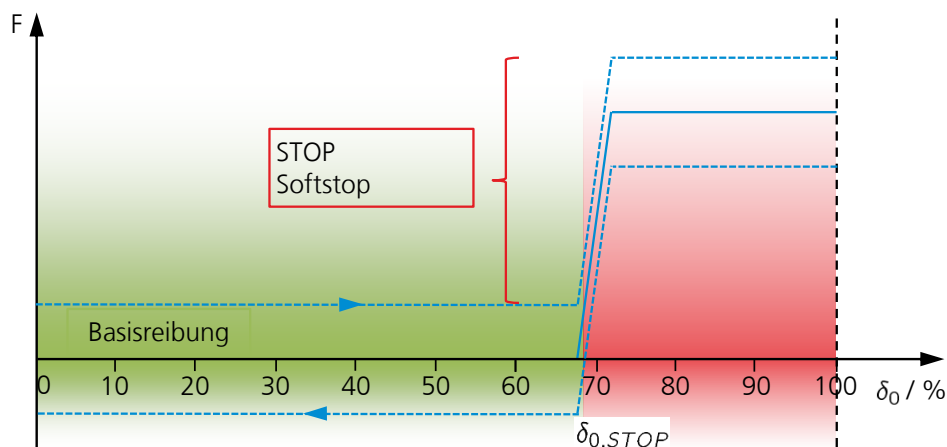


Abbildung 5.1.: **Tactile Cue Design 1: STOP als weicher Softstop**

Tabelle 5.1.: **Parameter Tactile Cue-Design 1**

Basis		$\delta_{0,STOP}$		
Reib.	Dämpf.	Höhe	Weite	Grad.
N	Ns/mm	N	mm (%)	N/mm (N%)
5,0 ¹	0,2 ²	50,0 ¹	4,6 (4,0)	10,6 (12,5)

¹ Kalibrierter Wert, auf ganze Zahl gerundet.

² Viskose Dämpfung.

5.2. Simulator- und Realflugversuch

Die oben genannten Fragestellungen wurden mit Piloten in (Flug-)versuchen mit dem ACT/FHS und dessen Bodensimulation untersucht, siehe Abschnitt 3.1.

5.2.1. Pilotenauswahl

Vier Hubschrauberpiloten haben an der Studie teilgenommen. Diese hatten unterschiedlich viel Flug Erfahrung und brachten in Summe ihr Vorwissen unterschiedlicher Hubschraubermuster und Einsatzbereiche mit ein. Die Piloten 1A und 1C verfügten über eine Testpilotenlizenz und können mit 8900 h, bzw. 5000 h als verantwortliche Hubschrauberführer als sehr erfahren bezeichnet werden. Die anderen beiden Piloten verfügten über eine zivile Berufshubschrauberpilotenlizenz. Pilot 1B hatte zum Zeitpunkt der Studie auch eine militärische Lizenz und verfügte über 2600 h Flug Erfahrung. Die Piloten 1A, 1B und 1C hatten Erfahrung mit vielen verschiedenen Hubschraubermustern, einschließlich solcher, die zwei Triebwerke oder die eine fly-by-wire Steuerung aufweisen, wie z.B. Tiger und ACT/FHS. Pilot 1D hatte mit 190 h auf leichten, konventionell, bzw. mechanisch gesteuerten Hubschraubern mit nur einem Triebwerk die geringste Erfahrung. Weitere Details zur jeweiligen Vorerfahrung der Piloten sind in Anhang A dokumentiert.

5.2.2. Versuchsaufbau

Für den Flugversuch wurde der ACT/FHS genutzt. Die Simulatorversuche fanden in der zugehörigen Bodensimulation, bzw. im ACT/FHS-Systemsimulator statt, siehe Abschnitt 3.1.¹ Die Steuerung erfolgte, in beiden Umgebungen identisch, in der „side-by-side“-Konfiguration und Pedalen, d.h. mit zwei Sidesticks, je einer für die linke und einer für die rechte Hand und Pedalen zur Giersteuerung, wie in Abbildung 3.4 gezeigt. Der linke Sidestick war nach vorne geneigt, so dass seine Anordnung und Betätigungsrichtung der eines klassischen Kollektivhebels näher kam, siehe Abbildung 5.2. Es wurde eine leichte Reglerunterstützung (Stability Augmentation System (SAS)) in den zyklischen Achsen und in der Gierachse aktiviert, dabei gab es keine Turn-Coordination, d.h. keine automatische Steuerung der Gierbewegung.

Die FLI-Anzeige wurde für das MFD nachprogrammiert, siehe Abbildung 5.3. Dadurch war es möglich, die Zeigerpositionen, Werte und Limit-Markierungen gegenüber dem Originaldisplay zu modifizieren, um eine Sicherheits-Marge zu gewährleisten. Grundsätzlich gibt es dazu zwei Möglichkeiten: Entweder können die originalen Werte mit der Marge beaufschlagt werden oder die Limit-Markierungen herabgesetzt. Die Entscheidung fiel auf die letztgenannte Möglichkeit: Die Torque-Werte und Zeigerpositionen auf der nachprogrammierten FLI-Anzeige entsprechen denen der Originalanzeige. Damit wird einer Fehlinterpretation durch den Sicherheitspiloten SP bei einer unwahrscheinlichen, aber möglichen Verwechslung mit dem Originaldisplay durch den

¹ Dieser wurde später durch das neue H135 Cockpit im Simulatorzentrum AVES abgelöst, siehe Studien 2 (Abschnitt 6) und 3 (Abschnitt 7).



Abbildung 5.2.: **Ergonomie linker Sidestick im ACT/FHS, nach vorne geneigt, Arm auf Arm-auflage**

SP vorgebeugt. Diese Maßnahme ist ein Zugeständnis an die relative Nähe der beiden Displays zueinander, siehe Abbildung 5.4. Außerdem können sich der Proband, d.h. hier der Experimentalpilot EP und der SP so leichter über den Torque-Wert verständigen.

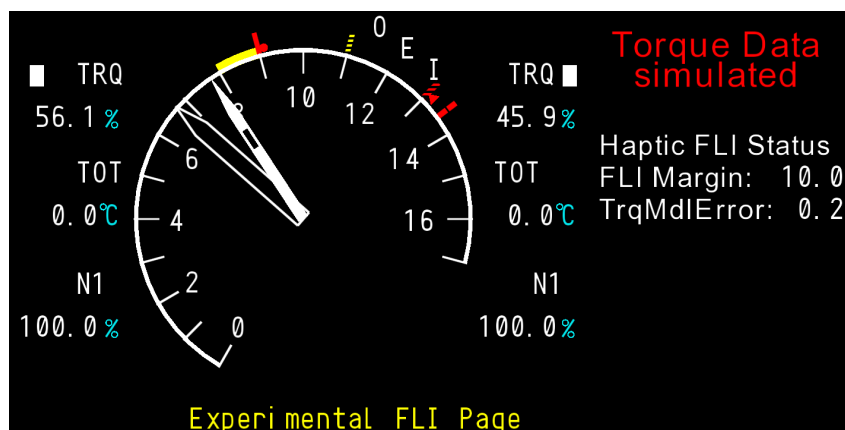


Abbildung 5.3.: **Experimentelle FLI-Anzeige mit verschobenen Markierungen**

Das zum Zeitpunkt dieser Arbeit in der Simulation verwendete Torque-Modell wich zu stark vom realen Verhalten des Torques im ACT/FHS ab, so dass die *Haptic Torque-Protection* mit dem für den ACT/FHS identifizierten Modell damit nicht korrekt funktioniert hätte. Daher wurde in der Simulation das für diese Arbeit identifizierte Torque-Modell, siehe Abschnitt 4.4 als reines Ausgangsmodell zur Ansteuerung der experimentellen FLI-Anzeige implementiert. Weil es sich dabei jedoch um ein statisches Modell handelt, in der Realität aber der Torque und damit die Werte und Zeiger der

FLI-Anzeige nacheilen, wurde das Modell um eine Ersatzdynamik erweitert, siehe Abschnitt 4.5. Zusätzlich wurde es ermöglicht, durch einen Schalter die Signalquelle der Anzeige auszuwählen und zwischen den gemessenen Triebwerksdaten (ACT/FHS) und simulierten Triebwerksdaten (Simulator) umzuschalten. Um eine versehentliche Auswahl der simulierten Daten im ACT/FHS zu verhindern und umgekehrt wurde immer die Warnung „Torque Data simulated“ angezeigt, wenn das Torque-Modell als Signalquelle ausgewählt war (Abbildung 5.3).



Abbildung 5.4.: Originale (mittig, „regular“) und experimentelle (rechts, „experimental“) FLI-Anzeigen im ACT/FHS-Cockpit

5.2.3. Flugaufgabe

Für die Auswahl und Gestaltung der Evaluationsmanöver wurden die folgenden Anforderungen definiert. Das Manöver soll es erfordern, längere Zeit am Torque-Limit zu operieren, um zu überprüfen, wie gut dies ohne und mit der *Haptic Torque-Protection* möglich ist. Es soll den Moment der Kontaktaufnahme zum Limit, bzw. zum *Tactile Cue* beinhalten, um die dabei auftretenden Kräfte messen zu können. Außerdem sollte es einen Wechsel des Torque-Limit von MTP nach MCP beinhalten. Es soll zudem im ACT/FHS ohne einen besonderen Versuchsaufbau, bzw. eine besondere Teststrecke durchführbar sein. Zudem sollte es sich um plausible Manöver mit Einsatzbezug handeln, um die *Haptic Torque-Protection* unter möglichst realistischen Bedingungen und Anforderungen erproben zu können. Zur Abdeckung dieser Anforderungen wurden zwei Start- bzw. Steigmanöver unterschiedlicher Komplexität entwickelt. Das *Fog-Departure-Manöver*-Mission Task Element (MTE) und das *Whiteout-Escape-Manöver*-MTE, siehe unten.

Whiteout-Escape-Manöver

Der Zweck des *Whiteout-Escape-Manövers* ist es, bei den ersten Anzeichen eines plötzlich, bzw. unvorbereitet auftretenden Whiteouts so schnell wie möglich zu steigen, bevor der Hubschrauber von der Schneewolke eingehüllt ist. Damit soll der sehr wahrscheinliche Orientierungsverlust durch eingeschränkte Sicht und das dadurch erhöhte Risiko einer Kollision vermieden werden. - Ein Whiteout bezeichnet den vollständigen oder teilweisen Sichtverlust durch aufgewirbelten Schnee.

Beim Hovern und im Langsamflug kommt es zur Rezirkulation des Rotorabwinds, welcher in Bodennähe Schnee- oder Staubpartikel mit aufwirbelt und in einer donut-, bzw. torusförmigen Wolke festhält, die den Hubschrauber vollständig umgibt. Dadurch kann die Sicht so stark eingeschränkt werden, dass ein sicheres Stabilisieren des Hubschraubers stark erschwert wird. Dann droht die Gefahr unbemerkt zu drifteten und mit umstehenden Hindernissen zu kollidieren. Bei drohendem Orientierungsverlust ist es daher angebracht, schnell aus der Wolke herauszusteigen. - Das Manöver wurde aber sowohl im ACT/FHS als auch im Simulator bei klarer Sicht geflogen. Hier wurde aus dem stabilisierten Schwebeflug gestartet. Das Manöver ist in Abbildung 5.5 illustriert und zugehörigem Pilotenbriefing beschrieben.

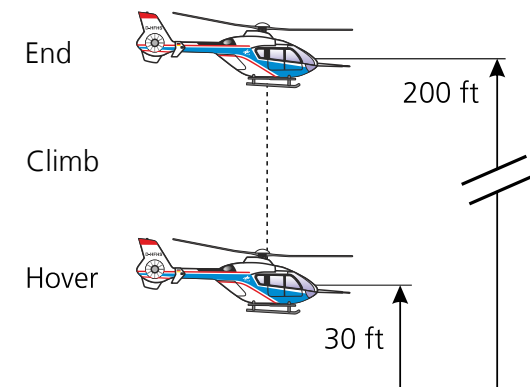


Abbildung 5.5.: **Whiteout-Escape-Manöver**

Briefing Whiteout-Escape-Manöver

1. Hover: Anfangszustand
 - Hover,
 - 30 ft AGL (=Above ground level).
2. Climb: Vertikales Steigen
 - Roll- und Nickwinkel halten (wings level).
 - Heading innerhalb ± 10 deg halten.
 - Maximale Leistung, bzw. maximal zulässigen Torque verwenden.
3. End: 200 ft AGL

Fog-Departure-Manöver

Das *Fog-Departure-Manöver* ist ein VFR-Start-Manöver, welches zum Durchbrechen des Bodennebels unter Sichtbedingungen genutzt werden kann, siehe Abbildung 5.6 und zugehöriges Pilotenbriefing. Das Ziel ist es, die Distanz, die im Nebel zurückgelegt wird, zur Reduktion des Kollisionsrisikos zu

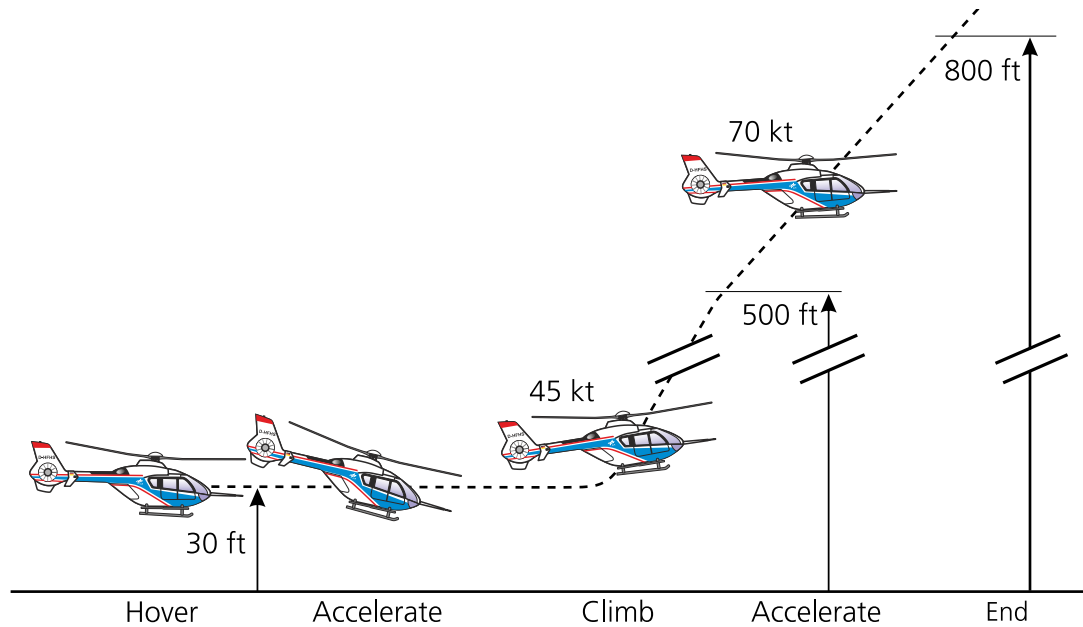


Abbildung 5.6.: **Fog-Departure-Manöver**

Briefing Fog-Departure-Manöver

1. Hover: Anfangszustand

- Schweben (Hover) über der Landebahnschwelle,
- 30 ft AGL, (60 ft AGL für ACT/FHS),
- ausgerichtet über und parallel zur Bahnmitte (center line).

2. Accelerate: Beschleunigen auf 45 kt V_{IAS}^2

- Beschleunigung mit moderatem Tempo aufbauen (ca. 20 deg Nickwinkel),
- Höhe halten,

3. Climb: Steigen auf 500 ft AGL, 45 kt V_{IAS} halten,

4. Accelerate: Beschleunigen auf 70 kt V_{IAS} und gleichzeitig Steigen auf 800 ft AGL

5. End: 800 ft

Anweisung an die Piloten vor jedem Versuchsdurchlauf, eng. run:

- über der Mittellinie bleiben, bzw. Kurs halten,
- Beim Beschleunigen und Steigen die maximale Leistung, bzw. den maximal zulässigen Torque verwenden.

minimieren. Die minimale Distanz beim Steigen wird daher bei der Geschwindigkeit des steilsten Steigens V_x zurückgelegt, auch „Takeoff Safety Speed“ (V_{TOSS}) genannt. Daher besteht die Aufgabe für den Piloten darin, den Hubschrauber auf V_{TOSS} zu beschleunigen und dann mit V_{TOSS} zu steigen. Für die Beschleunigung wird eine hindernisfreie Strecke benötigt. Dies ist entweder eine reguläre Startbahn oder eine andere ausreichend lange Strecke, welche die Crew durch vorheriges Ablaufen auf Hindernisfreiheit überprüft hat. Bei der Beschleunigung benötigt der Pilot eine Sichtreferenz und fliegt daher möglichst tief, so dass er den Boden durch den Nebel sehen kann. Der Steigflug durch den Nebel wird dann ohne Sichtreferenz nach Instrumenten durchgeführt. Nach dem Durchbrechen der Nebeloberkante soll möglichst schnell an Höhe gewonnen werden. Dazu wird auf die Geschwindigkeit des besten Steigens, V_y , beschleunigt. Regulär beträgt diese 65 kt für die H135. Speziell für die Erprobung der hier entwickelten *Haptic Torque-Protection* wurden 70 kt gewählt, um die Transition vom MTP-Zustand auf den MCP-Zustand abzudecken, die bei 65 kt erfolgt. Die Zielgeschwindigkeit liegt dabei 5 kt höher als die Umschaltgeschwindigkeit. Damit wird vermieden, dass die Torque-Protection wegen ungenauer Messwerte oder leichter Abweichungen von der Zielgeschwindigkeit ständig hin- und herschaltet. Tatsächlich stellt dies eine Eigenschaft der derzeitigen Implementierung dar, die verbessert werden sollte, siehe auch Abschnitt 5.3.1 im Ergebnisteil.

5.2.4. Versuchsdurchführung

Die Piloten wurden darüber aufgeklärt, dass die Teilnahme freiwillig ist und jederzeit beendet werden kann sowie darüber, dass die erfassten Mess- und Videodaten wissenschaftlich verwendet werden. Alle Piloten unterschrieben darüber eine Einverständniserklärung.

Es konnte wegen der limitierten Verfügbarkeit des ACT/FHS nur ein kompletter Versuch mit beiden Manövern im Realflug von einem Versuchspiloten (1B) durchgeführt werden. Derselbe Pilot stand auch für eine Wiederholung des Versuchs in der Bodensimulation zur Verfügung. Zudem haben drei weitere Piloten den gesamten Versuch im Bodensimulator durchgeführt. Die Versuche fanden für jeden Piloten an einem anderen Tag statt. Jeder Versuch bestand aus vier Testpunkten: Jedes der beiden Manöver wurde zunächst in der Referenzkonfiguration ohne *Tactile Cue* (TCoff) und dann mit *Tactile Cue* geflogen (TC^{STOP}). Begonnen wurde immer mit dem *Fog-Departure-Manöver* gefolgt vom *Whiteout-Escape-Manöver*. Vor jedem Versuch, bzw. nach jedem Konfigurationswechsel konnten die Piloten das Manöver mindestens einmal trainieren. Danach wurden jede Wiederholung eines Manövers, engl. *runs*, aufgezeichnet. Nach jeder Wiederholung wurde der Pilot gefragt, ob er noch einmal wiederholen möchte und dadurch eine Verbesserung erwartet. Gerade am Anfang, in der Konfiguration ohne *Tactile Cueing* brauchten die Piloten einige Wiederholungen, um sich an die neue Steuerung mit dem Sidestick zu gewöhnen. Da dieser über einen, gegenüber dem gewohnten Kollektivhebel, kurzen Steuergriff verfügte, war auch die Steuersensitivität höher, siehe Abschnitt 5.3.4. Nach der letzten Manöverwiederholung eines Testpunkts, wurde jeder Pilot gebeten den NASA-TLX Fragebogen für die soeben geflogene Konfiguration auszufüllen. Weitere Details, etwa zu der Anzahl der durchgeführten Wiederholungen, befinden sich im Anhang, Abschnitt B.1.

²Übertragungsfehler: Gemäß H135 Handbuch gilt eigentlich $V_{TOSS} = 40$ kt. Dies hat jedoch keinen Einfluss auf die Untersuchung.

Aus Sicherheitsgründen wurden beide Manöver mit dem ACT/FHS bei guten Sichtbedingungen, d.h. unter Visual Meteorological Conditions, dt. Sichtflugbedingungen (VMC), ohne natürliche oder künstliche Sichteinschränkungen geflogen. Die Piloten wurden jedoch gebrieft, sich die Whiteout-Situation vorzustellen. Aus Konsistenzgründen wurde auch im Simulator keine Nebel- oder Whiteout-Sichtbedingungen simuliert. Während der Evaluationen wurde der Hubschrauber mit zwei aktiven Sidesticks und Pedalen gesteuert (siehe oben). Ein SAS, d.h. ein Regler mit einfacher Ratenrückführung für die Längs-, Quer- und Giersteuerung war während der Versuche aktiv. In beiden Konfigurationen war die FLI-Anzeige eingeschaltet.

Weil bei der Torquemodellierung von einer konstanten Rotordrehzahl ausgegangen wurde, wurde im Flugversuch, anders als beim Takeoff üblich, die „High Nr“ Funktion deaktiviert und stattdessen mit nomineller Rotordrehzahl geflogen, damit das Modell den Torque korrekt abbilden kann. Die „High Nr“ Funktion dient der temporären Erhöhung der Rotordrehzahl beim Start.

Das *Tactile Cue* hatte sich während des *Fog-Departure-Manöver* mit dem ACT/FHS bereits zu früh für einen kurzen Zeitraum nach unten bewegt. Weil vermutet wurde, dass dies auf den, relativ groß gewählten, Vorhersagehorizont im Zustandsautomaten lag, wurde dieser zwischen den Versuchen variiert, etwa von $t_p = 5\text{ s}$ auf $2,5\text{ s}$. Dies führte dann in einigen Fällen dazu, dass die Reduktion des Torque-Limits zu spät erfolgte, siehe auch Abschnitt 5.3.1. Dieser Zielkonflikt rechtzeitiger Limitreduktion und potentiell „Fehlalarms“ lässt sich bei Verwendung einer vorhergesagten Geschwindigkeit als Trigger für die diskrete Zustandsumschaltung nicht zufriedenstellend lösen.

5.2.5. Datenerhebung und -Auswertung

Gemäß Untersuchungszielen, wurden verschiedene quantitative und qualitative Daten erhoben. Das waren insbesondere die subjektiv empfundene Arbeitsbelastung sowie der Flugzustand und die Steuerkräfte. Die Datenauswahl und Auswertemethodik werden nachfolgend erläutert.

Arbeitsbelastung

Zur Bestimmung der Arbeitsbelastung des Menschen gibt es verschiedene Verfahren. Darunter sind nach REHMANN [124]: 1. Die Abfrage der subjektiv empfundenen Arbeitsbelastung; 2. Die Erfassung und Bewertung physiologischer Daten, wie die Herzrate, Muskelaktivität, der Sauerstoffverbrauch oder auch der Pupillendurchmesser; 3. Das Schlussfolgern aus der erzielten Leistung, engl. *performance*. Die Ermittlung physikalischer Parameter ist objektiv, aber mit einem relativ hohen technischen Aufwand verbunden, da zusätzliche Messgeräte in den Versuchsaufbau integriert werden müssen. Diese müssen kalibriert werden und die Probanden müssen ausgerüstet, z.B. verkabelt werden. Ebenda wird aber auch fest gehalten, dass es subjektive Verfahren gibt, die leicht zu implementieren sind und dabei auch ein moderates bis hohes Maß an Reliabilität und Einsicht ermöglichen, [124, S. 7-8]. Bei diesen Verfahren werden die Probanden gebeten, die empfundene Arbeitsbelastung auf der Basis normierter Fragebögen und Skalen selbst einzuschätzen. Zu den bekanntesten Verfahren zählt der NASA Task Load Index (TLX), welcher in den 1980er

Jahren von *Hart und Staveland* [125] bei der am NASA Ames Research Center entwickelt wurde oder das *Bedford-Workload-Rating*-Schema nach *Roscoe und Ellis* [126]. In dieser Arbeit wird das NASA-TLX-Schema verwendet, das gegenüber dem *Bedford*-Schema multidimensional ist. Es wird verwendet, um verschiedene Verfahren oder Hilfsmittel zur Bewältigung einer Aufgabe miteinander zu vergleichen, etwa Konfigurationen mit *Tactile Cueing* mit einer Referenzkonfiguration ohne *Tactile Cueing*. Per Fragebogen werden dazu sechs unterschiedliche Arten von Arbeitsbelastung abgefragt: 1. die mentale Anforderung, engl. *mental demand*, 2. die physische Anforderung, engl. *physical demand*, 3. die zeitliche Anforderung, bzw. der empfundene Zeitdruck, engl. *temporal demand*, 4. die Zufriedenheit mit der erbrachten Leistung, engl. *performance*, 5. die empfundene Anstrengung, engl. *effort* und letztlich 6. die Frustration, engl. *frustration*. Jeder Kategorie ist eine gleich lange, nicht unterteilte Skala zugeordnet. Die gegenüberliegenden Enden aller Skalen sind mit den gegensätzlichen Extrema der Antwortmöglichkeiten beschriftet: *very low* - *very high*, bzw. *perfect* - *failure* für die Kategorie *performance*. Der Proband kreuzt lediglich an, wo er die zuvor empfundene Arbeitsbelastung in den unterschiedlichen Subskalen relativ zu den Extrema an den Skalen-Enden verortet. Ein zweiter Fragebogenteil dient der Gewichtung der unterschiedlichen Kategorien. Dazu sind alle oben genannten Kategorien paarweise gegenübergestellt, so dass sich für die sechs Kategorien insgesamt 15 Paarungen ergeben.

Der Proband kennzeichnet jeweils die Kategorie, die er für die zuvor bewertete Aufgabe als wichtiger empfunden hat. Die Gewichtung der einzelnen Kategorien ergibt sich aus den Anzahl der Unterstreichungen pro Kategorie. Die Berechnung des TLX erfolgt gemäß Anleitung der Entwickler, [125, S. 39], wie folgt: Zunächst wird das Summenprodukt aus der in im ersten Teil abgegebenen Bewertung und der Anzahl der Unterstreichungen der jeweiligen Kategorie berechnet und dann durch die Anzahl (15) der paarweisen Vergleiche geteilt. Der sich dadurch ergebende TLX-Wert ist auf die Skala von 0 (keine Arbeitsbelastung) bis 100 (Überlastung) beschränkt.

Flugmessdaten

Zur Analyse der korrekten Funktion der *Haptic Torque-Protection* und der aufgebrachten Kräfte sowie zur Kontrolle der korrekten Ausführung der Manöver wurden für jeden *run* die gemessenen, bzw. simulierten Flugdaten aufgezeichnet. Darunter sind insbesondere die Fluggeschwindigkeit und -höhe, die Steigrate und die Sidestick-Steuerpositionen und -kräfte relevant für die nachfolgende Auswertung.

Die Daten wurden zunächst gemäß der folgenden gewählten, einheitlichen Kriterien für die anschließende Auswertung getrimmt. Dies war erforderlich, weil die Datenaufzeichnung bereits vor dem Beginn des Manövers gestartet und erst nach Abschluss des Manövers beendet wurde. Außerdem wurde das Manöver in einzelnen Fällen auch bereits etwas vor Erreichen der definierten Kriterien vom Piloten beendet.

Zur Verdeutlichung werden unten exemplarisch die Zeitschriebe für die ACT/FHS-Flüge dargestellt, jeweils vergleichend mit *Tactile Cue* gegenüber dem Referenzfall ohne *Tactile Cue*, siehe Abbildungen 5.7 und 5.8. Die Auftragung beginnt 1 s vor dem oben definierten Beginn des Manövers. Alle anderen Zeitschriebe befinden sich in Anhang, Abschnitt B. Zunächst wurden für beide Manöver

die Kollektiv-Steuerkraft F_0 zusammen mit der Reibungskraft F_{Fric} aufgetragen (1. Zeile). Des Weiteren wurde die Kollektiv-Steuerposition δ_0 sowie die *Softstop*-Position $\delta_{0,STOP}$ dargestellt (2. Zeile). Dabei wurde der Kalibrierfaktor (siehe Tabelle E.1 im Anhang) bereits mit eingerechnet. Auch der gemessene Torque Q , der Prädiktor-Torque Q_{pred} sowie der Verlauf des Torquelimits Q_{STOP} und des Transientenlimits Q_{TRANS} wurden aufgetragen (3. Zeile). Um die verschiedenen Flugphasen voneinander unterscheiden zu können, wurde die Höhe über Grund H und die Steigrate H' dargestellt (4. Zeile). Zusätzlich wurde hier auch die Zielhöhe angegeben. Da die Piloten bei unterschiedlichen Höhen gestartet waren, wurde diese individuell berechnet, als Summe aus der Starthöhe und der geforderten Höhen-Differenz von 150 ft. Für die Phasenunterteilung beim *Fog-Departure-Manöver* war zudem noch die angezeigte Fluggeschwindigkeit V_{IAS} relevant, welche zusammen mit der Zielgeschwindigkeit V_{Target} in einer weiteren Zeile aufgetragen wurde (5. Zeile). Neben der gemessenen Höhe und Geschwindigkeit werden auch die jeweiligen Manöver Referenzwerte angegeben.

Die Manöverzeit war im ACT/FHS grundsätzlich etwas länger als im Simulator, da der simulierte Hubschrauber leichter war und durch die höhere spezifische Leistung höhere Steigraten erreicht werden konnten.

Das *Whiteout-Escape-Manöver* beginnt mit dem letzten Anheben des Kollektivsteuers und endet bei einem Höhengewinn von 180 ft. Beim *Fog-Departure-Manöver* haben sich die Piloten unterschiedlich verhalten. Manchmal wurde zuerst die Leistung erhöht, d.h. am Kollektiv gezogen, manchmal wurde zuerst die Beschleunigung begonnen. Als Kriterium für den Beginn wurde daher das frühere der beiden Ereignisse gewählt, entweder der Zeitpunkt 2 s vor dem Einsetzen der Beschleunigung oder der Moment, in dem das Kollektivsteuer angehoben wurde. Als Ende wurde das Erreichen einer Übergrundhöhe von 400 ft gewählt.

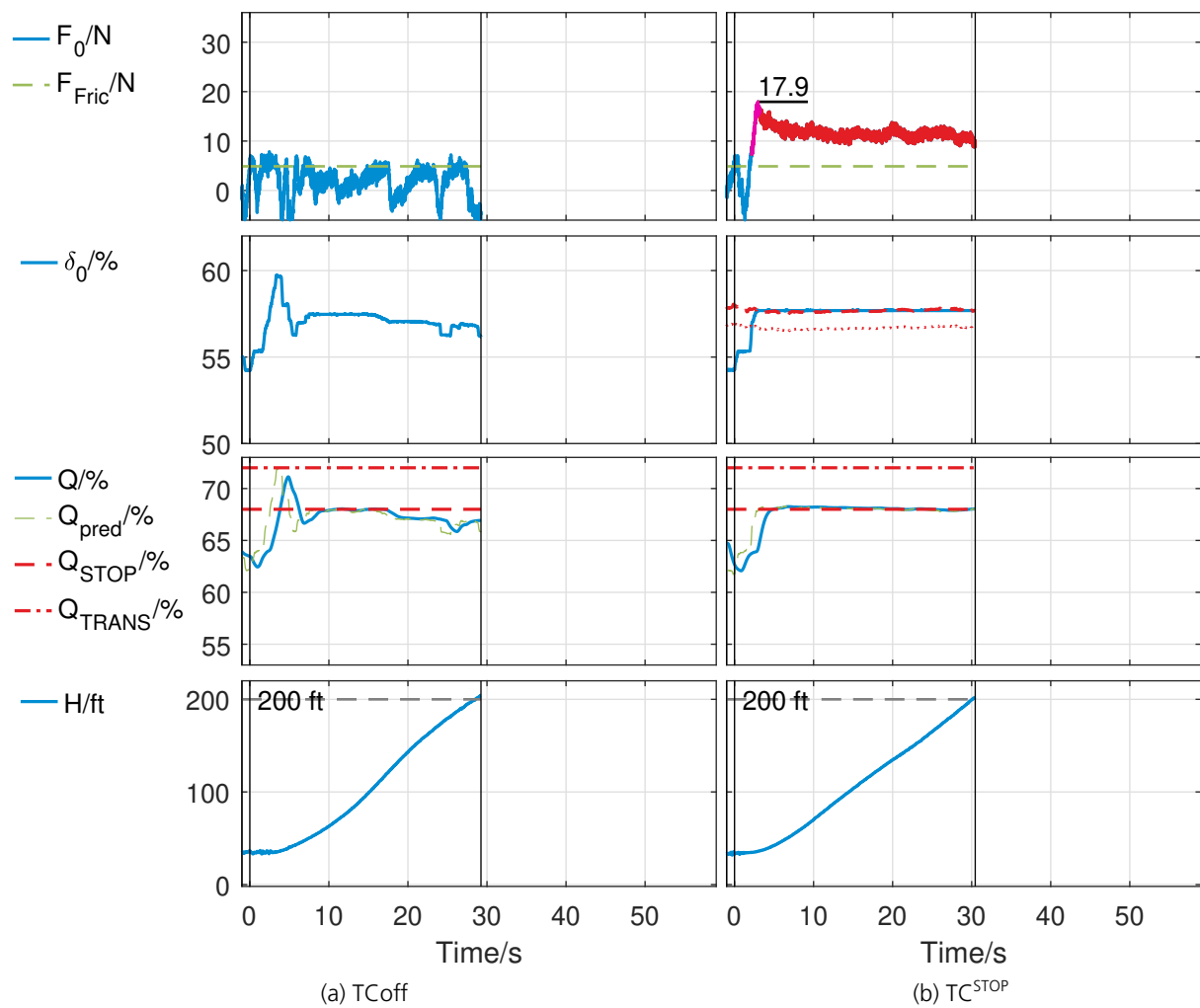


Abbildung 5.7.: Messdaten Whiteout-Escape-Manöver (hier Pilot 1B-ACT/FHS, Weißraum wegen konsistenter x-Achsen Skalierung wie nachfolgende Abbildung)

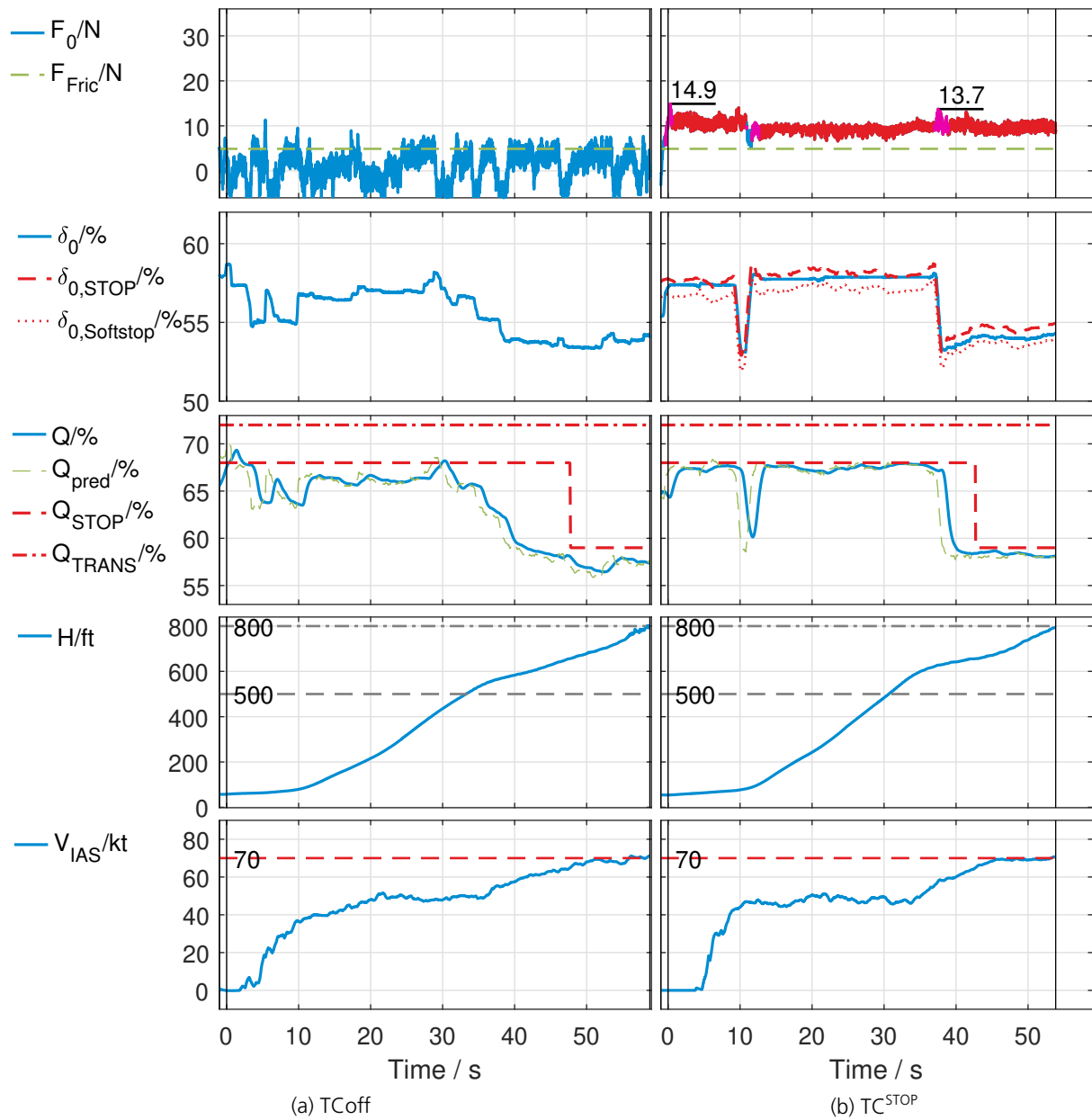


Abbildung 5.8.: Messdaten Fog-Departure-Manöver (hier Pilot 1B-ACT/FHS)

5.3. Ergebnisse und Diskussion

Nachfolgend werden Ergebnisse des Versuchs in Bezug auf die in dieser Studie relevanten wissenschaftlichen Fragestellungen dargestellt und diskutiert. Dies sind Präzision, Arbeitsbelastung, Kräfte und subjektive Pilotenbewertung. Die Einordnung der Ergebnisse in den Gesamtkontext dieser Arbeit erfolgt zusammen mit den anderen Studien im Abschnitt 8.

5.3.1. Präzision: Limiteinhaltung und -ausschöpfung

Ein Kriterium zur Bewertung der *Haptic Torque-Protection* ist die erreichte Präzision in Bezug auf das Torque-Limit. Sie beschreibt, wie gut das Torquelimit eingehalten und wie viel der zur Verfügung stehenden Leistung ausschöpft werden konnte. Idealerweise sollte es dabei mit der *Haptic Torque-Protection* überhaupt keine Überschreitungen des gültigen Torquelimits gegeben haben, zudem sollte sich der Torque möglichst lange möglichst nahe am Limit befunden haben. Man erkennt bereits in den Zeitschrieben des gemessenen Torques, dass es sowohl mit als auch ohne *Haptic Torque-Protection* Überschreitungen und Unterschreitungen gab, siehe jeweils dritte Zeile in den Abbildungen 5.7 bis 5.8 für die Zeitschriebe der ACT/FHS-Erprobung sowie im Anhang, Abschnitt B für alle anderen.

Für den quantitativen Vergleich zwischen den Konfigurationen dient die folgende Aufbereitung der Daten. Dazu wurde die Differenz ΔQ zwischen dem gemessenen Torque und dem aktuell gültigen Torque-Limit betrachtet. Ein negativer Wert entspricht einer Unternutzung, ein positiver einer Überschreitung. Zur besseren Vergleichbarkeit wurde ΔQ in Form der kumulativen Verteilungsdichte aufgetragen, eng. Cumulative Distribution Function (CDF)³, jeweils für alle vier Piloten und beide Konfigurationen, sowohl für die Simulatorversuche und für Pilot 1B auch für die ACT/FHS-Flugversuche. Die Abbildung 5.9 zeigt die CDF – nicht die zeitlichen Verläufe – des *Whiteout-Escape-Manöver* und Abbildung 5.10 die des *Fog-Departure-Manöver*. Auf der horizontalen Achse ist ΔQ , auf der vertikalen Achse ist die kumulierte zeitliche Dauer aufgetragen. Zusammenfassend wurden die Integrale der Unternutzung A_n , d.h. die Fläche links von 0 und, soweit zutreffend, der Überschreitung A_p , d.h. die Fläche rechts von 0 berechnet. Die Flächen wurden in gelb, bzw. rot hervorgehoben. Bei der Auftragung und Berechnung wurden nur ΔQ kleiner als -19 Torque-% berücksichtigt. Mit der Begrenzung wird der Einfluss des unterschiedlichen Verhaltens der Piloten beim Beginn des Manövers reduziert, wenn sich der Torque noch weit unterhalb des Limits befindet. Manche Piloten lassen sich mehr Zeit, bevor sie an das Limit gehen. Der Wert von -19 Torque-% kommt aus einer Folgestudie und wurde für eine bessere Vergleichbarkeit der Studienergebnisse auch hier verwendet, siehe Abschnitt 7.3.1.

³Die kumulative Verteilungsdichte erhält man durch auf- oder absteigende Sortierung der Daten, hier von ΔQ .

Überschreitungen

Überschreitungen kamen sowohl ohne als auch mit *Haptic Torque-Protection* vor. Im Einzelnen ergibt sich das folgende Bild: Beim *Whiteout-Escape-Manöver* waren die Überschreitungen mit *Haptic Torque-Protection* drei mal geringer als ohne. Der Unterschied des Integrals der Überschreitungen A_p zwischen *Haptic Torque-Protection* zum Referenzfall betrug jeweils: Pilot 1A: 0 zu 1.2 Torque-%s, Pilot 1B-FHS: 2.4 zu 4.3 Torque-%s und Pilot 1D: 0 zu 1.4 Torque-%s. Bei Pilot 1C war die Überschreitung mit *Haptic Torque-Protection* höher als im Referenzfall (4.5 zu 1.9 Torque-%s). In zwei Fällen, bei Pilot 1B-FHS und Pilot 1C, kam es beim *Whiteout-Escape-Manöver* trotz *Haptic Torque-Protection* zu Überschreitungen. Diese waren gering, hielten aber fast kontinuierlich an. In Bezug auf die Limitdefinition des verwendeten Hubschraubermusters können sie vernachlässigt werden, da sie unterhalb der Schwelle des sogenannten „Transient Limits“ lagen, siehe Abschnitt 3.3. Nichtsdestotrotz hätte die *Haptic Torque-Protection* auch diese Überschreitung vermeiden sollen. Die Diskussion der Ursachen und möglicher Schritte zur Behebung erfolgt später in diesem Abschnitt und in 5.3.3.

Beim *Fog-Departure-Manöver* betrug der Unterschied des Integrals der Überschreitungen A_p von *Haptic Torque-Protection* zum Referenzfall jeweils: Pilot 1A: 1.9 zu 3.5 Torque-%s, Pilot 1B-FHS: 0.0 zu 1.4 Torque-%s. In drei Fällen waren die Überschreitungen mit *Haptic Torque-Protection* aber höher: Pilot 1B: 3.1 zu 0 Torque-%s, Pilot 1C: 18.2 zu 15.1 Torque-%s. und Pilot 1D: 0.2 zu 0 Torque-%s. Interessant ist, dass es dabei in zwei Fällen mit *Haptic Torque-Protection* zu Überschreitungen kam, die zwar gering und vernachlässigbar waren, während es im jeweils zugehörigen Referenzfall ohne *Tactile Cue* keine Überschreitungen gab, Piloten 1B und 1D.

Ausschöpfung

Die Ausschöpfung oder der Nutzungsgrad ist umso höher, je niedriger der Wert der Unterschreitung, bzw. Unternutzung ist. Während für die Überschreitungen der Zielwert 0, d.h. keine Überschreitungen, festgelegt werden kann, kann das Integral der Unternutzung bei den hier betrachteten Flugaufgaben auch mit einer *Haptic Torque-Protection* nicht 0 werden. Das liegt daran, dass die Manöver jeweils in einem Trimmzustand begannen, in dem die aktuelle Leistung unterhalb des Limits lag. Selbst wenn der Pilot in diesem Zustand eine sprunghafte Kollektiv-Eingabe bis an das *Tactile Cue* gemacht hätte, hätte es eine kurze Zeit gedauert, bis der Torque das Limit erreicht hätte. Es bleibt also der relative Vergleich, je kleiner der Betrag, desto besser die Nutzung. Die besten Werte ergaben sich hier mit $A_n = -16.3$ Torque-%s für das *Whiteout-Escape-Manöver* und $A_n = -67.3$ Torque-%s für das *Fog-Departure-Manöver*. Beim *Whiteout-Escape-Manöver* wurde der zur Verfügung stehende Torque von drei Piloten mit *Haptic Torque-Protection* besser ausgeschöpft als ohne. Der Unterschied des Integrals der Unternutzung A_n von *Haptic Torque-Protection* zum Referenzfall betrug jeweils (in Torque-%s): Pilot 1A: -24.5 zu -56.9, Pilot 1B: -36.3 zu -65.5, Pilot 1B-FHS: -21.6 zu -34.6 und Pilot 1C: -36.3 zu -40.3. Pilot 1D hingegen nutzte den zur Verfügung stehenden Torque etwas weniger aus: -19.6 zu -16.3. Beim *Fog-Departure-Manöver* war die Ausschöpfung mit *Haptic Torque-Protection* in allen Fällen höher: Pilot 1A: -71.0 zu -140.4, Pilot 1B: -67.3 zu -240.5, Pilot 1B-FHS: -82.0 zu -186.1, Pilot 1C: -151.3 zu -159.0, Pilot 1D: -114.8 zu -257.3.

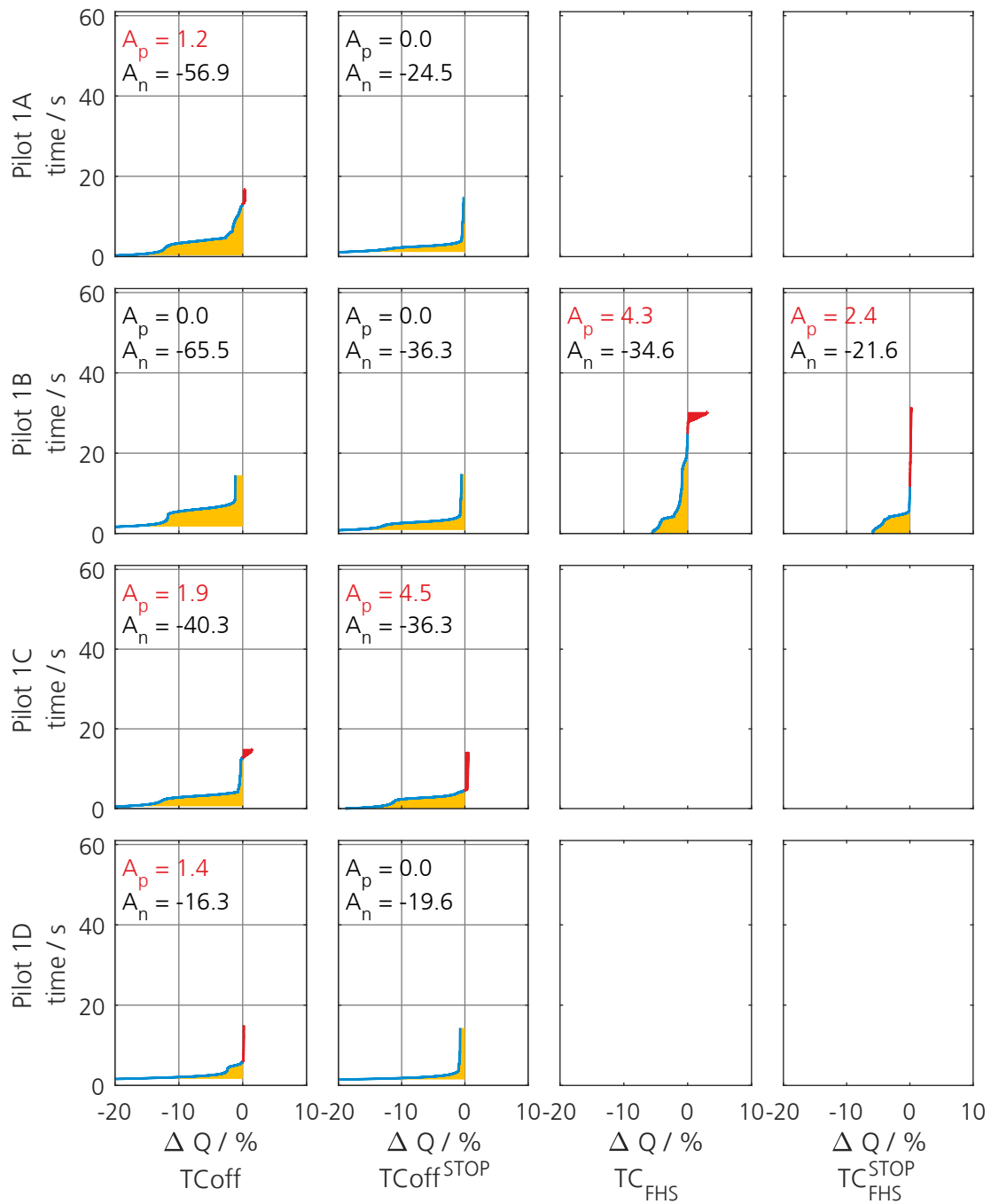


Abbildung 5.9.: **Präzision: Unternutzung (A_n) und Überschreitung (A_p) des verfügbaren Torques für *Tactile Cue-Design 1* während Whiteout-Escape-Manöver (CDF und Integrale, berücksichtigt ab $\Delta Q > -19$ Torque-%)**

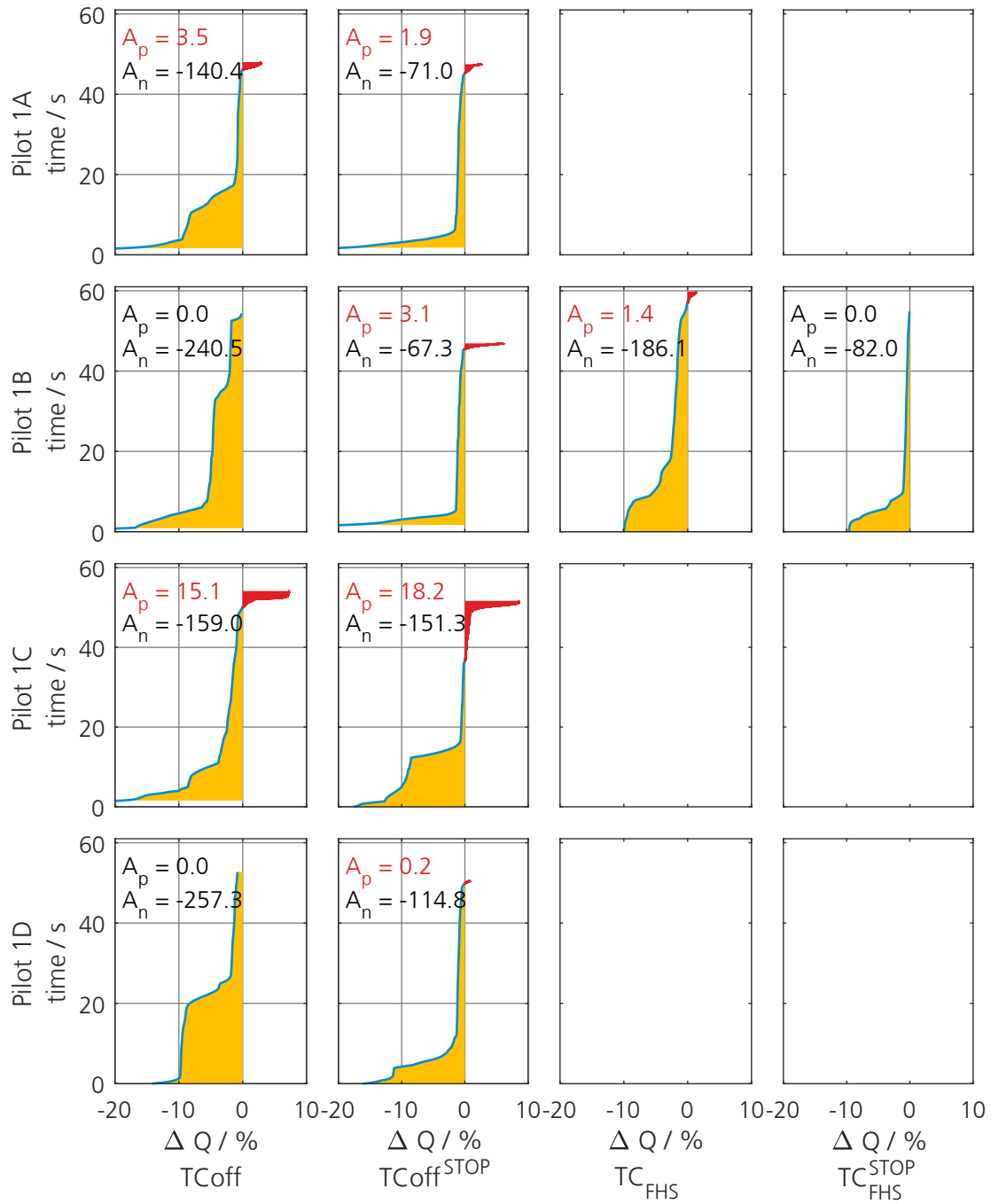


Abbildung 5.10.: **Präzision: Unternutzung (A_n) und Überschreitung (A_p) des verfügbaren Torques für *Tactile Cue-Design 1* während Fog-Departure-Manöver (CDF und Integrale, berücksichtigt ab $\Delta Q > -19$ Torque-%)**

Die *Haptic Torque-Protection* hat insgesamt zu einer besseren Ausschöpfung der zur Verfügung stehenden Leistung geführt. Die dabei aufgetretenen Überschreitungen lagen innerhalb der Spezifikation des Hubschraubers und waren damit tolerierbar. Dennoch wäre es wünschenswert, wenn die *Haptic Torque-Protection* zu gar keinen Überschreitungen mehr führt. Nachfolgend werden die Ursachen und Möglichkeiten zur Verbesserung der Präzision diskutiert.

Ursachen der Unter-/Überschreitungen

Es gibt verschiedene Ursachen für die beobachteten Unter- und Überschreitungen. Darunter ist das Pilotenverhalten zu nennen, die Präzision des *Haptic Torque-Protection*-Systems und des verwendeten *Tactile Cues* und die Art der Interaktion zwischen Pilot und *Haptic Torque-Protection*.

Umschaltzeitpunkt des Limits basierend auf Geschwindigkeitsvorhersage Der wesentliche Einfluß auf die Präzision während des *Fog-Departure-Manövers*, d.h. der Unterschreitungen und Überschreitungen des Torque-Limits lag im Timing der Limitauswahl durch den Zustandsautomaten, der in Abschnitt 4.3 beschrieben wird. Damit der Torque bereits beim Eintreten der jeweils gültigen Bedingung und nicht erst danach unter dem neuen Limit-Wert ist, also bei Erreichung der zu Grunde liegenden Fluggeschwindigkeit, muss bereits rechtzeitig vorher mit der Verschiebung des *Tactile Cues* begonnen werden. Denn die Transition hat eine endliche Dauer und setzt sich aus der Dauer der ratenlimitierten Verschiebung der Stop-Position, etwa 1 s, und der Antwortzeit des Triebwerks, etwa 1-2 s, zusammen. Daher erfolgt die Auswahl des gültigen Torquelimits nicht auf Basis der tatsächlichen Fluggeschwindigkeit, sondern auf Basis einer Fluggeschwindigkeits-Vorhersage (V_{in-x-s}). Der Vorhersagehorizont war jedoch nicht optimal eingestellt: Zunächst war er zu lang. Daher kam es bei Pilot 1B-FHS zu einer zu frühen Limitreduktion (ca. 3 s). Nach einer Korrektur war er etwa zu kurz. So kam es bei den Piloten 1A, 1B, 1C und 1D dadurch zu kurzen Überschreitungen ($< 1-2$ s). Die beobachteten Überschreitungen lagen jedoch unterhalb des MTP und waren daher nicht schädlich für das Triebwerk, da laut Handbuch sogar kurzzeitige Überschreitungen bis 82 Torque-%, also 4 Torque-% oberhalb des MTP für max. 10 s erlaubt sind.

Ein weiteres Problem mit dieser, durch eine Geschwindigkeitsvorhersage getriggerten, Limitreduktion zeigte sich während des *Fog-Departure-Manövers* im ACT/FHS (Abbildung 5.8b). Der *Softstop* bewegte sich hier während der Beschleunigung, bei ungefähr 8 s kurzzeitig nach unten und dann wieder zurück.⁴ Ursächlich war, dass die vorhergesagte Fluggeschwindigkeit zu diesem Zeitpunkt kurz $V_{in-x-s} = v_y = 65$ kt überschritten hatte, obwohl der Hubschrauber die Geschwindigkeit gar nicht erreichte weil der Pilot den Hubschrauber zwischenzeitlich manöverkonform bei 45 kt stabilisierte. Dadurch reduzierte die *Haptic Torque-Protection* das Torque-Limit von MTP kurzzeitig auf MCP und erhöhte dann wieder auf MTP. Entsprechend verschob sich jeweils die *Softstop*-Position.

Die beiden letztgenannten Phänomene zeigen ein inhärentes Problem von Vorhersagen, die letztlich immer mit Unsicherheiten behaftet sind. So gilt die auf Basis des aktuellen Flugzustands geschätzte

⁴Der Pilot hat angemerkt, dass dies störend sei, siehe Abschnitt 5.3.4. Trotzdem war die TLX-Bewertung besser als im Fall ohne *Tactile Cue*, siehe Abbildung 5.12

Geschwindigkeitsvorhersage eben nur, solange sich die sie beeinflussenden Bedingungen während der Vorhersagezeit t_p nicht ändern. Zur Verbesserung wurde daher für die auf den Flugversuch im ACT/FHS nachfolgenden Versuche im Simulator $t_p = 5\text{ s}$ auf $2,5\text{ s}$ reduziert. Es zeigte sich dabei aber, dass die Vorhersagezeit wiederum zu kurz war, bzw. insgesamt sehr ungenau eingehalten wurde. Hier bedarf es eines grundsätzlichen Überdenkens des Umgangs mit diskreten Limitumschaltungen. Einerseits muss die Umschaltung rechtzeitig erfolgen, andererseits darf sie nicht zu früh geschehen. Dieser Konflikt kann aber bei diesen relativ hohen Vorhersagezeiten von mehreren Sekunden nicht zufriedenstellend gelöst werden, weil sich das Pilotenverhalten nicht vorhersagen lässt. Vorteilhafter wäre es in Verbindung mit einer zuverlässigen *Haptic Torque-Protection*, wenn sich das Limit nicht sprunghaft bei einer bestimmten Geschwindigkeit sondern kontinuierlich über einen Geschwindigkeitsbereich verändert. Dies müsste zusammen mit dem Triebwerkshersteller geprüft werden. Eine Alternative bestünde darin, beide Werte gleichzeitig durch verschiedene *Tactile Cues* darzustellen und die Auswahl dem Piloten zu überlassen. Allerdings war die automatische Reduktion des Limits eine von den Piloten favorisierte Eigenschaft der *Haptic Torque-Protection*, worauf ein Pilotenkommentar schließen lässt, siehe Abschnitt 5.3.4.

Pilotenverhalten Die in den Konfigurationen ohne *Haptic Torque-Protection* beobachteten Überschreitungen und Unternutzungen lassen sich ausschließlich durch das Steuerverhalten der Piloten erklären. Manche Piloten machten vorsichtigere Eingaben, d.h. sie ließen sich mehr Zeit, bevor sie an das Limit gingen und fingen im *Fog-Departure-Manöver* früh vor dem Erreichen der Umschaltgeschwindigkeit mit der Reduktion des Torques an. Andere flogen aggressiver, gingen schneller an das Torquelimit und manche überschritten es sogar. Auch reduzierten sie manchmal das Kollektiv und damit den Torque nicht mehr rechtzeitig bevor V_y erreicht wurde und somit nicht mehr das MTP, sondern das niedrigere MCP galt. Mit *Haptic Torque-Protection* hingegen sollte sich der Pilot nur noch um die Kontaktaufnahme am *Softstop* und das Halten daran kümmern. Das Führen am Limit und das Vermeiden von Überschreitungen sollte die Funktion erledigen. Die beobachteten Überschreitungen und Unternutzungen wären dann ausschließlich durch die Funktion bestimmt und sollten wegen der Standardisierung des Manövers weitestgehend identisch für alle Piloten sein. Allerdings gibt es Unterschiede zwischen den verschiedenen Piloten. Das liegt daran, dass diese unterschiedlich schnell an den *Softstop*, bzw. das Torque-Limit gegangen sind. Pilot 1C ging während der Beschleunigungsphase gar nicht bis an den *Softstop*, sondern blieb weit unterhalb des MTP (siehe Abbildung B.16 im Anhang). Auch Pilot 1D blieb während dieser Phase nicht die ganze Zeit am Limit. Dieses zögerliche Handeln führte zu großer Nicht-Ausschöpfung bzw. Unternutzung. Die Tatsache, dass es mit *Tactile Cueing* auch zu (tolerierbaren) Überschreitungen kam, ist ein Indiz dafür, dass die Piloten sich auf das *Tactile Cue* verlassen haben und diesem „blind“ gefolgt sind. Dies spricht für die *Haptic Torque-Protection*, sollte aber zum Anlass für eine Verbesserung der Funktion dienen, siehe unten.

Präzision des Torque-Modells Einen weiteren Einfluss auf die Präzision der *Haptic Torque-Protection* hat die Genauigkeit des Torque-Modells, bzw. dessen Inversion zur Berechnung der Stop-Position. Weil im Simulator der Triebwerkstorque und die *Tactile-Cue-Position* letztlich durch das identische Modell berechnet werden, ist die *Tactile-Cue-Position* immer korrekt. Wie hoch der Beitrag von Toleranzen des Torque-Modells zu den oben bestimmten Abweichungen in den Flugversuchen

war, lässt sich nicht direkt aus den Messwerten bestimmen. Das Problem besteht dabei darin, dass sich das Steuer nicht kontinuierlich auf der vom Prädiktor berechneten Stop-Position befunden hat. Stattdessen kann man aber vergleichen, welchen Wert der Torque-Prädiktor aus der tatsächlichen Steuerposition berechnet und diesen mit den gemessenen Werten vergleichen. Ein Blick in die Abbildungen 5.7 und 5.8 ergibt, dass diese nahe beieinander und in der Größenordnung der bei der Herleitung des Modells bestimmten Fehlertoleranz von ± 2 Torque-% liegen. Für das in dieser Arbeit formulierte Ziel, das Prinzip einer *Haptic Torque-Protection* für die Mensch-Maschine-Interaktion zu untersuchen, ist das Modell ausreichend genau. Für den regulären Einsatz sollte es jedoch noch verbessert werden. Dabei sollte es robust gegenüber weiteren Einflüssen gemacht werden, wie z.B. dem Drehzahleinfluss. Wie in der Versuchsdurchführung beschrieben, siehe Abschnitt 5.2.4, wurde bereits zu Beginn des Flugversuchs ein Unterschied zwischen dem gemessenen Torque und dem Torquemodell festgestellt. Dieser konnte darauf zurückgeführt werden, dass die Piloten am Anfang des Takeoffs standardmäßig die „High Nr“ Funktion verwenden. Hierbei liegt die Rotordrehzahl bei 104 % gegenüber der nominellen Drehzahl, um beim Start einen erhöhten Schub bereit zu stellen. Weil die Rotorblätter dabei einen höheren Strömungswiderstand erfahren, als bei nomineller Drehzahl, steigt dabei auch der Torque. Da bei der Modellierung von einer konstanten Rotordrehzahl ausgegangen wurde, wurde dieser Umstand vom Modell nicht abgebildet. Um die Flugversuche trotzdem abschließen zu können, haben die Piloten die „High Nr“ Funktion deaktiviert, wodurch das Torquemodell den gemessenen Torque wieder gut abgebildet hatte. Für zukünftige Anwendungen sollte das Torquemodell entsprechend überarbeitet und robust gegenüber Drehzahlvariationen gemacht werden.

Man erkennt bereits in den gezeigten Zeitschriften, dass es einen variablen Abstand zwischen der Steuerposition und der *Softstop*-Position gibt. Diese Ungenauigkeit hat eine weitere, systembedingte Ursache und liegt im Zusammenspiel des verwendeten *Tactile Cue* in Form eines *Softstops* mit stark variierenden Pilotenkräften. Sie hatte Einfluss sowohl auf Überschreitungen als auch auf Unterschreitungen während beider Manöver. Diese Ursache wird im Abschnitt 5.3.3 detailliert behandelt.

5.3.2. Arbeitsbelastung

In diesem Abschnitt werden die Ergebnisse der NASA-TLX Evaluation (Beschreibung siehe Abschnitt 5.2.5) für die oben genannten Manöver dargestellt und diskutiert. Dabei geht es darum, die Effekte des *Tactile Cueings* auf die Arbeitsbelastung der Piloten im Vergleich zur Referenzkonfiguration ohne *Tactile Cueing* zu identifizieren.

Die Abbildung 5.11 zeigt die Ergebnisse für das *Whiteout-Escape-Manöver* und Abbildung 5.12 für das *Fog-Departure-Manöver*. Die vier Teilabbildungen (a-d) zeigen jeweils die Bewertungen der Simulatorevaluation, die von allen vier Piloten durchgeführt wurde. Die Teilabbildung (e) stellt jeweils die Ergebnisse der Erprobung im ACT/FHS dar, die von Pilot 1B durchgeführt wurde. In jeder der Teilabbildungen sind die Bewertungen der sechs TLX-Unterkategorien für die *Tactile Cue*-Konfiguration und die Referenzkonfiguration paarweise aufgetragen, zwischen den Polen, links, 0: *very low* und rechts, 100: *very high*, bzw. 0: *perfect* und 100: *failure* in Bezug auf *performance*. Das unterste Balkenpaar zeigt den aus diesen Einzelkategorien und den von den Piloten individuell

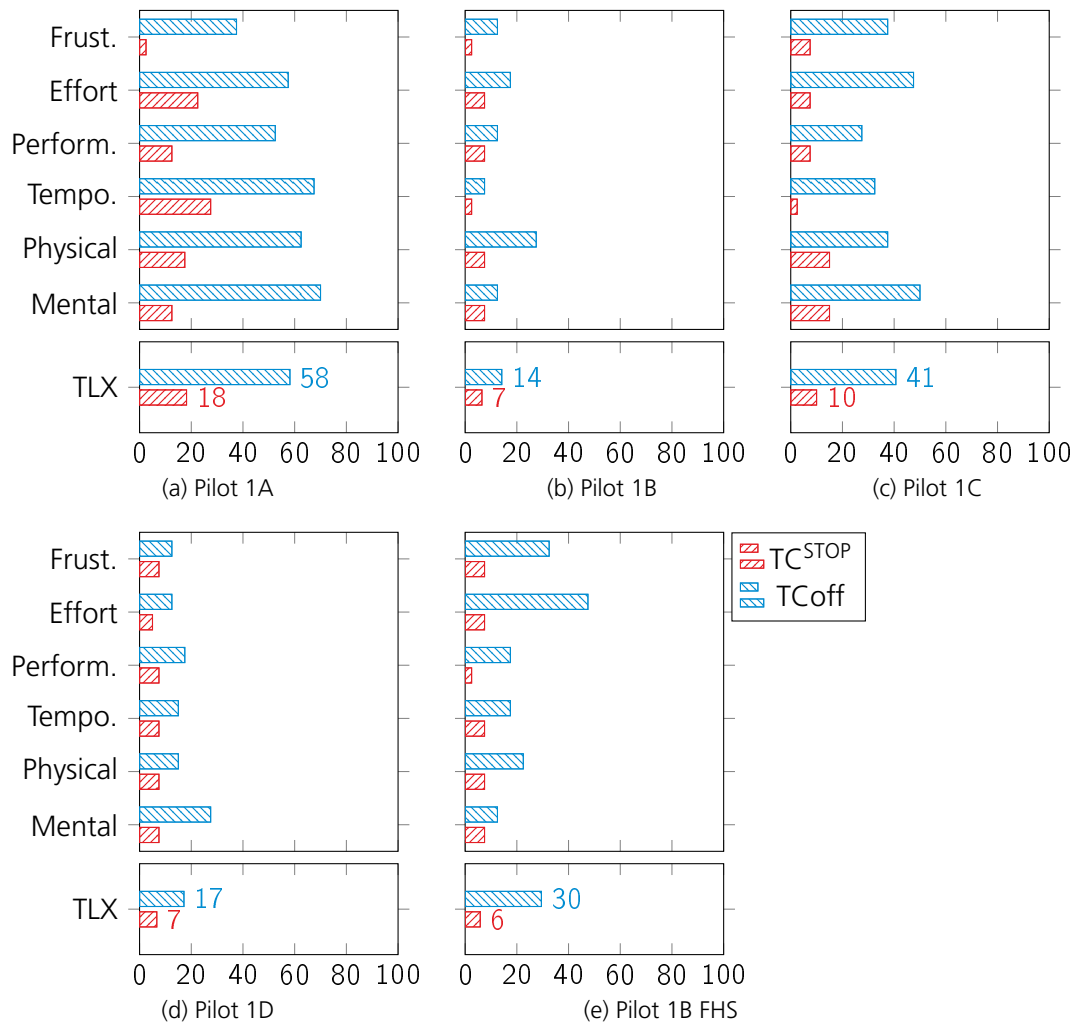


Abbildung 5.11.: **NASA TLX Whiteout-Escape-Manöver (links: very low, rechts: very high, anders bei performance: links: perfect, rechts: failure; Pilot 1B Simulator und FHS)**

vergebenen Wichtungsfaktoren resultierenden NASA Task Load Index, links 0: *very low*, d.h. sehr geringe Arbeitsbelastung, und rechts, 100: *very high*, d.h. sehr hohe Arbeitsbelastung.

Alle Piloten bewerteten die Arbeitsbelastung in beiden Manövern für die Konfiguration mit *Haptic Torque-Protection* (TC^{STOP}) niedriger als für die Referenzkonfiguration (TC^{off}). In der Referenzkonfiguration empfanden alle Piloten das *Whiteout-Escape-Manöver* mit im Mittel 33 TLX als weniger beanspruchend als das *Fog-Departure-Manöver* mit im Mittel 63 TLX.

Der mittlere TLX-Wert für TC^{STOP} lag beim *Fog-Departure-Manöver* bei 30 TLX gegenüber 63 TLX für TC^{off}. Das entspricht einer mittleren Reduktion der Arbeitsbelastung um 33 TLX, bei einer Spanne zwischen 20 und 50 TLX. Daraus lässt sich schlussfolgern, dass der Anteil der manuellen Torqueregulation am Torque-Limit für dieses Manöver im Mittel ca. 50 % der Gesamt-Arbeitsbelastung ausmachte.

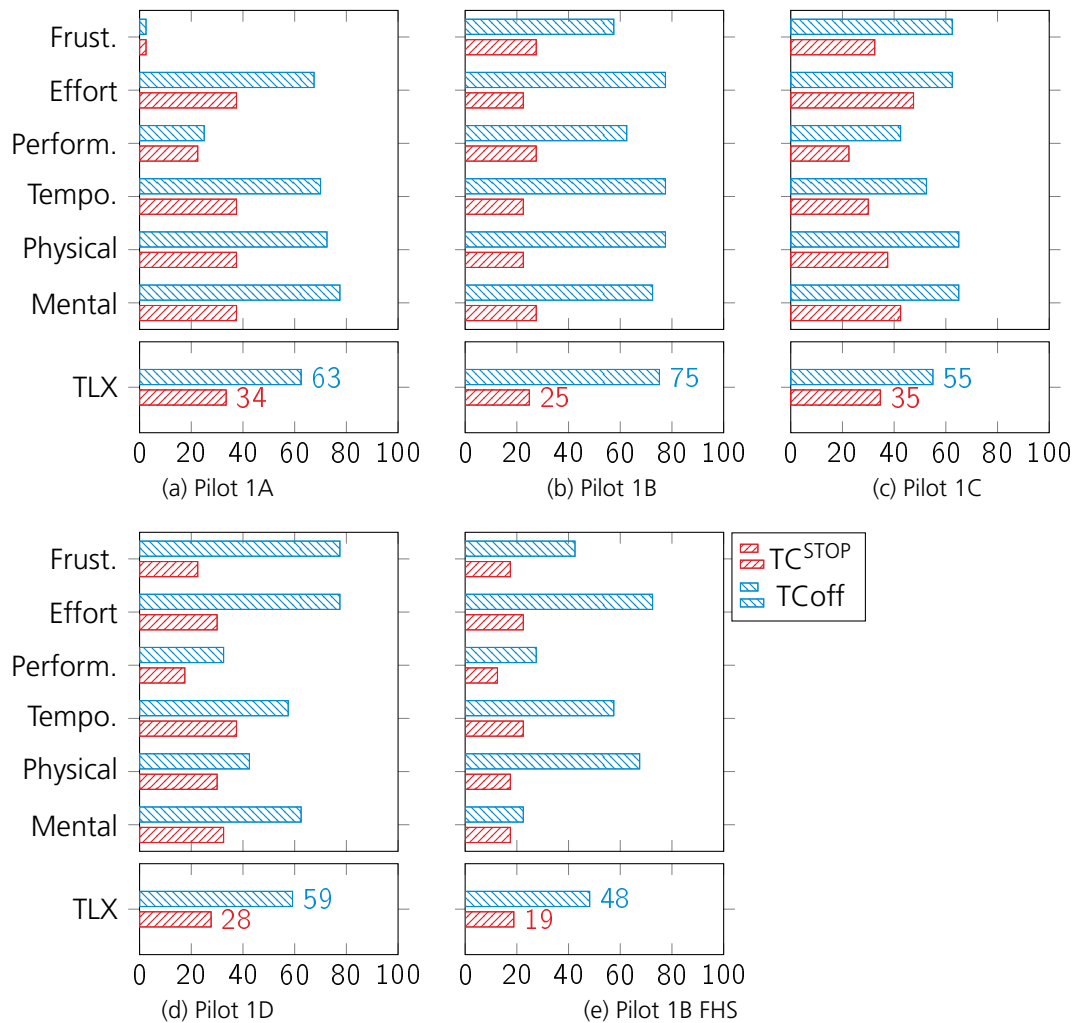


Abbildung 5.12.: **NASA TLX Fog-Departure-Manöver** (links: very low, rechts: very high, anders bei performance: links: perfect, rechts: failure; Pilot 1B Simulator und FHS)

Beim *Whiteout-Escape-Manöver* lag der mittlere TLX-Wert für TC^{STOP} bei 10 TLX gegenüber 33 TLX für TCoff. Hier lag die durchschnittliche Reduktion der Arbeitsbelastung also bei 23 TLX, bei einer Spanne zwischen 7 und 40 TLX. Wegen der ohnehin niedrigen Arbeitsbelastung beim *Whiteout-Escape-Manöver*, machte die manuelle Torqueregulation hier also im Mittel einen Anteil von 70 % der Gesamtarbeitsbelastung aus. Die Ergebnisse der Untersuchung im Realflug mit dem ACT/FHS liegen in der gleichen Größenordnung: 19 TLX mit *Tactile Cue* gegenüber 48 TLX mit *Tactile Cue*, also bei einer Reduktion um 29 TLX für das *Fog-Departure-Manöver*, Abbildung 5.12e und 6 TLX gegenüber 30 TLX, d.h. einer Reduktion von 24 TLX für das *Whiteout-Escape-Manöver*, Abbildung 5.11b.

5.3.3. Kräfte

Das Interesse gilt hier zunächst den Kraftniveaus, welche in den einzelnen Konfigurationen von den verschiedenen Piloten beim Nutzen der *Tactile Cues* maximal aufgewendet wurden. Daraus wird nachfolgend auch der Einfluss unterschiedlicher Kräfte auf die oben beobachteten Ungenauigkeiten bei der Einhaltung des Torquelimits bestimmt, siehe Abschnitt 5.3.1.

Die von den Piloten aufgewandten Kräfte zum Halten des Steuerers an der Stop-Position variierten während des Versuchs, wie exemplarisch im zeitlichen Verlauf in den Abbildungen 5.7 und 5.8 zu sehen ist. Dabei sind *Peaks* erkennbar, die sich vom restlichen Kraftniveau abhoben. Der erste *Peak* trat in einigen Fällen bei der Kontaktaufnahme mit dem *Softstop* auf, d.h. wenn der Pilot das Steuer aktiv zum *Tactile Cue* bewegte, eng. *contact*. Ein weiterer *Peak* konnte auftreten, während sich das *Stop-Cue* bei der Reduktion des gültigen Torque-Limits nach unten verschob, *push*. Die ermittelten *Peaks* und Haltekräfte aller Piloten wurden jeweils für die beiden Manöver in der Abbildung 5.13 zusammengefasst. Die Spannweite der Haltekräfte wird jeweils als Boxplot dargestellt.⁵ Zur Trennung der Halte- und Transientenkräfte, wurde eine 1 s Transientzeit nach der Kontaktaufnahme und 2 s nach Beginn der Limitreduktion, zur Berücksichtigung der Dauer der Limitreduktion und anschließender Transientzeit von 1 s, für die Berechnung der Boxplots aus den Daten entfernt. Für Pilot 1B sind die Ergebnisse sowohl für die Simulatoruntersuchung als auch für den ACT/FHS angegeben. Die maximal auftretenden Kräfte variierten über alle Piloten und Manöver und lagen im Bereich von 9 bis 24 N. Zwischen den Manövern sind keine systematischen Unterschiede erkennbar. Die *Peak*-Kräfte bei der Kontaktaufnahme und Limitverschiebung lagen zwischen 9 und 24 N. Die maximalen Haltekräfte rangierten von 9 bis 17 N. Dabei wendete Pilot 1B im ACT/FHS-Flugversuch jeweils eine bis zu 7 N höhere *Peak*-Kraft und eine bis zu 6 N höhere Haltekraft auf als im Simulator. Die *Peak*-Kräfte, welche bei der Limitreduktion während des *Fog-Departure-Manöver* auftraten, waren im Simulator immer um 1 bis 7 N höher als bei der Kontaktaufnahme. Damit lagen die Kräfte immer unterhalb des vorab definierten Schwellwertes, d.h. unterhalb der *Softstop*-Höhe von hier 50 N.

Krafteinfluss auf die Präzision des *Tactile Cues*

Die Piloten müssen eine Kraft aufbringen, um das Steuer am *Softstop* zu halten. Wie oben beschrieben, zeigte sich jedoch, dass unterschiedliche Piloten mit unterschiedlichen Kraftniveaus in den *Softstop* zogen und die Kraft auch während eines Versuchsdurchlaufs variierten: Die Kraft variiert also sowohl interpersonell als auch intrapersonell.

Weil der *Softstop* letztlich ein linearer Kraftgradient ist, resultieren aus unterschiedlichen Kräften

⁵Ein Boxplot dient der übersichtlichen Darstellung von Lage und Verteilung von Daten. Der rote Strich in der Mitte ist der Median der Verteilung. Die umgebende Box umfasst das unmittelbar darunter liegende und das darüber liegende Quartil, also jeweils 25 % der Daten. Somit liegen die mittleren 50 % der Daten innerhalb der Box. Die übrigen Daten liegen außerhalb. Außerhalb der Box werden die „Whisker“, eng. für „Fühler“, als durch vertikale Linien mit der Box verbundene Querstriche dargestellt. Ihre Länge kann definitionsgemäß maximal den 1,5-fachen Interquartilsabstand des benachbarten inneren Quartils annehmen. Außerhalb liegenden Datenpunkte werden als Ausreißer angenommen und als Einzelwerte dargestellt [127, S. 184-187].

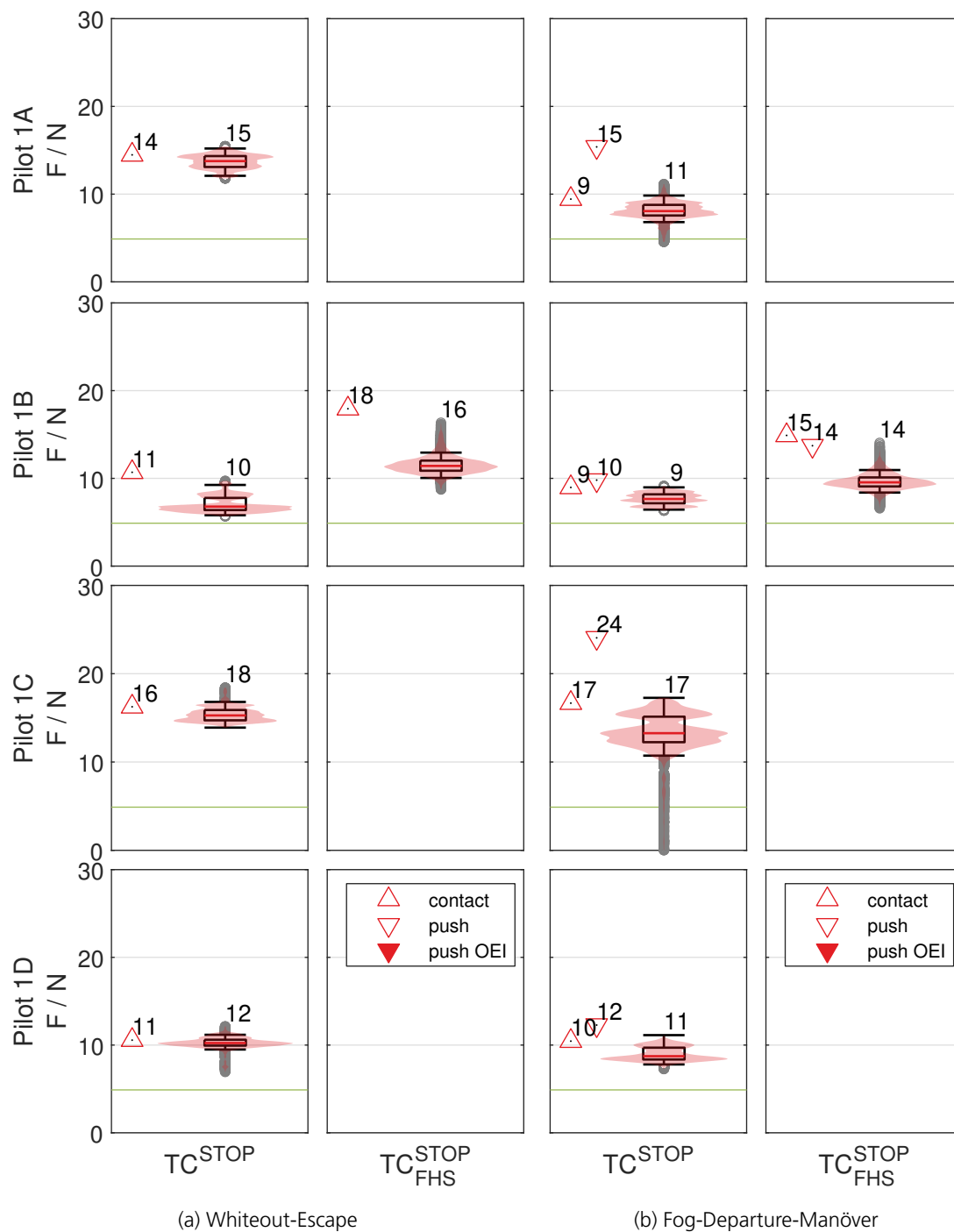


Abbildung 5.13.: **Vergleich: Kraftmaxima bei Kontakt sowie Haltekraftverteilung bezogen auf Reibungsschwelle (Softstop)**

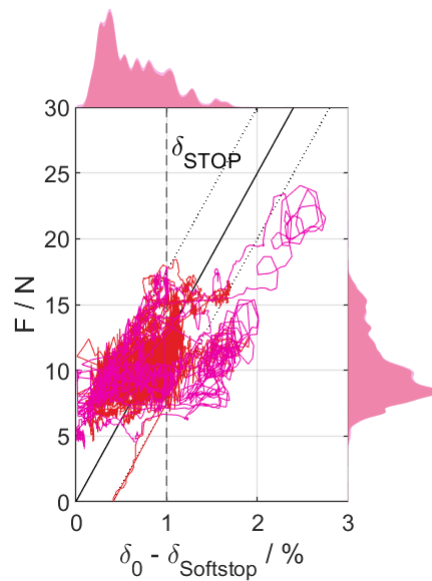


Abbildung 5.14.: **Nachgiebigkeit des Softstops: Haltekraft (rot) und Transientkraft (magenta) am Sollgradient (Gerade) mit Hysterese (dünn gestrichelt) für alle runs und eigentliche Stop-Position $\delta_{0,STOP}$ (gestrichelt); außen kumulative Verteilungsdichten**

auch unterschiedliche Auslenkungen. Damit wohnt dem *Softstop* als limitierendes *Tactile Cue* immer eine relative Ungenauigkeit inne, denn in Folge dieser Positionsabweichungen kann es zu Überschreitungen des korrespondierenden Limits kommen. Zur Illustration und Abschätzung des Einflusses sind in der Abbildung 5.14 die am *Softstop* wirkenden Kräfte über der Steuerposition δ_0 relativ zur *Softstop*-Position $\delta_{0,Softstop}$ abgetragen. Diese beinhaltet alle Versuchsdurchläufe aller Piloten beider Manöver. Dabei wurde die Haltekräfte und die Transientenkräfte, d.h. die Kräfte während der Kontaktaufnahme und Limitreduktion unterschiedlich markiert. Als Referenzlinie wurde die kommandierte *Softstop*-Kennlinie mit einer Steigung von 12,5 % eingetragen und zusätzlich die sich durch die Reibungskraft von 4 N ergebende Hysterese (gestrichelte Linien). Zudem wurden die Verteilungsdichten der gemessenen Kräfte und Positionen dargestellt.

Während der Haltephasen traten Kräfte bis zu etwa 18 N und Überschreitungen der *Softstop*-Position von bis zu $\delta_{0,tol.} = 1,8 \%$ auf. Der Großteil der Datenpunkte lag innerhalb des Wertebereiches, der durch *Softstop* und Reibungshysterese aufgespannt wird. Der aktive Sidestick arbeitet also in Bezug auf die quasi statischen Haltekräfte konform mit dem Referenzmodell. Die Transientenkräfte bzw. die zugehörigen Steuerausschläge verließen diesen Bereich aber. Dies liegt wahrscheinlich an der endlichen Stellrate der Aktuatorik des aktiven Sidesticks.

Nachdem der Mechanismus und die Größenordnung der Überschreitungen des *Tactile Cues* bekannt ist, stellt sich die Frage, ob sie tolerierbar ist. Die transienten Überschreitungen können wegen ihrer kurzen Dauer in Bezug auf die hohe Zeitkonstante der Torquereaktion außer Acht lassen. Etwas anders stellt es sich für die statischen Überschreitungen dar.

Im verwendeten *Tactile Cueing*-Design wurde der *Softstop* mit der Idee der Kompensation seiner Nachgiebigkeit bereits um $\delta_{0,comp.} = 1 \%$ vor der eigentlichen Stop-Position $\delta_{0,STOP}$ platziert,

siehe auch Abbildung 5.14. Damit betrug die effektive Überschreitung nur noch max. $\delta_{eff} = 0,8 \%$. Der potentiellen Effekt dieser Positions-Überschreitung auf eine Überschreitung des Torque-Limits lässt sich mit Hilfe des in dieser Arbeit identifizierten Torquemodells vornehmen, siehe Abschnitt 4.4. An einem plausiblen Arbeitspunkt (Torque $Q_{ref} = 78 \text{ Torque} - \%$, Geschwindigkeit $V_{TAS} = 0 \text{ kt}$, Luftdichte $\rho = \rho_0$, $\delta_p = 100 \%$) ergäbe sich eine potentielle Überschreitung von etwa $\Delta Q = 1,6 \text{ Torque} - \%$. Dieser Wert ist geringer als die hier beobachteten Limitüberschreitungen. Damit dürfte die Nachgiebigkeit des *Softstops* nur eine Ursache unter anderen sein, siehe oben. Ob diese Nachgiebigkeit tolerierbar ist und wo die Grenze liegt, hängt vom Anwendungsfall ab, bzw. von der Übertragungsfunktion der limitierten Größe. In Bezug auf die geforderte Präzision können die folgenden allgemeinen Regeln festgehalten werden:

- Je steifer der *Softstop* ist, desto geringer ist die Anfälligkeit für Abweichungen durch unterschiedliche Haltekräfte.
- Je sensibler die Übertragungsfunktion ist, desto höher ist die Anfälligkeit für Abweichungen durch unterschiedliche Haltekräfte.
- Bei der Festlegung der erlaubten Toleranz spielt auch die Dynamik der zu limitierenden Größe eine Rolle. Bei einer stark gedämpften Systemantwort können höhere transiente Überschreitungen des *Tactile Cues* bzw. des *Softstops* toleriert werden als bei einem agilen System.

Damit steht auch ein Entscheidungskriterium für die Verwendbarkeit eines *Softstops* mit endlicher Steigung als positionsbegrenzendes *Tactile Cue* bereit. Sollte die erreichbare Genauigkeit schlechter sein als die erlaubte Toleranz, gibt es die folgenden Möglichkeiten zur Verbesserung:

1. Verwenden einer konservativen Sicherheitsmarge. Diese könnte individuell an die gemessene Kraftverteilung der Piloten angepasst werden und auch adaptiv ausgeführt werden. Dies kann aber dazu führen, dass das Limit nicht voll ausgenutzt wird.
2. Verwenden eines steiferen *Softstops*. Wenn man die Steifigkeit jedoch zu stark erhöht, kann es – so zeigt die Erfahrung – zu Oszillationen kommen. Eine mögliche Alternative unter Verwendung eines anderen Modus des verwendeten Sidesticks wird in Kapitel 7 vorgestellt.
3. In einem fbw-System kann man das Steuersignal δ_0 auf die berechnete Limitposition $\delta_{0,lim}$ begrenzen, solange sich dieses innerhalb des Toleranzbereiches befindet. SAHANI AND HORN [26] und JERAM [128] beschreiben diesen Ansatz. Nach Überschreiten der Toleranz wird die normale Zuordnung durch eine höhere Sensitivität wieder aufgeholt, so dass der gesamte Steuerbereich genutzt werden kann. Dieser Ansatz wird in Abschnitt 7 beschrieben und umgesetzt.
4. Möglicherweise kann man die Piloten auch an ein niedriges Kraftniveau gewöhnen. Hier bleibt aber fraglich, ob das in Stresssituationen noch zuverlässig wahrgenommen wird.
5. Eine weitere Methode, um die Piloten zum Aufbringen einer bestimmten Haltekraft zu bewegen, könnte darin bestehen, mehrstufige *Softstops* zu verwenden: Ein unterer *Softstop*, der überschritten werden muss und ein oberer *Softstop*, der nicht überschritten werden darf. Zur Unterscheidbarkeit, müsste der obere *Softstop* steifer als der untere sein.

5.3.4. Subjektive Bewertung

In der Studie wurden auch die subjektiven Bewertungen der Piloten erhoben. Während der Erprobung und im Debriefing wurden die folgenden Pilotenkommentare abgegeben [Erläuterungen und Vervollständigungen des Autors in Klammern]:

- Pilot 1A: „Mit Haptic-FLI absolut niedrige Workload!“; „Gut, dass er schiebt.“ [Er meint den Stick beim Erreichen einer Fluggeschwindigkeit von 65 kt und dem Wechsel vom MTP- zum MCP-Limit]; „Sollte um OEI erweitert werden.“
- Pilot 1B: Im Debriefing: „Ohne *Haptic Torque-Protection* [den visuellen Fokus] ständig gewechselt zwischen Geschwindigkeit und FLI [Anzeigen], mit *Haptic Torque-Protection* nur noch Geschwindigkeit. Beim Beschleunigen auf 70 kt ist Pitch die einzige Steuergröße [mit *Haptic Torque-Protection*].“ Auf Nachfrage: „Die zu frühe Limitreduktion stellte keine Sicherheitsproblem dar, war aber unangenehm. Normalerweise würde man nicht beim Rotieren an das Leistungslimit gehen, aber mit haptic FLI kann man das machen.“
- Pilot 1C: „[Die *Haptic Torque-Protection*] macht einiges aus!“; „Hilfreich.“; „Aber es sollte leichter zu überschreiten sein.“; „[Die *Haptic Torque-Protection*] verleitet dazu, stark und heftig in die Limits zu gehen. Besser konservativ [fliegen]. Kann kontraproduktiv sein, wenn man dadurch aggressiv fliegt.“; „Simulation schwieriger zu fliegen als den echten Hubschrauber“

Es wurde geäußert, das Vertrauen in die Funktion der *Haptic Torque-Protection* zur Torque-Protection könne die Piloten zu aggressiveren Kollektiveingaben verleiten. Dies wurde mit dem Terminus „*Overconfidence*“, zu deutsch etwa „*Übervertrauen*“ beschrieben. Dabei hat zumindest ein Pilot zunächst schnellere Kollektiveingaben gemacht, wenn die *Haptic Torque-Protection* aktiv war. Dabei wurde der Kollektivhebel in einem Zug bis an das *Stop-Cue* geführt. Das führte zwar nicht zu einer Torque-Überschreitung, aber der Pilot war nicht auf die Reaktion des Hubschraubers in der Gierachse vorbereitet und bekam Probleme, den Hubschrauber zu stabilisieren, so dass er den run abbrechen und wiederholen musste. So beeinflusst eine Änderung des Rotortorques das Momentengleichgewicht um die Hubschrauberhochachse, was durch koordinierte Pedaleingaben kompensiert werden muss. Eine aggressive Kollektiveingabe müsste also auch mit einer aggressiven Pedaleingabe koordiniert werden. Wahrscheinlich wird dieser Umstand dadurch verstärkt, dass hier ein für die Piloten noch ungewohnter Sidestick verwendet wurde, der, im Vergleich mit dem klassischen Kollektivhebel, über einen kurzen Griff verfügt, und damit eine höhere Steuersensitivität aufweist. Ein Pilot sprach dabei von „elektronischen Händen und mechanischen Füßen“. Mit etwas Übung konnte die Hubschrauberreaktion besser vorhergesagt und der Hubschrauber besser stabilisiert werden. Neben ausreichend Training könnte eine weitere Lösung des Problems darin bestehen, scharfe Kollektiveingaben durch erhöhte Dämpfung oder ein anderes *Tactile Cue* zu erschweren, jedoch nicht zu verhindern.

5.4. Zusammenfassung Studie 1

Das vorhandene FLI-Display des Forschungshubschraubers ACT/FHS zur Anzeige des Torques und der Torque-Limits, wurde durch ein *Haptic Torque-Protection-System* mit einem *Softstops* als *Tactile Cue* erweitert. Der *Softstop* repräsentierte die Steuerposition, welche mit dem aktuell gültigen Torque-Limit korrespondierte. Das *Haptic Torque-Protection-System* wurde im Realflug mit dem ACT/FHS von einem Piloten und im Simulator von vier Piloten mit jeweils zwei unterschiedlichen Manövern untersucht. Die folgenden Effekte wurden im Vergleich zur normalen Konfiguration ohne *Tactile Cue* evaluiert: Die Auswirkungen auf die Arbeitsbelastung, aber auch die korrekte Funktion sowie die auftretenden Pilotenkräfte. Die Studie führte zu den folgenden Ergebnissen.

1. *Präzision*: Grundsätzlich konnte der zur Verfügung stehende Torque mit aktivierter *Haptic Torque-Protection* besser ausgenutzt werden und es gab weniger Überschreitungen als ohne. Aber auch mit *Haptic Torque-Protection* gab es in einem Fall eine nicht tolerierbare Überschreitung des Limits. Diese kann auf zwei Ursachen zurückgeführt werden, für die sich technische Lösungen finden lassen. Den größten Anteil hatte die harte Umschaltung des Torque-Limits, bzw. der Umschaltzeitpunkt, welcher auf der Basis einer inhärent ungenauen Vorhersagbarkeit der Fluggeschwindigkeit beruht. In Verbindung mit einem *Tactile Cue* sollte eine alternative Spezifikation der Triebwerkslimits, z.B. als kontinuierlich veränderliches Limits, in Erwägung gezogen werden. Der andere Anteil ist auf das Zusammenspiel des als *Tactile Cue* verwendeten *Softstops* und der relativ großen Spanne an aufgebrachten Pilotenkräften zurückzuführen, siehe Punkt 5. Der verwendete Torque-Prädiktor war ausreichend präzise für eine Evaluation des Konzepts einer *Haptic Torque-Protection* mit Piloten in einer realen, bzw. realistischen Versuchsumgebung.
2. *Arbeitsbelastung*: Alle Piloten haben in beiden Manövern eine niedrigere Arbeitsbelastung für die Kombination aus *Tactile Cue* und FLI gegenüber dem rein visuellen Cue des FLIs angegeben. Die Reduktion der Arbeitsbelastung lag für das *Fog-Departure-Manöver* bei 37-67 %, und für das *Whiteout-Escape-Manöver* bei 54-80 %. Zwischen dem Flugversuch und den Simulatorversuchen bestand kein nennenswerter Unterschied in den abgegebenen Bewertungen.
3. *Kraft*: Die von den Piloten aufgebrachten Steuerkräfte variierten zwischen den Piloten (interpersonell) und auch während der einzelnen Versuchsdurchläufe der einzelnen Piloten (intrapersonell). Die Spanne der maximalen Haltekräfte betrug 9 bis 18 N. Bei der Kontaktaufnahme und bei einer automatischen Absenkung des *Tactile Cues* fiel die Kraft teilweise höher aus. Der maximale Peak lag hier bei 24 N.
4. *Systemakzeptanz*: Aus den Pilotenkommentaren lässt sich eine hohe Systemakzeptanz der *Haptic Torque-Protection* erkennen. Die Systemakzeptanz sollte in zukünftigen Studien explizit erfragt werden, siehe Abschnitte 6 und 7.
5. *Tactile Cueing Design*: Wegen der Variation der Steuerkräfte ist ein nachgiebiger *Softstop*, d.h. mit endlichem Gradienten als *Tactile Cue* nur bedingt präzise, siehe Punkt 1. Wenn die Kräfte höher sind, als vorher angenommen, kann es zu einer Überschreitung des Limits kommen. Zur Verhinderung von etwa durch *Overconfidence* bedingten aggressiven Steuereingaben könnte eine höhere viskose Dämpfung Abhilfe schaffen.

6. *Tactile Cue*-Design-Optimierung - Studie 2: Fokus Systemakzeptanz

Dieses Kapitel beschreibt die Untersuchung und Ergebnisse der *Haptic Torque-Protection* mit dem Schwerpunkt auf der **Pilotenakzeptanz** und subjektiven Bewertung einzelner *Tactile Cueing*-Ausprägungen (wissenschaftliche Frage 5).

In der vorangegangenen Studie lag der Fokus auf dem quantitativen Nachweis der Wirksamkeit des Prinzips einer *Haptic Torque-Protection* und ihrer Auswirkung auf die Arbeitsbelastung. In dieser Studie¹ wandert der Fokus auf die qualitativen Aspekte der Gebrauchstauglichkeit, bzw. Systemakzeptanz einer *Haptic Torque-Protection* und der Auswahl eines geeigneten *Tactile Cue*-Designs. Orientiert am FLI wird das System um ein *Tactile Cue* für den „gelben“ TOP, bzw. Torque-Info-Bereich erweitert, der sich in seiner Intention von dem bisher alleine betrachteten „roten“ Torque-Limit unterscheidet. Die Systemerweiterung auf den „gelben Bereich“ geht direkt auf Pilotenfeedback während einer Systemdemonstration zurück. Methodisch werden dabei zunächst zwei Designideen erarbeitet und programmiert. In einer anschließenden Simulatorerprobung werden sie von Hubschrauberpiloten bewertet und kommentiert. Aus den gesammelten Kommentaren und Verbesserungsvorschlägen werden Designregeln abgeleitet.

6.1. *Tactile Cue* Design 2

Für das Design wurde mit einem Berufspiloten zusammengearbeitet, der über viel Erfahrung mit der H135 und damit mit den Limit-Kategorien des FLI verfügte. Methodisch für die Designentwicklung zunächst eine Umfrage unter anderen H135-Piloten durchgeführt, die in zwei verschiedenen gezeichneten Designideen in Form von Kraft-Weg-Kennlinien resultierte. Diese Kennlinien wurden auf Basis der Skizzen für den aktiven Sidestick zur Kollektivsteuerung zur weiteren Untersuchung im H135-Cockpit des AVES-Simulators programmiert. Technisch handelt es sich bei der hier verwendeten *Haptic Torque-Protection* um eine Erweiterung des bestehenden Systems um ein weiteres

¹Die in diesem Abschnitt gezeigten Ergebnisse stammen aus zwei Teilstudien im Flugsimulator, die hier zusammengefasst werden. Die Designentwürfe für das *Tactile Cueing* wurden von dem Berufspiloten ROGER DÖGOW im Rahmen seiner, durch den Autor dieser Arbeit betreuten, Bachelorarbeit vorgeschlagen. Sie wurden durch den Autor dieser Arbeit in die *Haptic Torque-Protection* implementiert. Die erste Teilstudie (3 Piloten) wurde gemeinsam durchgeführt vgl. [6]. Diese fand im Rahmen des Projekts „SiRasKoF-H“ statt, [7]. Der zweite und dritte Teil dieser Studie (12 Piloten) wurden durch den Autor dieser Arbeit im Rahmen des BAAINBw finanzierten Projekts „PA ATR“ alleine durchgeführt. Die Auswertung aller Studienteile wurde hier vom Autor dieser Arbeit auf Basis der Rohdaten zusammenfassend vorgenommen. Inhaltliche Übernahmen aus der Bachelorarbeit wurden kenntlich gemacht.

Tactile Cue. Das System mit Prädiktor und Zustandsautomat bleibt dabei in seiner Grundstruktur erhalten.

Für beide Designs gelten die folgenden Anforderungen. Sie sollen versehentliche Überschreitung des „roten Limits“, bzw. des Torque-Limits, vermeiden und über den Eintritt in den und das Verweilen innerhalb des „gelben Bereichs“, bzw. des Torque-Info-Bereichs informieren.

Design 2a: Reibungsstufe und Softstop

Bei diesem Design wird die Reibung beim Überschreiten der mit der Schwelle vom Dauerleistungsbereich in den TOP-, bzw. Torque-Info-Bereich korrespondierenden Steuerposition gegenüber der Reibung im Dauerleistungsbereich sprunghaft, bzw. stufenförmig erhöht, siehe Abbildung 6.1. Sie bleibt im Info-Bereich bestehen, so lange eine aufwärts gerichtete Kraft gemessen wird. Damit sollen zwei Effekte erzielt werden: Durch die sprunghafte Erhöhung der Reibung soll der Pilot das Eintreten in den TOP-Bereich bemerken. Diese Erhöhung ist als Anschlag spürbar. Um in den TOP-Bereich zu kommen, muss er die erhöhte Reibung aktiv überwinden. Anders als bei einem *Softstop*, wirkt die Reibung nicht permanent sondern nur, wenn der Stick bewegt wird. Dabei wird der Stick also nicht zurückgeführt, so dass der Pilot den Stick loslassen könnte und er an der Stelle stehen bliebe. Die Reibungsstufe wurde so programmiert, dass sie nur beim Ziehen in Aufwärtsrichtung wirkt, d.h. in Richtung höherer kommandierter Triebwerksleistung. In Abwärtsrichtung entspricht die Reibung auch im TOP-Bereich der geringeren Reibung des Dauerleistungsbereiches. Dies dient der Vermeidung unwillkürlicher und unkontrollierter Sprungeingaben beim Passieren der unteren Schwelle des TOP-Bereiches. Diese würden sich aus einer sprunghaften Reduktion der Reibung während der manuellen Betätigung ergeben. Das liegt daran, dass der Pilot seine Betätigungskraft nur verzögert adaptieren kann. Genau dieser Umstand ist bei der Erhöhung der Reibung erwünscht, weil dadurch die Bewegung kurz verzögert oder sogar gestoppt wird. Am oberen Rand wird der INFO-Bereich durch die STOP-Position begrenzt, welche wie im *Tactile Cue*-Design in der ersten Studie, Abschnitt 5, durch einen *Softstop* repräsentiert wird. Bei gesperrtem TOP-Bereich wird das *Tactile Cue* für STOP an den Beginn des TOP-Bereiches verschoben. Wenn das STOP-Limit in seiner

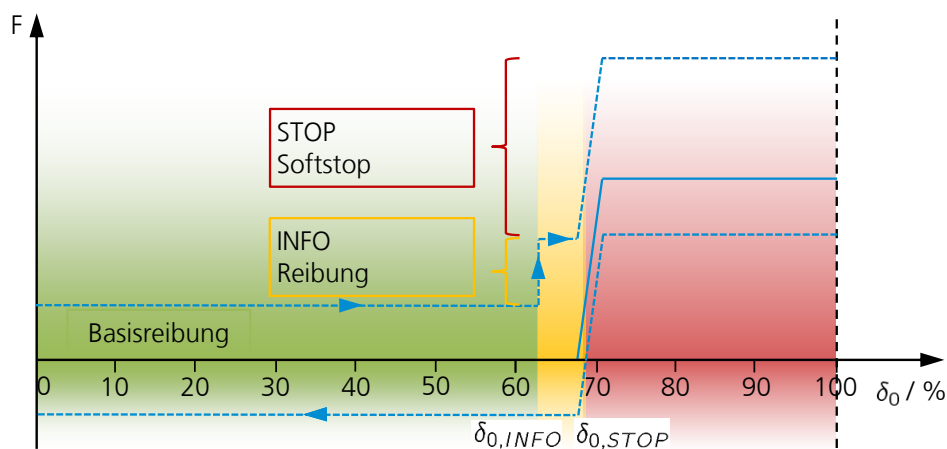


Abbildung 6.1.: **Tactile Cue Design 2a: STOP: Softstop, INFO: Reibung, vgl. [6, S. 25]**

jeweiligen Position mehr als 4 Torque-% überschritten wird, wird ein *Stickshaker* aktiviert (Transien-tenlimit). Wie im ersten Design ist auch hier eine viskose Dämpfung aktiv, um eine Oszillation bei *Softstop*-Kontakt zu vermeiden.

Design 2b: Raste und Softstop

Dieses Design stellt nur den Übergang vom Dauerleistungsbereich in den gelben Bereich, bzw. Torque-Info-Bereich haptisch dar. Dies geschieht mittels einer Raste, engl. Detent, siehe Abbildung 6.2. Die Reibung hat dabei im gelben Bereich den gleichen Wert wie im Dauerleistungsbereich. Alle anderen Werte sind identisch zum vorherigen Design, siehe Abschnitt 5.1. Die STOP-Position wird auch hier durch einen *Softstop* dargestellt. Die Raste wurde über eine Kraft-Weg-Kennlinie definiert. Diese erzeugt einen positiven Kraftgradienten, wie bei einer Feder, welche den Stick auf der Detent-Position zentriert. Damit der Detent bei dem hier verwendeten aktiven Sidesticks auch bei höheren Steueraten wahrnehmbar bleibt, benötigt er eine Mindestbreite, hier 1 % Steuerweg. Dies hat jedoch den Nachteil, dass der Stick in das Rastenzentrum gezogen wird, sobald man in seinen Wirkungsbereich gerät. Dadurch wird die Feinpositionierung in diesem Bereich erschwert. Darum wird die Rate, etwa 1 s, nachdem der Stick das erste Mal das Rastenzentrum überschritten hat, deaktiviert. Sie wird erst wieder aktiv, wenn der Stick länger als 5 s außerhalb des Detent-Wirkbereichs war.

Die beiden beschriebenen Konfigurationen gelten für die Bedingung, dass der gelbe Torque-Info-Bereich nutzbar ist, d.h. hier für Fluggeschwindigkeiten $v_{IAS} < 65$ kt. In Situationen mit reduziertem Torquelimit, d.h. bei $v_{IAS} \geq 65$ kt gibt es nur einen *Softstop* an der mit dem reduzierten Limit korrespondierenden Stickposition, so wie beim Design aus der ersten Studie, siehe Abbildung 5.1. Die Steifigkeit des *Softstops* wurde gegenüber dem vorherigen Design verdoppelt, siehe Tabelle 6.1.

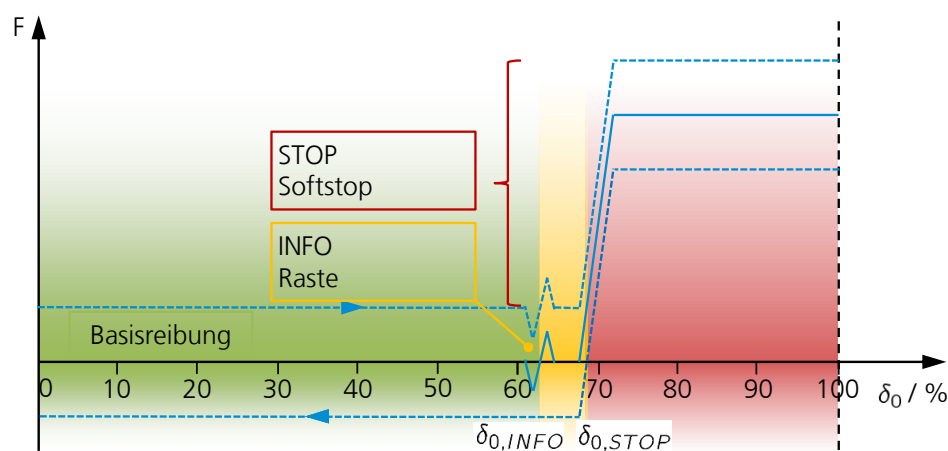


Abbildung 6.2.: Tactile Cue Design 2b: STOP: Softstop, INFO: Raste, vgl. [6, S. 26]

Tabelle 6.1.: Parameter *Tactile Cue-Design 2a und b*

Konfiguration	Basis		$\delta_{0,INFO}$		$\delta_{0,STOP}$		
	Reib.	Dämpf.	Reib.	Raste	Höhe	Weite	Grad.
	N	Ns/mm	N	N	N	mm (%)	N _{mm} (N%)
Design 2a: Reibungsst. und Softst.	5,0 ¹	0,2	24,0 ¹	0,0	24,0 ^{1,2}	2,3 (2,0)	10,6 (12,2)
Design 2b: Raste und Softstop	5,0 ¹	0,2	5,0 ^{1,3}	20,0 ^{1,4}	24,0 ^{1,2}	2,3 (2,0)	10,6 (12,2)
2a und 2b, über v_y	5,0 ¹	0,2	0,0	0,0	50,0 ¹	2,3 (2,0)	21,3 (24,4)

¹ Kalibrierter Wert, auf ganze Zahl gerundet.

² Zum Überwinden des *Softstops* müsste auch die Reibung überwunden werden. Dazu wären dann 48 N für Design a) und 29 N für Design b) nötig. Die Steigung der *Softstops* ist in beiden Fällen identisch.

³ Wirksam nur gegen Ziehen nach oben, bei Drücken nach unten wird auf Grundreibung umgeschaltet.

⁴ Über eine Weite von $\pm 1.6\%$ Steuerweg

6.2. Simulatorflugversuch

Der Flugversuch wurde in mehreren Simulatorversuchskampagnen wiederholt, die in unterschiedlichen Projekten durchgeführt wurden. Sie werden hier als eine Studie zusammengefasst.

6.2.1. Pilotenauswahl

Insgesamt konnten 15 Piloten mit unterschiedlichem Hintergrund und unterschiedlicher Erfahrung in die Studie eingebunden werden. Der erste Teil der Studie wurde mit drei aktiven, zivilen Berufspiloten aus dem Bereich Rettung (HEMS) durchgeführt (Piloten 2A, 2B und 2C). Sie verfügten über ein H135-Rating und zwischen 1200 und 4400 h Flugerfahrung. Der zweite Teil wurde mit acht aktiven Piloten der Bundeswehr durchgeführt (Piloten 2D bis 2K). Diese hatten unterschiedliche Typenberechtigungen und haben alle drei Teilstreitkräfte Heer, Marine und Luftwaffe vertreten und verfügten über 650 bis 4500 h Flugerfahrung. Vier weitere militärische Piloten konnten im Rahmen einer Systemdemonstration an einem dritten Teil der Studie, mit einer verkürzten Version des Versuchs, teilnehmen, bei der die Anzahl der Fragen aus zeitlichen Gründen reduziert werden musste (Piloten 2L bis 2O). Dies wird in der Ergebnisdarstellung berücksichtigt (Abschnitt 6.3).

Einige Piloten hatten bereits Erfahrungen mit *Tactile Cueing*. Entweder aus dem Kraftfahrzeugbereich, aber auch aus der Hubschrauberfliegerei. Vor allem die älteren Piloten kannten noch den Hubschrauber Alouette III, der bereits über eine rudimentäre Form einer *Haptic Torque-Protection* verfügte.² Weitere Details zur jeweiligen Vorerfahrung der Piloten sind in Anhang A dokumentiert.

² „Die Alouette hatte [eine] dynamische Torque Begrenzung [in Form eines verstellbaren Anschlags].“ (Pilot 2G)

6.2.2. Versuchsaufbau

Die Studie wurde im H135 Cockpit des AVES-Simulatorzentrums [70] durchgeführt, siehe Abbildung 6.3. Dieser Simulator löste 2014 den bisherigen Simulator ab, in dem die vorherige Studie noch durchgeführt wurde. Dabei handelt es sich um einen originalgetreuen Nachbau des realen ACT/FHS-Cockpits. Es wurde dieselbe Steueranordnung ausgewählt wie in der vorangegangenen Studie: rechter Sidestick als zyklisches Steuer, linker Sidestick für die Kollektivsteuerung und Pedale zur Giersteuerung. Als Basisregelung wurde ein SAS aktiviert, hier aber, anders als in Studie 1, ohne Turn Coordination (TC).



Abbildung 6.3.: **AVES H135 Cockpit mit aktiven Sidesticks und experimentellem FLI Display am rechten Pilotensitz**

6.2.3. Flugaufgabe

Um den Piloten die Möglichkeit zu geben, eine möglichst umfassende Beurteilung der Gebrauchstauglichkeit einer *Haptic Torque-Protection* abzugeben und viel von ihren Vorerfahrungen dabei abzurufen, sollte die Flugaufgabe möglichst viele Situationen ihres fliegerischen Alltags abdecken. Daher sollten hier keine spezifischen Flugmanöver vorgegeben werden, sondern eine Welt bereit gestellt werden, welche diese Situationen beinhaltete und die Piloten einband und animierte, die Funktion frei für den eigenen Bedarf auszuprobieren.

Weil die Studie zunächst nur für zivile Piloten geplant war, wurde dazu das virtuelle Stadtszenario „Obstacle City“ generiert, das ein virtuelle Stadt mit ländlicher Umgebung auf einer Fläche von 1 km mal 1 km kombiniert. Es wurde von DÖGOW auf der Grundlage von Pilotenbefragungen zu

relevanten Szenarien aus dem Rettungseinsatz erstellt, siehe Abbildung 6.4 [5]. Dargestellt werden z.B. Landeplätze auf einer von Hochhäusern flankierten Straßenkreuzung, auf einem Krankenhaus oder in einer Waldlichtung. Weil „Obstacle City“ auch zur Erprobung eines haptischen Obstacle Avoidance Systems genutzt werden sollte, wurde die gesamte Szenerie mit leicht zu übersehenden Luftfahrthindernissen durchsetzt, wie etwa Ampeln, Windrädern oder Hochspannungsleitungen.

6.2.4. Versuchsdurchführung

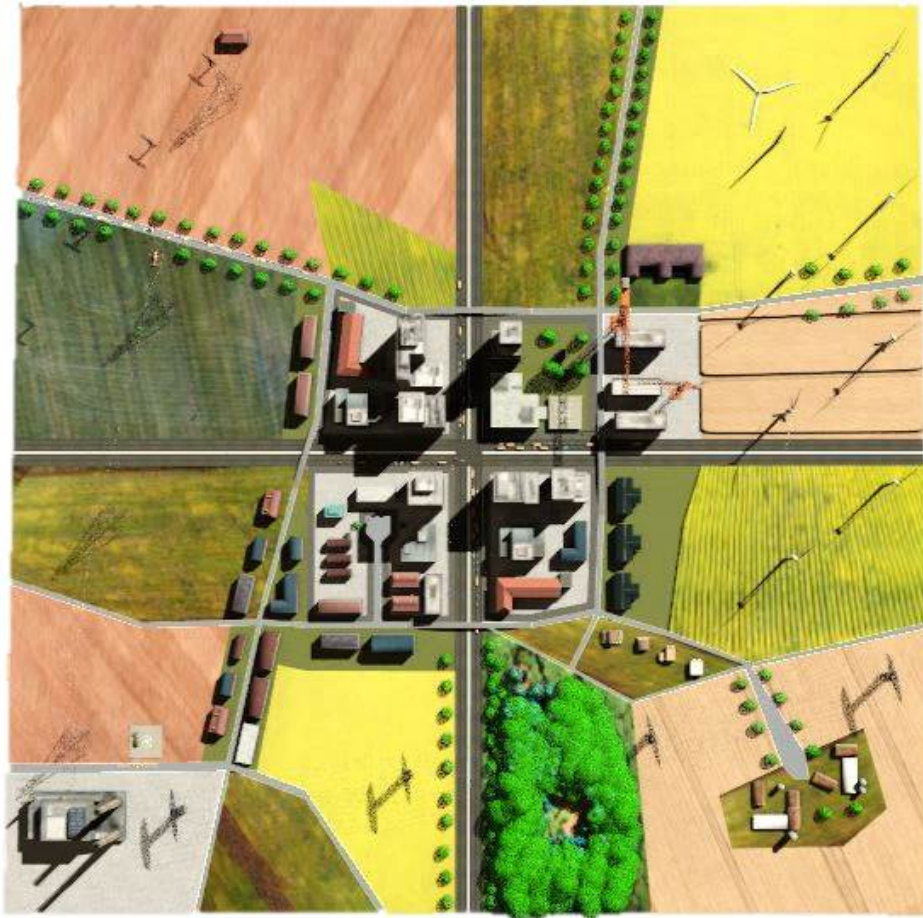
Die Piloten wurden darüber aufgeklärt, dass die Teilnahme freiwillig ist und jederzeit beendet werden kann sowie darüber, dass die erfassten Mess- und Videodaten wissenschaftlich verwendet werden. Alle Piloten unterschrieben darüber eine Einverständniserklärung.

Anfangs hatte jeder Pilot Gelegenheit sich an die Simulation und die Steuerung durch aktive Sidesticks zu gewöhnen. Danach wurden nacheinander die beiden Prototypen der *Haptic Torque-Protection* erprobt. Im Anschluss an die Teilversuche wurden die Eindrücke der Piloten jeweils durch einen Fragebogen abgefragt. Vor der Erprobung des jeweiligen Prototypen wurden den Piloten die einzelnen Funktionsmerkmale demonstriert: Die verschiedenen *Tactile Cues* bei MCP und MTP und die automatische Verschiebung des Limits bei Über-, bzw. Unterschreiten von 65 kt. Danach konnten die Piloten weitestgehend frei gewählte Manöver fliegen. Der Versuchsleiter hat zusätzliche Manövervorschläge gemacht, um die verschiedene Merkmale der Funktionen testen zu können. Dazu zählten etwa das Beschleunigen aus dem Langsamflug auf Geschwindigkeiten über 65 kt und das Verzögern unter 65 kt, jeweils unter Nutzung des maximal erlaubten Torques. Damit konnte die Reaktion der Torque-Protection auf die geschwindigkeitsabhängige Torque-Grenze getestet werden. Unter den selbst gewählten Manövern der Piloten waren etwa Start- und (abgebrochene) Landungen von und auf einer Straßenkreuzung. Die Nettoversuchszeit im Simulator betrug ca. 1 h pro Pilot, inklusive Briefing und Fragebogen ca. 2 h. Im Anschluss an die Erprobung der *Haptic Torque-Protection* erprobten die Piloten eine weitere *Tactile Cue*-Funktion zur Obstacle Avoidance [48]. Jener Versuchsteil ist nicht Teil dieser Arbeit.

6.2.5. Datenerhebung und -Auswertung

Der Schwerpunkt dieser Studie ist die Erfassung der Systemakzeptanz einer *Haptic Torque-Protection* generell und die Bewertung der gezeigten *Tactile Cueing*-Prototypen im Speziellen. Dies geschieht auf der Basis einer subjektiven Bewertung durch die teilnehmenden Piloten. Dazu wurden verschiedene Fragebögen verwendet.

Die Systemakzeptanz ist eine subjektive Größe, die durch direkte und indirekte Fragen ermittelt werden kann. Um Vergleichbarkeit unterschiedlicher Alternativen zu ermöglichen ist die Verwendung von normierten Skalen sinnvoll. Gebräuchlich in der Usability-Forschung ist die Akzeptanz-Skala von VAN DER LAAN & DE WAARD, welche die Gebrauchstauglichkeit und die Nutzerzufriedenheit von Systemen erfasst [129, S. 3]. Sie besteht aus elf normalerweise siebenteiligen ordinalen Subskalen für jeweils ein Gegensatzpaar von Adjektiven: 1. nützlich-nutzlos, 2. angenehm-unangenehm,



(a) Gesamtansicht, von oben



(b) Simulatorsicht, Kreuzung Detail mit ACT/FHS

Abbildung 6.4.: **Obstacle City** [5]

3. schlecht-gut, 4. nett-nervig, 5. effizient-unnötig, 6. ärgerlich-erfreulich, 7. hilfreich-wertlos, 8. wünschenswert-nicht wünschenswert und 9. aktivierend-einschläfernd. Der Proband kreuzt an, wie er das System oder Konzept relativ zu diesen Polen bewertet. Die Adjektivpaare sind jeweils einer der folgenden Kategorien zugeordnet: Nützlichkeit, im englischen Original *Usefulness* (1, 3, 5, 7, 9) oder Zufriedenheit, engl. *Satisfying* (sic!) (2, 4, 6, 8). Aus ihren Mittelwerten ergibt sich somit ein Ranking für die Nützlichkeit und die Zufriedenheit. Die Nützlichkeit wird über der Zufriedenheit aller Probanden in einem Kreuzdiagramm aufgetragen. Somit lässt sich leicht erkennen, ob diese korrelieren oder ob etwa ein System als grundsätzlich nützlich, aber in der konkreten Ausprägung als noch nicht zufriedenstellend erachtet wird.

Um eine detailliertere Bewertung der Vor- und Nachteile der vorgestellten Designs und einzelner Aspekte zu erhalten, wurde ein Fragebogen erstellt, siehe Anhang, Abschnitt C. Dieser enthielt u.a. Fragen zur Vorerwartung, zur Systemakzeptanz und zu den präferierten Cue-Formen und gab den Piloten die Möglichkeit ihre Beobachtungen ausführlich zu beschreiben.

6.3. Ergebnisse und Diskussion

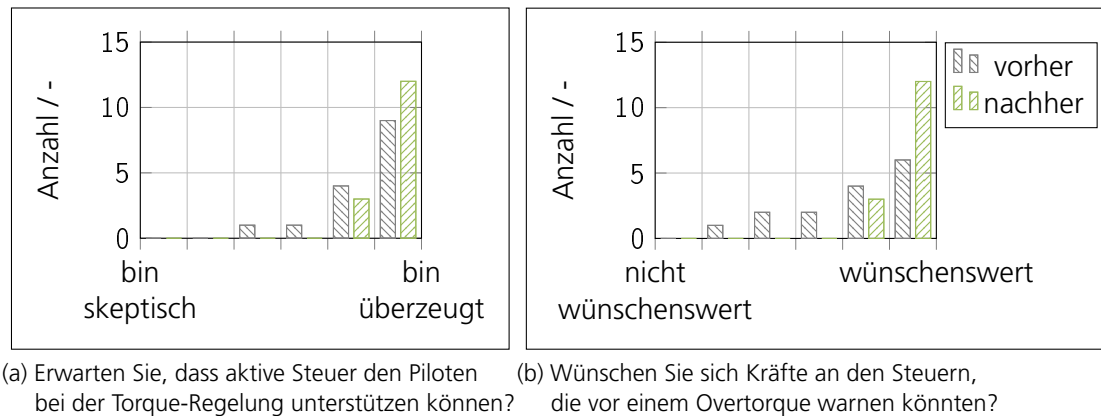
Hier erfolgt die Darstellung der Ergebnisse und die Diskussion der Studie auf die hier relevanten wissenschaftlichen Fragestellungen. Das sind die Systemakzeptanz der *Haptic Torque-Protection* und die Bewertung der Ausprägungen der verwendeten *Tactile Cues*. Die Transkripte der Pilotenkommentare und Fragebögen befindet sich im Anhang, Abschnitt C. Die Einordnung der Ergebnisse in den Gesamtkontext dieser Arbeit erfolgt zusammen mit den anderen Studien im Abschnitt 8.

6.3.1. Qualitative Bewertung der haptischen Torque-Protection

Bereits vor der Durchführung der Simulatorevaluation wurden alle teilnehmenden Piloten nach ihrer Vorerwartung bezüglich der Nützlichkeit und dem Bedarf, bzw. dem Wunsch nach einer *Haptic Torque-Protection* befragt, d.h. ohne dass sie das System vorher ausprobieren konnten. Die gleiche Frage wurde im Debriefing wiederholt. Die Abbildung 6.5 zeigt die Verteilungen aller 15 Pilotenantworten. Vor der Studie waren die meisten Piloten überzeugt, dass sie eine *Haptic Torque-Protection* bei der Regelung des Torques unterstützen könne und wünschten sich eine solche Unterstützung, lediglich 3 von 15 Piloten waren eher ablehnend eingestellt. Nach den Versuchen kreuzten alle Piloten an, dass sie überzeugt seien, dass eine *Haptic Torque-Protection* sie unterstützen könne und sie diese wünschenswert fanden. Einige der Piloten haben dies zudem noch einmal explizit für Hubschrauber gefordert,³ bzw. speziell für ihr Hubschraubermuster. Dabei fällt auf, dass dies speziell von den Piloten gefordert wurde, die ein Muster mit fbw-Steuerung fliegen.⁴ Der Unterschied zwischen den Bewertungen vor und nach der Simulatorevaluation zeigt

³ „empfehlenswert“ (Pilot 2C), „äußerst sinnvoll“ (Pilot 2J)

⁴ „[...] hat das nicht, kein Feedback [am Kollektiv]. Das wäre aber schön“ (Pilot 2M); „Die weitere Evaluierung „Sidestick“ scheint mir absolut sinnvoll. Ich wünsche mir eine Implementierung „Force Feedback“ in die Steuerung von [...]“ (Pilot 2N); „Bei [...] gibt es bereits eine elektrohydraulische Simulation von „Federnpaketen“ (Force Trim), jedoch lassen sich dabei keine Limits erkennen. Dieses wäre gerade neben der optischen Anzeige wünschenswert“ (Pilot 2G); „Bitte

Abbildung 6.5.: **Nützlichkeit und Wunsch, vorher und nachher (n=15)**

zudem, wie wichtig es für eine valide Technologieeinschätzung ist, diese auch wirklich zu testen und sie nicht nur theoretisch zu besprechen.

Zusätzlich zu diesen generellen Fragen, kommentierten die Piloten, in welchen Situationen eine *Haptic Torque-Protection* hilfreich sein könnte. Diese sollten bei der Auslegung zukünftiger *Haptic Torque-Protection* Systeme berücksichtigt werden. Eine *Haptic Torque-Protection* sei allgemein hilfreich, könnte ihr volles Potential aber vor allem in kritischen Situationen ausspielen, etwa bei schlechter Sicht, eng. Degraded Visual Environment (DVE), Single Engine Operations (OEI), Start- und Landung oder Lastentransport,^{5,6,7} aber auch bei dynamischeren Manövern.⁸ Besonders bei leistungsschwachen Hubschraubern sei eine *Haptic Torque-Protection* wichtig.⁹

6.3.2. Systemakzeptanz der *Tactile Cueing*-Designs im Vergleich

Die Grundlage der vergleichenden Bewertung der beiden Designvarianten 2a: „Reibungsstufe und Softstop“, nachfolgend kurz *Reibungsstufe*, und 2b: „Raste und Softstop“ (*Raste*), siehe (Abschnitt 6.1) bildet die Akzeptanzskala nach VAN DER LAAN & DE WAARD [129, S. 3]. Diese wurde nur in den ersten beiden Teilstudien vorgelegt. Die Bewertungsergebnisse der ersten elf Piloten (2A-2K) für beide Designvarianten sind in Abbildung 6.6 aufgetragen. Auf der Querachse sind die Antworten, welche die Zufriedenheit betreffen, aufgetragen, von -2: nicht zufrieden bis 2: zufrieden und auf der Hochachse die Antworten, welche die Bewertung der Nützlichkeit betreffen, von -2: nicht nützlich bis 2: nützlich. Man erkennt, dass die Antworten für die *Reibungsstufe*,

zünftig TRL [erreichen, TRL =Technology Readiness Level, hier gemeint: Serienreife], damit [die *Haptic Torque-Protection*] für [...] interessant [wird]“ (Pilot 2H)

⁵ „Eigentlich in fast jeder Situation könnte so ein System Vorteile bringen, in der der Pilot hauptsächlich auf Außensicht angewiesen ist bzw. kann das System die Notwendigkeit der Überwachung der Torqueinstruments erleichtern (besonders bei Start und Landung und in kritischen Flugsituationen).“ (Pilot 2D)

⁶ „Das würde helfen in brenzigen Situationen rausgucken zu können!“ (Pilot 2J)

⁷ „Hot & High, Gebirgsflug mit Lasten, Transfer IMC (VFR-IFR), Brownout & Whiteout Go-arounds, Single Engine Operation“ (Pilot 2I)

⁸ „Also interesting to look into dynamic maneuvers involving other axis, pedals, left turn“ (Pilot 2O)

⁹ (Pilot 2L)

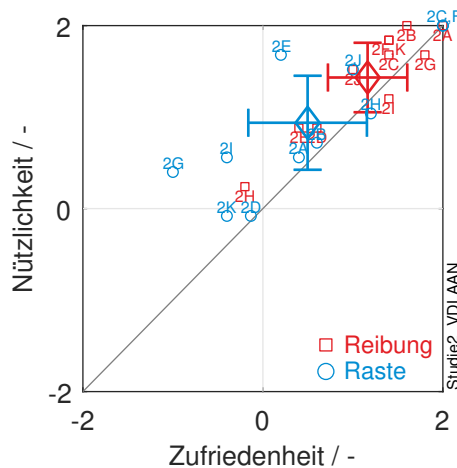


Abbildung 6.6.: **Akzeptanz-Skala: Nützlichkeit über Zufriedenheit beide Konfigurationen, Einzelwerte, Mittelwerte und Konfidenzintervalle (n=11)**

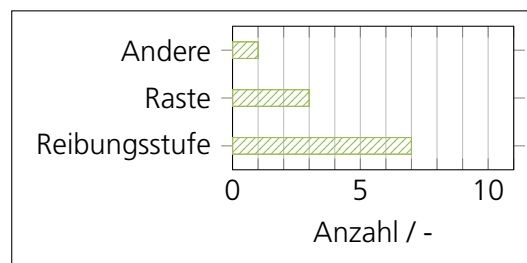


Abbildung 6.7.: **Welches Cue zur Anzeige der Takeoff Power (TOP) halten Sie für sinnvoll? (n=11, mehrere Antworten möglich, 3 keine Antwort)**

mit einer Ausnahme, alle im oberen rechten Quadranten liegen. Die Piloten empfanden diese Ausprägung also als nützlich und waren zufrieden damit. Die Antworten für die *Raste* streuen mehr. Insgesamt liegt ihr Verteilungsschwerpunkt auch im oberen rechten Bereich, fiel aber sowohl für die Nützlichkeit als auch für die Zufriedenheit nicht ganz so gut aus wie für die *Reibungsstufe*. Der Umstand, dass die Verteilungsschwerpunkte beider Ausprägungen oberhalb der Diagonalen liegt, kann als Indiz dafür gedeutet werden, dass die Piloten die Ausprägungen zwar nützlich fanden, aber noch Verbesserungspotential sehen.

Die ersten elf Piloten (2A-2K) wurden außerdem direkt gefragt, welches der gezeigten *Tactile Cues* und frei zu benennender Alternativen sie für geeignet hielten, siehe Abbildung 6.7. Mehrere Antworten waren möglich/erlaubt. Die Antworten decken sich mit den Ergebnissen der System-Akzeptanz-Bewertung der beiden Designs: Sieben Piloten nannten die *Reibungsstufe* und drei Piloten die *Raste*, ein Pilot hielt beide Lösungen für geeignet. Ein Pilot nannte zudem „Vibration“, bzw. „Shaker“ als Alternative. Es gibt also eine Präferenz für das Design 2a: „Reibungsstufe und Softstop“ gegenüber dem Design 2b: „Raste und Softstop“. Die Idee der Raste sollte aber nicht verworfen werden. Denn es zeigte sich, dass die Bewertung letztlich nicht der Idee gilt, sondern der Qualität ihrer konkreten Umsetzung. Zur Bewertung und Ableitung konkreter Verbesserungen und allgemeiner Regeln erfolgt daher nachfolgend ein differenzierterer Blick.

6.3.3. Bewertung einzelner tactile Cueing Elemente

Die Auswertung der Pilotenkommentare, welche die Piloten mündlich während der Versuche und schriftlich in Freitextfeldern des Fragebogens geäußert haben, ermöglicht ein detailliertes Verständnis der Bewertung der gezeigten *Tactile Cues*. Daraus lassen sich auch Designregeln und konkrete Verbesserungen ableiten. Zudem ermöglicht diese Einsicht auch methodische Verbesserungen, wie etwa die Ableitung der für die Bewertung von *Tactile Cues* relevanten Kategorien. Nachfolgend werden die Bewertungsergebnisse und Schlussfolgerungen nach Themen geordnet aufgeführt.

Auswahl der haptisch darzustellenden Informationen

In dieser Studie wurde eine *Haptic Torque-Protection* untersucht, die neben dem Torque-Limit auch den Info-Bereich durch ein *Tactile Cue* darstellt. Es wurde nicht explizit nach der Nützlichkeit des *Info-Cues* gefragt, aber die meisten der dazu abgegebenen Pilotenkommentare geben wieder, dass damit fühlbar würde, in welchem Torque-Bereich operiert wird.^{10,11,12,13,14} Ein weiterer Pilot äußerte, dass er kein *Tactile Cue* für den TOP-Bereich benötige, es aber auch nicht störe.¹⁵ Ablehnende Kommentare wurden nicht geäußert.

Es besteht Uneinigkeit darüber, ob auch das Verlassen des gelben Bereichs per *Tactile Cue* angezeigt werden sollte. Bei der *Reibungsstufe* war das Verlassen des Bereichs nicht spürbar. Das lag daran, dass die erhöhte Reibung innerhalb des TOP-Bereiches spezifikationsgemäß nur aktiv war, wenn der Stick nach oben, in Richtung höheren Torques, gezogen wurde, beim Drücken entsprach die Reibung dem Wert der Region unterhalb des Info-Bereichs. Das Fehlen dieser Information wurde bemängelt.¹⁶ Ein anderer Pilot äußerte hingegen, dass ein *Tactile Cue* dafür nicht notwendig sei und dies stattdessen über eine visuelle Darstellung geschehen sollte.¹⁷

Im Zusammenhang mit der Sorge, dass man das *Stop-Cue* versehentlich überschreiten könnte, wurde gewünscht, dass es ein *Tactile Cue* gibt, welches das Steuer rechtzeitig vor Erreichen der Stop-Position abbremst.^{18,19} Dabei blieb aber offen, inwieweit das hier demonstrierte *Info-Cue*,

¹⁰ „Sehr hilfreich, ich kann fühlen, in welchem TRQ-Bereich ich bin.“ (Pilot 2B)

¹¹ „Sehr hilfreiche Unterstützung - gibt ein „Gefühl“ über den TRQ-Bereich“ (Pilot 2B)

¹² „Hinweise, dass im Bereich „Continuous“/„Maximum“ gearbeitet wird“ (Pilot 2I)

¹³ „Ich will beide Limits spüren: TOP und MTP.“ (Pilot 2L)

¹⁴ „Generell sollte ein Detent dort eingesetzt werden, wo ein First Limit erreicht wird, welcher allerdings für einen längeren Zeitpunkt überzogen werden darf (z.Bsp. AEO Takeoff Power, 2,5 Minuten OEI Power, 30 Min PWR). In dieser Phase hat der LFF [Luftfahrzeugführer] genug Zeit das Limit über den Blick auf die Instrumente oder in seinem HMS zu überwachen. Ein Vibrieren und ein in der Amplitude des Collectives stärker werdendes Cue sollte dann verwendet werden, wenn der LFF keine Zeit hat eine intensive optische Auswertung vorzunehmen und Triebwerkswerte erreicht werden, die nur kurzfristig geflogen werden dürfen (z.B. 00:30 Sekunden Leistung) im Durchstarten oder bei Beschuss oder im Luftkampf.“ (Pilot 2H)

¹⁵ „Cannot get anything out of the TOP cue, but it does not hurt“ (Pilot 2O)

¹⁶ „Beim Rausgehen gut. [Aber] man bekommt nicht mit, dass man raus ist.“ (Pilot 2G)

¹⁷ „Raste nach unten nicht notwendig. Evtl. mit Displaymodifikation: Aufblinken des gelben Bereichs.“ (Pilot 2F)

¹⁸ „Kurze Bremse zu Bereichsbeginn ist sehr gut.“ (Pilot 2J)

¹⁹ „Ich würde mir schon etwas vor Erreichen der Torquelimits einen haptischen Hinweis wünschen, ein Softstop nur an dem Grenzwert selbst schützt ggf. vor einem Overtorque nicht. Die verschiedenen Torquelimits (z.B. OEI-Betrieb) müssen gesondert betrachtet werden.“ (Pilot 2D)

insbesondere die Variante mit dem *Reibungsstufe*, diese Aufgabe schon erfüllt. Dazu ist anzumerken, dass dieses *Tactile Cue* hier nur für Fluggeschwindigkeiten unterhalb von $v_y = 65$ kt vorhanden war. Alternativ sind für das Abbremsen hoher Stickraten auch andere *Tactile Cues* denkbar, etwa eine Erhöhung der Dämpfung in der Nähe des *Tactile Cues* oder durch eine Rückführung der Stickrate auf die Position des *Stop-Cues*, so dass es bereits etwas unterhalb der berechneten Position liegt, wenn der Stick dort auftrifft. Dies erscheint jedoch vor allem für Hubschrauber relevant, bei denen die Torqueantwort unterkritisch gedämpft ist, d.h. zum transienten Überschwingen des stationären Endwertes neigt. Das ist bei dem hier in der Simulation verwendeten Hubschraubermodell nicht der Fall, siehe Abschnitt 4.4.

Für die Alarmierung bei drohender Überschreitung des Torque-Limits wurde ein *Stickshaker* implementiert. Zwar war die Überschreitung nicht Bestandteil der Untersuchung, jedoch haben manche Piloten die Überschreitung zum Ausprobieren bewusst herbeigeführt und den *Stickshaker* damit ausgelöst. Er wurde positiv bewertet.^{20,21} Der *Stickshaker* wurde in der gezeigten Implementierung nicht erst bei einer tatsächlichen Überschreitung des „Transient Limits“ aktiviert, sondern wie alle *Tactile Cues* auf der Basis der Torque-Prädiktion, mit einem Zeithorizont von ca. 2 s. So war es möglich, das Kollektiv bis zum Auslösen des *Stickshakers* zu ziehen und dann rechtzeitig wieder zu senken und einer Torque-Überschreitung zuvorzukommen.²² Der *Stickshaker* zeigte hier also die drohende Überschreitung an, die Überschreitung selbst wird durch den akustischen Gong signalisiert.

Die automatische Auswahl des gültigen Limits durch die *Haptic Torque-Protection* wurde als „gut“ bezeichnet.^{23,24} Auch die OEI-Limits sollten im Falle eines Triebwerksauffalls automatisch ausgewählt und haptisch dargestellt werden.^{25,26}

Intensität: Wirksam, überschreitbar und minimal störend

Tendenziell wurden die Intensitäten der hier erprobten Konfigurationen als zu stark empfunden.^{27,28,29} Dies betraf insbesondere die Höhe der Kräfte der *Reibungsstufe*.^{30,31,32} Auch die Vibrationsamplitude wurde als zu hoch empfunden, die Vibrationsfrequenz hingegen als zu ge-

²⁰ „Alarmsignal, wenn Limit (max) überschritten sind.“ (Pilot 2N)

²¹ „Cool! Rüttelt, schimpft mit mir wie beim Autolenkrad“ (Pilot 2N)

²² „It depends also on the strategy, when the technique is to go to the stop or to go to the shaker and then go back a bit.“ (Pilot 2O)

²³ „Gut, dass er einen raus schiebt [gültiges Limit wechselt von MTP zum niedrigeren MCP, dabei verschiebt sich der *Softstop* am Kollektiv nach unten]“ (Pilot 2L)

²⁴ „Die Degradierung [= Herabsetzung des Limits] ist sehr sinnhaft. Es gibt die Transition bei [...] auch automatisch [zum] kontinuierlichen [Limit]“ (Pilot 2M)

²⁵ „Im 30 s Bereich sind die Augen nicht im Cockpit: darum besonders wichtig“ (Pilot 2H)

²⁶ „auch für OEI Ops“ (Pilot 2K)

²⁷ „Kraftniveau zu hoch, zu schwer.“ (Pilot 2M)

²⁸ „Starke Rückstellkräfte sind problematisch.“ (Pilot 2J?)

²⁹ „Kräfte in derzeitigem Modell zu stark und mit zu großen „Kraftsprüngen“ behaftet“ (Pilot 2N)

³⁰ „Die Reibungsstufe sollte etwas geringer ausfallen. Darüber hinaus sollten die haptischen Unterstützungen abschaltbar sein.“ (Pilot 2G)

³¹ „[Die] Friction [im] gelben [Bereich ist] kräftig, eher das, was ich für den roten Bereich möchte.“ (Pilot 2G)

³² „Übergang am gelben [Limit] zu hoch“ (Pilot 2N)

ring.³³ Die Intensität Höhe des *Softstops* wurde hier nicht bewertet, da die Piloten nicht explizit die Aufgabe hatten, diesen zu überschreiten. Es wurde diesem Zusammenhang allerdings bereits die Forderung gestellt, dass dieser überschreitbar sein müsse.^{34,35,36,37,38,39} Grundsätzlich gilt, dass die *Tactile Cues* die Steuerbarkeit des Hubschraubers nicht über ein akzeptables Maß hinaus einschränken dürfen.⁴⁰ Letztlich muss man bei der Auslegung der Intensität die Störung und das verhinderte Risiko, bzw. die Höhe des verhinderten Schadens gegenüberstellen. Auch darf die Störung ihrerseits nicht zu schwerwiegenden Problemen führen, etwa zu Unfällen durch Kontrollverlust. Wahrscheinlich ist auch der von mehreren Piloten geäußerte Wunsch nach Abschaltbarkeit der *Haptic Torque-Protection* von der Intensität der *Tactile Cues* beeinflusst, siehe nächster Abschnitt.

Abschaltbarkeit

Die Abschaltbarkeit^{41,42,43} der *Haptic Torque-Protection* wurde von mehreren Piloten gewünscht. Dabei wurden Vorschläge gemacht, wie die Abschaltbarkeit realisiert werden kann, etwa generell oder in Form einer Bestätigung, eng. „Acknowledge“, nach dem Kontakt mit dem *Tactile Cue*. Die Piloten begründeten dies damit, dass sie befürchten, ein *Tactile Cue* könnte störend sein, wenn es längere Zeit aktiv ist. Grundsätzlich besteht beim Abschalten einer schützenden Funktion aber die Gefahr, dass der Systembediener/Pilot vergisst, dass sie abgeschaltet ist und im falschen Vertrauen erst eine unbeabsichtigte Überschreitung hervorruft. Zwar ließe sich der Betriebszustand der *Haptic Torque-Protection* visuell anzeigen, aber es besteht die Gefahr, dass die Anzeige übersehen wird, zumal die *Haptic Torque-Protection* ja ermöglichen soll, mehr nach draußen zu schauen. Daher wird der Wunsch nach Abschaltbarkeit als Auslegungskriterium berücksichtigt: Die *Tactile Cues* sollten so ausgeprägt sein, dass sich die Piloten keine Abschaltbarkeit mehr wünschen. Dabei ist es wahrscheinlich, dass die Relevanz der Funktion die tolerierte Störung beeinflusst. Daraus lässt sich die Regel ableiten, dass ein *Tactile Cue* so intensiv wie nötig sein sollte, aber so wenig invasiv oder störend wie möglich. Die *Tactile Cue*-Intensität sollte also minimiert werden. Dies könnte auch dazu führen, dass die Piloten sensibler, bzw. vorsichtiger steuern, um das *Tactile Cue* nicht zu verpassen und damit der oben beschriebene Effekt des „Übervertrauens“ reduziert wird, siehe Abschnitt 5.3.4. Zusätzlich sollte es die Möglichkeit geben, die *Tactile Cueing*-Kräfte bewusst zu deaktivieren oder zumindest zu reduzieren, etwa durch Halten eines „Force-Trim-Release“-Knopfes. Damit erhielte

³³ „Das Vibrieren sollte hochfrequenter werden, dafür weniger stark um von den Vibrationen mit höheren Lastvielfachen unterscheiden zu können.“ (Pilot 2H)

³⁴ „Nutzung des „roten Bereichs“ zur Rettung der Besatzung/Mission ggf. unter Inkaufnahme dauerhafter Beschädigung des Triebwerks oder der Kraftübertragungselemente [in Notsituationen].“ (Pilot 2J)

³⁵ „[Das Cue] muss überdrückbar sein, [denn] da geht man in der confined area auch drüber“ (Pilot 2L)

³⁶ „Es muss trotzdem ein Overtorque ziehbar sein.“ (Pilot 2L)

³⁷ „u.U. zu klinisch, Overrule muss jederzeit gewährleistet sein“ (Pilot 2I)

³⁸ „immer mit der Möglichkeit, dennoch zu überziehen (wenn nötig)“ (Pilot 2J)

³⁹ „Vibrationen und kurzzeitig überdrückbare Stops ok“ (Pilot 2H)

⁴⁰ „Die Kräfte dürfen nicht die Feinfühligkeit beeinträchtigen.“ (Pilot 2A)

⁴¹ „Raste und Softstop sollten nach Bestätigung durch den Piloten wieder frei gegeben werden.“; „Keine Rückführung, die nicht durch Trim-Release ausgeschaltet werden kann.“; „nach Bestätigung/Stop sollte die Steuerung wieder freigegeben werden (Nutzung des „roten Bereichs“ zur Rettung der Besatzung/Mission ggf. unter Inkaufnahme der dauerhaften Beschädigung von Trw oder Kraftübertragungselementen).“ (Pilot 2J)

⁴² „Torque Protection abschaltbar: sonst störend beim Fliegen im Grenzbereich. ⇒ missionsabhängig. Es gibt Leute, die wollen das nicht. Freie Entscheidung muss da sein.“ (Pilot 2F)

⁴³ „Cues sollten abschaltbar sein.“ (Pilot 2G)

der Pilot die Möglichkeit, den Kraftaufwand zu reduzieren, wenn längere Zeit absichtlich oberhalb der Limits operiert werden soll oder im Fehlerfall, falls das *Tactile Cue* etwa bei zu niedrigen Torque-Werten wirksam werden sollte.

Raste: Mangelnde Präzision durch zu großen Wirkbereich

Grundsätzlich war die Funktion der Raste verständlich. Der Hauptkritikpunkt an der Raste betraf die Störung bei der Feinsteuerung, die zum einen aus der zu hohen Intensität, aber auch aus dem relativ großen Wirkungsbereich, der hier gezeigten Implementierung, resultierte. Dabei wurde der Stick bereits in der Nähe der Raste, sowohl oberhalb als auch unterhalb, in die Rastenmitte gezogen.⁴⁴ Dies wurde als störend empfunden und verursachte zusätzliche Arbeitsbelastung.⁴⁵ Dabei könne die Raste sogar als Defekt interpretiert werden.⁴⁶ Zudem wurde angemerkt, dass leichte Vibrationen auftraten, die vermutlich als störend empfunden wurden.⁴⁷ Als konkrete Verbesserungsmaßnahmen wurden angeführt, dass die Raste enger sein sollte⁴⁸ oder die Raste nach Bestätigung durch den Piloten oder automatisch ausgeblendet werden könnte,⁴⁹ bzw. bei Bewegung nach unten grundsätzlich nicht da sein bräuchte.⁵⁰ Zusammenfassend muss man feststellen, dass die Raste in ihrer hier realisierten Form nicht als Darstellung einer Bereichsgrenze, weil sie das Steuer dort zentriert. Die Bereichsgrenze wird zwar deutlich, aber zum Preis eines nicht tolerierten Verlusts der Steuerpräzision. Eine mögliche Lösung wird im nächsten Designentwurf vorgestellt, siehe Abschnitt 7.1.

Mode Awareness

Die dem Designkonzept 2a: *Reibungsstufe* zu Grunde liegende Anforderung war, dass es möglich sein sollte, anhand des *Tactile Cue* zu jedem Zeitpunkt fühlen zu können, in welchem Leistungsreich sich der Hubschrauber gerade befindet, d.h. eine Mode Awareness zu schaffen. Dieses sollte auch dann vermittelt werden, wenn der Pilot das *Tactile Cue*, das den Wechsel in einen Bereich anzeigt „übersehen“ bzw. verpasst hat oder sich nicht mehr daran erinnert. Zumindest ein Pilot hat

⁴⁴ „Raste hilft dem LFF [Luftfahrzeugführer, Anmerkung] und erklärt sich von selbst, allerdings beim Senken des COL [Kollektivhebel] ist die Raste hinderlich, da Lstg. [Leistung] nicht in vollem Band des gelben Bereichs nutzbar.“ und „-Der Softstop (sic!), [aber es ist ein Detent!] zieht den COL in das Loch um die Position x.“ (Pilot 2F)

⁴⁵ „Raste stört beim zügigen Einsetzen, z.B. im Brownout.“ (Pilot 2I); „Raste hat gefühlt einen großen Spalt (wirkt grobmotorisch).“ (Pilot 2K); „Spalt der Raste zu groß (ergibt zu großen Rand)“ (Pilot 2K); „Raste mit Softstop scheint sehr gewöhnungsbedürftig, da Aufwand betrieben werden muss auch für -Tq“ (Pilot 2I)

⁴⁶ „Raste könnte den Eindruck eines mechanischen Defekts erwecken“; „Immer wenn was rastet, habe ich immer das Gefühl, das ist mechanisch, da hakt was. Ist da was im Argen (z.B. Abdeckung/Faltenbalg)? - Unangenehm.“ (Pilot 2G) und „Raste noch zu hinderlich, gerade bei -Tq Eingaben. Scheint als Hindernis, leider auch nach unten (-Tq) [-Tq bedeutet Reduktion des Torques, Anmerkung].“ (Pilot 2I)

⁴⁷ „Raste rippelt leicht, merkt man auch beim Rausgehen.“ (Pilot 2G)

⁴⁸ „Spalt bei Raste kleiner (dämpfen) [Anmerkung: Dämpfung alleine ist nicht der richtige Parameter, könnte aber in Zusammenhang mit einem engeren Detent richtig sein] (Pilot 2K)

⁴⁹ Anschlagsdarstellung gut, sollte dann verschwinden: Acknowledge oder automatisch ist egal: Raste [jetzt] dauert zu lange“ (Pilot 2J)

⁵⁰ „Raste nach unten nicht notwendig. Evtl. mit Displaymodifikation: Aufblinken des gelben Bereichs.“ (Pilot 2F)

kommentiert, dass dies mit dem Design möglich ist.⁵¹ Weil es nur durch einen Piloten geäußert wurde, kann hier nicht generalisiert werden, dass dies für alle Piloten gilt. Der Fragenkatalog sollte daher explizit um diese Kategorie erweitert werden, etwa „Wussten Sie stets, in welchem Leistungsbereich sich der Hubschrauber befand?“.

Zuordenbarkeit

Meist waren die *Tactile Cues* von Anfang an intuitiv verständlich. Einige Piloten hatten aber zunächst nicht verstanden, dass das *Tactile Cue* prädiktiv ist und an der Steuerposition wirkt, an welcher die stationären Torqueantwort das Limit erreichen wird. Die visuelle Anzeige zeigt den aktuellen gemessenen Torque, welcher aufgrund seines Tiefpaßverhaltens erst verzögert diesen Endwert erreicht, siehe auch Abschnitt 4.4. Wenn der Pilot also in dem Moment, in dem er das *Tactile Cue* spürt, auf die Anzeige schaut, ist die Nadel noch nicht am Limit, bzw. der zugehörigen Markierung angekommen. Daraus schlussfolgerten sie ein fehlerhaftes Verhalten der *Haptic Torque-Protection*.⁵² Die Erläuterung dieses Zusammenhangs, verbunden mit der Anweisung es auszuprobieren und einen Moment zu warten, bis der Zeiger zum Stehen kommt, führte augenblicklich dazu, dass der Pilot sein Urteil wieder revidierte. Nichtsdestotrotz haben manche Piloten angemerkt, dass der Torque, bzw. die visuelle FLI-Anzeige im Simulatorcockpit stärker nacheilt als im realen Hubschrauber. Das ist insofern von Relevanz, als große Verzögerungen der Systemantwort auf eine Steuereingabe nachteilig sind. Je höher also die Verzögerung der Anzeige ist, desto schlechter dürfte das System ohne *Tactile Cue* bewertet werden, desto besser stünde also die *Haptic Torque-Protection* mit Prädiktor im Vergleich dazu da. Das hier verwendete Torque Dynamikmodell war gemäß ADS-33 jedoch repräsentativ für einen Hubschrauber und lag im Bereich der Anforderungen für gute Flugeigenschaften, siehe Abschnitt F.2. Zudem war es in allen Konfigurationen mit und ohne *Tactile Cueing* identisch. Es lässt sich also festhalten, die *Haptic Torque-Protection* mit ihrem Prädiktor wahrscheinlich einen Vorteil gegenüber der reinen visuellen Anzeige des Torque-Messwerts darstellt. Dies setzt aber voraus, dass die Piloten gelernt haben, dass es diesen zeitlichen Vorhalt gibt und der *Haptic Torque-Protection* vertrauen.

Grundsätzlich ist es wichtig, dass die *Tactile Cues* eindeutig einer Ursache zugeordnet werden können und nicht verwechselt werden.⁵³ Außerdem muss die *Haptic Torque-Protection* zuverlässig und korrekt arbeiten.⁵⁴ Eine mögliche Verbesserung könnte darin bestehen, die Torque Prädiktion in die visuelle Anzeige mit aufzunehmen. Damit könnten die Piloten kontrollieren, was sie gerade durch das *Tactile Cue* vermittelt bekommen und ob das korrekt ist. Solch eine Torque Prädiktor

⁵¹ „Das Konzept 1 ermöglicht es, ständig nach draußen zu schauen und trotzdem immer zu wissen, in welchem Leistungsbereich ich mich befinde. Die Korrektur, wenn der Leistungsbereich überschritten wird, ist sehr hilfreich - immer unter dem Aspekt „Die Augen draußen zu halten“ und damit viel Konzentration auf die Hindernissituation lenken zu können“(Pilot 2A)

⁵² „Die Vibration und die starken Rückstellkräfte im gelben Bereich sind problematisch.[Anmerkung: Im gelben Bereich gibt es keine Rückstellkräfte und Vibration. Diese beginnen erst im roten Bereich. Wenn der Pilot in dem Moment, in dem er den *Tactile Cue* spürt, auf die Anzeige schaut, kann er also den Eindruck gewinnen, das *Stop-Cue* würde bereits im gelben Bereich wirken. Schaute er lange genug, würde er sehen, dass die Anzeige dann noch bis an den roten Bereich heran weiterläuft und exakt dort stehen bleibt, wenn er am *Tactile Cue* bleibt.]“(Pilot 2J)

⁵³ „Gefahr von Fehlinterpretation bei anderen Lfz. Typen?“ (Pilot 2B)

⁵⁴ Sehr hilfreich, sofern die Technik einen „Reifegrad“ erreicht, welcher eine Fehlinformation bzw. -anzeige nahezu ausschließt (Pilot 2C)

Anzeige könnte möglicherweise auch unabhängig von einem *Tactile Cue* vorteilhaft sein in, falls etwa die Integration aktiver Steuerorgane in den Hubschrauber nicht möglich ist.

6.3.4. Methode zur Beurteilung von tactile Cueing

Die Bewertung von *Tactile Cues* in Bezug auf ihre Eignung für eine spezifische Aufgabe ermöglicht nur eine begrenzte Übertragung der Eignung für andere Aufgaben. Um dies zu ermöglichen, sollten die Piloten auch konkret gefragt werden, welche anderen Applikationen sie für ein spezifisches *Tactile Cue* sehen oder allgemeiner, was die verstandenen Intention der *Tactile Cues* war: „Welche Intention hatte Ihrer Meinung nach das *Tactile Cue* xy?“ oder „Das *Tactile Cue* xy hat mich: informiert, gewarnt, gestoppt, irritiert, gestört.“

6.4. Zusammenfassung Studie 2

Das Hauptziel dieser Teilstudie war die Erfassung der Pilotenakzeptanz einer *Haptic Torque-Protection* im allgemeinen und der Ableitung von geeigneten Designmerkmalen für ein *Tactile Cue* zur Darstellung des Info-Bereiches, bzw. des mit dem gelben FLI-Display-Bereich korrespondierenden Steuerbereichs. Dazu wurden zwei *Tactile Cue*-Prototypen im AVES Simulator implementiert. Insgesamt 15 Piloten haben diese Prototypen in der realistischen Einsatzumgebung „Obstacle City“ in Form einer explorativen Studie auf ihre Gebrauchstauglichkeit und Akzeptanz hin erprobt und bewertet. Sie stammten aus unterschiedlichen Bereichen, sowohl militärisch als auch zivil und hatten Erfahrung auf verschiedenen Hubschraubermustern. Die Studie ergab zusammengefasst die folgenden Ergebnisse:

1. Alle Piloten hielten eine *Haptic Torque-Protection* im Hubschrauber für nützlich und wünschenswert. Sie sei generell hilfreich und würde sich in schwierigen Situationen, wie Start und Landung, sogar als besonders nützlich erweisen.
2. Die hier realisierten Prototypen der *Tactile Cues* für den gelben Torque-Info-Bereich wurden meist als noch zu kräftig empfunden, und damit als potentiell störend. Man kann festhalten, dass ein *Tactile Cue* wirksam sein muss, überschreitbar und minimal störend bei der Steuerung. Das akzeptierte Maß der Störung durch ein *Tactile Cue* ist vermutlich von der Funktion abhängig und richtet sich nach der empfundenen Höhe des damit abzuwendenden Risikos.
3. Der Prototyp „*Reibungsstufe*“ wurde als nützlicher und zufriedenstellender empfunden als der Prototyp „*Raste*“. Die Hauptkritik an der *Raste* war ihre relativ große Randwirkung, welche eine Feinpositionierung im Randbereich erschwert und bezog sich damit auf die konkrete Implementierung, bzw. Ausprägung in der verwendeten Hardware. Vorteilhaft an der *Raste* wurde bewertet, dass sie deutlich vernehmbar war. Daher sollte die Idee der *Raste* als Hinweis für den Wechsel des Betriebsbereichs nicht komplett verworfen werden, sondern idealerweise mit der *Reibungsstufe* vereint werden, um die Wirkung beider Formen nutzen zu können: die kontinuierlich wirkende Reibung innerhalb des Bereichs und die Signalisierung der Schwelle.

Eine alternative Implementierung der *Raste*, mit kleinerer Randwirkung wird in Abschnitt 7 vorgestellt.

4. Die *Haptic Torque-Protection* sollte um den OEI-Betrieb erweitert werden und um die Möglichkeit die *Tactile Cue*-Intensität durch Halten einer Taste am Griff (Force-Trim-Release) zu reduzieren.

7. Finales System - Studie 3: Fokus visuelle Aufmerksamkeit

Der Schwerpunkt dieser Studie liegt in der Ermittlung des Einflusses einer *Haptic Torque-Protection* auf die **visuelle Aufmerksamkeit** des Piloten (wissenschaftliche Frage 3. Speziell soll untersucht werden, ob mit *Tactile Cueing* mehr visuelle Ressourcen zur Erfassung der Außenwelt zur Verfügung stehen. Dazu wird ein Simulatorflugversuch mit einem System zur Erfassung der Blickbewegung durchgeführt. Vorher wird das *Tactile Cueing* Design auf Basis der Erkenntnisse aus den vorherigen beiden Studien überarbeitet. Erneut werden, wie schon in Studie 1 (Abschnitt 5), die folgenden Fragen für das neue *Tactile Cueing* Design untersucht: Die **Präzision**, d.h. der Nutzungsgrad der zur Verfügung stehenden Leistung, bzw. des Torques und die Höhe der Überschreitungen (wissenschaftliche Frage 1), die **Arbeitsbelastung** (wissenschaftliche Frage 2) und die von den Piloten aufgewendeten **Kräfte** im Kontakt mit dem *Tactile Cue* (wissenschaftliche Frage 4) und schließlich die **Pilotenakzeptanz**, bzw. die Nutzerzufriedenheit der *Haptic Torque-Protection* im Allgemeinen und des *Tactile Cueing*-Prototypen im Besonderen (wissenschaftliche Frage 5).

Die Weiterentwicklung des *Tactile Cue*-Designs wird im nachfolgenden Abschnitt 7.1 beschrieben. Daran schließt sich die Vorstellung der für die Untersuchung ausgewählten Methoden und die Gestaltung, bzw. Durchführung einer Studie mit Piloten im AVES an. Die Ergebnisse werden präsentiert und anschließend diskutiert.

7.1. Tactile Cue Design 3

Das nachfolgend beschriebene Design des *Tactile Cues* basiert auf den Erfahrungen und den Empfehlungen der Piloten in den vorherigen Untersuchungen. Sowohl die Repräsentation der Stop-Position als auch der Info-Position wurden optimiert. Die Abbildung 7.1 zeigt das kombinierte Design für das *Stop-Cue* und das *Info-Cue*. Tabelle 7.1 stellt die zugehörigen Werte dar. Das Design und seine Umsetzung wird nachfolgend erläutert.

In den früheren Versuchen war aufgefallen, dass unterschiedliche Piloten unterschiedlich viel Kraft aufwenden, wenn sie das Steuer am *Softstop* halten. Das führte wegen der endlichen Steifigkeit des *Softstops* zu einer Streuung an unterschiedlich hohen Überschreitungen der *Softstop*-Position, siehe Abbildung 5.14. Das bedeutet, dass ein *Softstop* immer eine gewisse Ungenauigkeit aufweist. Es wurde gezeigt, dass es von der Sensitivität des begrenzten Zustands abhängt, ob diese toleriert werden kann oder nicht. Theoretisch müsste also ein *Softstop* ohne Ausdehnung, mit „senkrechtem“

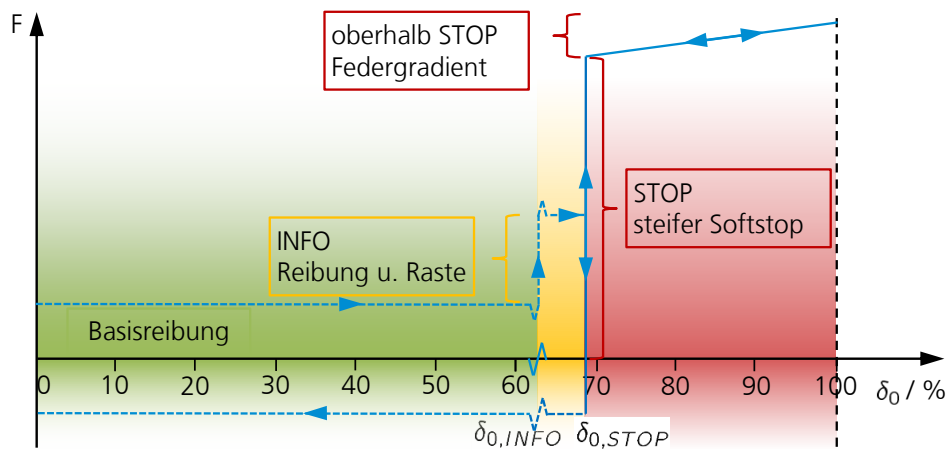

 Abbildung 7.1.: **Tactile Cue-Design 3: STOP: steifer Softstop, INFO: Reibung u. Raste**

 Tabelle 7.1.: **Tactile Cue-Design Parameter Design 3**

Basis		$\delta_{0,INFO}$		$\delta_{0,STOP}$		
Reib.	Dämpf.	Reib.	Raste	Höhe	Weite	Grad.
N	Ns/mm	N	-	N	mm	N/mm
4,0 ¹	0,0	10,0 ¹	ja ²	50,0 ¹	0 ³	∞^3

¹ Kalibrierter Wert, auf ganze Zahl gerundet.

² Pseudoraste: Aktivierung des Stickshakers mit 20 Hz für ca. 70 ms.

³ Idealerweise mit Weite 0 und unendlicher Steigung.

Kraftanstieg, bzw. sehr hohem Gradienten den Einfluss unterschiedlicher Handkräfte eliminieren. Solch ein *Tactile Cue* wird in der *SAE-ARP Stop* genannt [97, S. 25], siehe auch Abbildung 2.2b. Die verwendete Hardware verfügt jedoch nicht über solch ein *Tactile Cue*. Die Idee, dazu die *Softstop*-Funktion zu verwenden und den Gradienten entsprechend zu erhöhen, scheiterte: Der *Softstop*-Gradient lässt sich nur bis zu einem endlichen – zu niedrigen – Maximalwert erhöhen, bevor es zu Oszillationen kommt.

Es konnte die folgende alternative Lösung gefunden werden, die sich aus der Kombination vorhandener *Tactile Cues* ergibt. Deren Basis ist die *Hardstop*- oder *Endstop*-Funktion, siehe Abbildung 2.2c. Der *Hardstop* verfügt über eine gefühlt höhere Steifigkeit, als sich mittels *Softstop* erreichen lässt und zeigt keine Oszillationsneigung.¹ Ein weiterer Vorteil des *Hardstops* gegenüber dem *Softstop* ist, dass die Basisreibung dort keine Hysterese hervorruft. Weil der *Hardstop* normalerweise als Endanschlag zur Begrenzung des Steuerungswegs verwendet wird, wendet dabei nötigenfalls die Maximalkraft auf, um die Position zu halten. Es lässt sich also nicht überschreiten. Damit er sich, wie das in der Abbildung 7.1 dargestellte *Stop-Cue* überschreiten lässt, wird er durch die *Haptic Torque-Protection*-Software bei Erreichen des vordefinierten Kraft-Schwellwertes deaktiviert. Damit der Sidestick dann nicht plötzlich kraftfrei wird und es zu einer unbeabsichtigten sprunghaften

¹ Der *Hardstop* scheint geräteseitig nicht wie der *Softstop* als Kraft-Weg Regelung sondern als feste Positionsregelung realisiert zu sein. Sobald die *Hardstop*-Position erreicht wird, versucht das aktive Steuerorgan den Stick auf dieser Position zu halten, solange eine Kraft in Richtung des *Hardstops* wirkt. Tatsächlich unterliegt der Stick auch in dieser Betriebsart den physikalischen Begrenzungen des elektromechanischen Systems und erreicht nur eine endliche Steifigkeit.

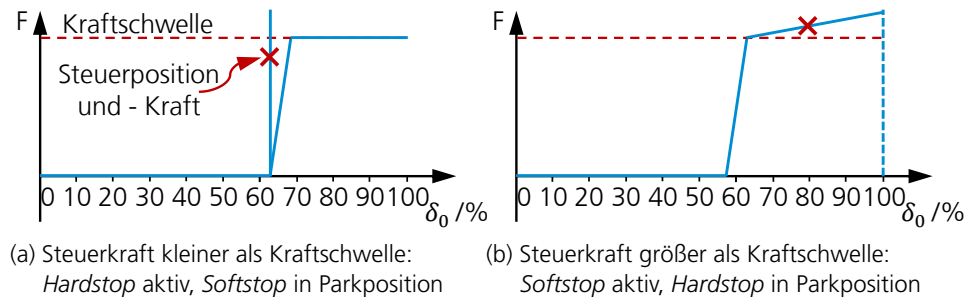


Abbildung 7.2.: **Deaktivierung des Hardstops bei Überschreitung der Kraftschwelle**

Eingabe kommt, tritt in dem Moment der Deaktivierung des *Hardstops* ein *Softstop* mit derselben Kraftschwelle (Höhe) an dessen Stelle, siehe Abbildung 7.2. Diese Umschaltung ist für den Piloten nicht spürbar.

Leider zeigte sich, dass die auf dem aktiven Steuerorgan implementierte *Hardstop*-Funktion ein für diese Anwendung ungünstiges Verhalten aufwies, das gesondert kompensiert werden musste. Der *Hardstop* stoppt zwar wirksam den Stick an der kommandierten Position, wenn der Stick von unten darauf zu bewegt wird. Wenn der *Hardstop* allerdings auf eine neue Position unterhalb der aktuellen Stick-Position kommandiert wird, bewegt er den Stick nicht mit. Der *Hardstop* verhindert dann lediglich, dass er weiter nach oben gezogen werden kann. Der Stick kann aber manuell nach unten bewegt werden. Dann wandert der *Hardstop* wirksam nach unten mit, bis die kommandierte *Hardstop*-Position erreicht ist. Dieses Verhalten ist problematisch, weil der Pilot dann, obwohl er das Gefühl hat Stick im Kontakt mit dem *Hardstop* zu halten, einen hohen Kollektivwert kommandieren würde, der zu einer Überschreitung des Torque-Limit führen würde. Die Bewegung des *Hardstops* nach oben, d.h. vom Stick weg, funktioniert hingegen, auch wenn das Steuer bereits im Kontakt damit ist. Zur Gewährleistung einer Führung des Steuers nach unten wurde ein „verborgener“ *Softstop* implementiert, siehe Abbildung 7.3. Dieser liegt genau hinter dem *Hardstop* und wird synchron mit ihm verschoben, solange die *Hardstop*-Position nicht unterhalb der Stickposition ist (a). Dann ist er für den Piloten nicht spürbar. Erst wenn die kommandierte *Hardstop*-Position unterhalb der aktuellen Steuerposition liegt (b), verfährt der *Softstop* nach unten und schiebt das Steuer unter den *Hardstop* (c). Zur Vermeidung von Oszillationen erfolgt dies nicht sprunghaft sondern rampenförmig, mit einer Rate von 1 %/s. Zusätzlich wurde eine Toleranz von 0,5 % definiert, um welche die Steuerposition hinter der *Hardstop* liegen darf, bevor der *Softstop* losläuft. Wenn der *Softstop* das Steuer vor *Hardstop* geschoben hat, springt er wieder zurück hinter den *Hardstop* (d). Dieses Zurückspringen ist nicht fühlbar, da der *Hardstop* ja, wie oben beschrieben, eine Bewegung nach oben verhindert. Der Kraft-Schwellwert dieses *Softstops* entspricht dem, bei welchem auch der *Hardstop* deaktiviert wird, siehe Tabelle 7.1. Dadurch bleibt eine willentliche Überschreitung mit dieser Kraft trotzdem möglich. Bei der späteren Bewertung dieses *Tactile Cue*-Designs muss berücksichtigt werden, dass es sich dabei nicht um ein ideales *Stop*-Cue handelt, weil die oben beschriebene Kompensation eine zusätzliche Weichheit, bzw. Toleranz einführt, siehe Abschnitt 7.3.4.

Zur haptischen Darstellung des gelben Bereichs wurde der Reibungssprung ausgewählt, siehe Abbildung 7.1. Die erhöhte Reibung im gelben Bereich ist richtungsabhängig. Das bedeutet, sie ist

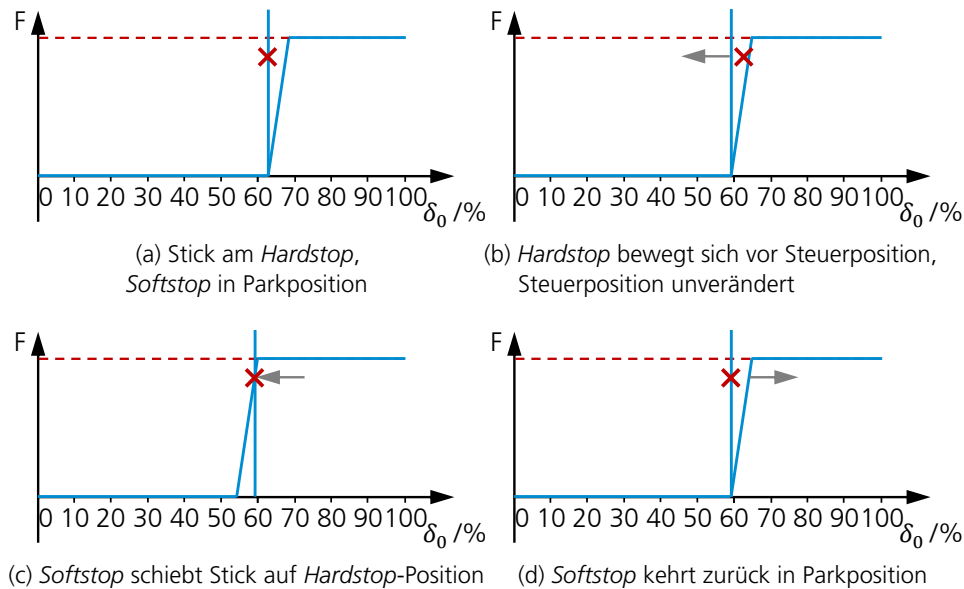


Abbildung 7.3.: **Softstop schiebt Stick aus Hardstop**

nur beim Bewegen des Steuers in Richtung höheren Torques erhöht. Beim Bewegen nach unten ist sie so hoch wie im nominellen Bereich. Das ist erforderlich, um zu vermeiden, dass beim nach unten Bewegen des Sidesticks, wieder aus dem gelben Bereich heraus, eine sprungartige und unvorhergesehene Reduktion der Reibung entsteht. Diese würde zu einer unkontrollierten Eingabe führen, da der Pilot zunächst gegen einen hohen Widerstand anarbeiten müsste, um den Stick zu bewegen, der dann plötzlich fehlt. Dieser Effekt wurde von *Müllhäuser und Barnett* in Versuchen zur Handhabbarkeit eines plötzlich auftretenden Verlusts der Steuerkraft von aktiven Steuerorganen gezeigt [96, S.5].

Zusätzlich soll die Überschreitung der Info-Position, d.h. sowohl das Eintreten als auch das Verlassen des gelben Bereichs durch eine Raste verdeutlicht werden. Da sich in der vorherigen Studie, Abschnitt 6, gezeigt hatte, dass die implementierte Rastenfunktion, damit sie bei moderaten Steuerraten deutlich vernehmbar ist, einen zu großen Wirkungsbereich besitzt, wurde eine Alternative gesucht und gefunden. Anstatt die Raste wie zuvor durch eine lokale Modifikation der Federkennlinie zu realisieren, d.h. über eine wegabhängige Funktion, wurde dieses Mal eine zeitlich definierte Sequenz eines Kraftverlaufs gewählt, der den Eindruck einer Raste vermittelt. Diese fühlt sich unabhängig von der Steuerrate immer gleich an. Realisiert wurde dies mit der *Stickshaker*-Funktion des Sidesticks, dessen Frequenz und Aktivierungsdauer so gewählt wurden, dass sich in etwa ein einzelner Sinus ergibt. Da diese Funktion, wie auch die Reibungsfunktion, nicht an eine Position gebunden ist, sondern lediglich an- und wieder abgeschaltet werden kann, ergeben sich in der Einschränkung in der Präzision hinsichtlich der Steuerposition, an welcher der Pilot die Raste spürt. Die erreichbare Präzision wird dabei von der Gesamtlatenz aus Taktrate und Signalübertragung begrenzt. Die Präzision konnte durch einen zeitlichen Vorhalt etwas erhöht werden. Dazu wurde die Steuerrate einbezogen, um zu bestimmen, ob die Info-Position vor dem nächsten Takt über- oder unterschritten wird. Wenn dies Fall war, wurde die „Raste“ aktiviert, bzw. deaktiviert. Auch die Reibung wird dann für den im gelben Bereich definierten Bereich gesetzt. Bei einer angenommenen Latenz von ca. 30 ms ergeben sich dabei theoretisch bei einer langsamen Steuerrate von 10 %/s eine

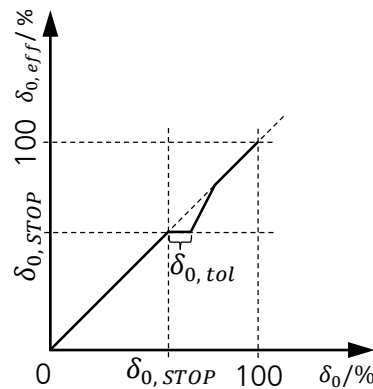


Abbildung 7.4.: **Collective-Skalierung mit Haltestufe, „Deadzone“, nach [128, S.9]**

Toleranz von 0,3 %, d.h. von hier ca. 0,3 mm, bei einer sehr hohen Stellerrate von 100 %/s eine Toleranz von bis zu 3 %, d.h. ca. 3 mm. Allerdings nimmt erfahrungsgemäß auch die Präzision der Positionswahrnehmung mit der Stellerrate ab. Zur Vermeidung von Umschalteffekten, wurde für die Deaktivierung eine Hysterese implementiert. Dazu muss die Info-Position hier erst um 0,5 % Steuerweg unterschritten sein, bevor die Raste erscheint.

Die Ausprägungen der Elemente des oben beschriebenen Designs sind in Tabelle 7.1 notiert. Die Höhe des Reibungssprungs wurde in Vorversuchen mit Piloten eingestellt. Sie sollte hoch genug sein, um auch bei höheren Stellerraten spürbar zu sein und niedrig genug, um so wenig wie möglich zu stören. Die Parameter für die als „Pseudoraste“ verwendete *Stickhaker*-Funktion wurden so eingestellt, dass sich der Eindruck einer Raste ergibt. Damit die auftretenden Kräfte bei der Kontaktaufnahme und beim Halten am *Hardstop* an der Stop-Position für verschiedene Piloten und in unterschiedlichen Situationen gemessen werden können, ohne dass es zu einer versehentlichen Überschreitung kommt, wurde die Kraftschwelle mit 50 N bewusst auf sehr hohen Wert gesetzt. Bei diesem Design wurde die viskose Dämpfung komplett deaktiviert. Sie ist zumindest im unteren Teil der Kurve nicht mehr nötig, weil es dort keine Steifigkeit/Federkraftgradient mehr gibt und damit keine Schwingungsneigung des Referenzsystems. Die Reibung sorgt in diesem Fall für die Dissipation von Störungen.

Um die Präzision der *Haptic Torque-Protection* zu steigern, bzw. die Toleranz der aktuellen Umsetzung des *Tactile Cueing* auszugleichen, wird bei $\delta_{0,STOP}$ eine Haltestufe, eng. *Deadband*, eingeführt, wie von [128, S.9] vorgeschlagen, siehe Abbildung 7.4. Dazu wurde eine entsprechende Logik implementiert, die das effektive Stellersignal $\delta_{0,eff}$ konstant auf $\delta_{0,STOP}$ hält, so lange sich der Stick in dem Bereich zwischen $\delta_{0,STOP}$ und einem voreingestellten Toleranzwert $\delta_{0,tol}$ befindet (hier 0,5 %). Danach schließt sich ein Bereich an, in dem die Kurve wieder auf die 1:1 Zuordnung zurückgeführt wird. So ist gewährleistet, dass trotz des Plateaus der volle Steuerbereich verfügbar und eine bewusste Überschreitung möglich ist. Zusätzlich zu diesen Maßnahmen wird eine Sicherheitsmarge von 0,2 % Steuerweg eingeführt, um welche das *Tactile-Cue-Position* vor der berechneten Stop-Position platziert wird.

Weil in dieser Studie auch ein Testfall mit plötzlichem Auftreten von OEI untersucht wird, wurde hier extra die akustische Warnung in Form eines „Gong“-Signals aus der H135 in den Flugsimulator implementiert und bei OEI ausgelöst. Zusätzlich leuchtet im Cockpit die „Master-Caution“-Anzeige.

Eigentlich wird der „Gong“ in der H135, also auch im ACT/FHS auch bei einer Überschreitung des Torque-Limits ausgelöst. Das wurde im Simulator jedoch nicht umgesetzt, auch in den früheren Studien nicht.

7.2. Simulatorflugversuch

Die oben genannten Fragestellungen wurden mit Piloten in einem Flugversuch im Hubschraubersimulator des AVES, siehe Abschnitt 3, untersucht.

7.2.1. Pilotenauswahl

Drei Testpiloten der Bundeswehr haben an der Evaluation des Systems teilgenommen. Alle verfügten über eine Testpiloten-Lizenz und haben als solche sowie während ihres Truppeneinsatzes umfassende Flugerfahrung (2000 bis 5000 Flugstunden) gesammelt. Insgesamt verfügte die Gruppe über Erfahrung auf vielen unterschiedlichen, aktuellen Hubschraubermustern, darunter große Transport- und Mehrzweckhubschrauber, wie CH-53GS/GE, NH90 und Sea King MK-41, mittlere Hubschrauber wie die Sea Lynx MK-88a sowie leichte Hubschrauber, wie die Bo-105, H145, UH-1D und der Alouette-II. Das Einsatzspektrum war breit und deckt spezifische Szenarien aus Heer, Marine und Luftwaffe ab, darunter Tag- und Nachtflug mit Einsatz von Nachtsichtgeräten, Instrumentenflug, Seeflug und Schiffsdecklandungen, Gebirgsflug sowie Winden- und Lasthakenoperationen. Weitere Details zur Vorerfahrung der Piloten sind in Anhang A dokumentiert.

7.2.2. Versuchsaufbau

Die Evaluation erfolgte im H135 Simulationscockpit des AVES am DLR Braunschweig, siehe Abschnitt 3. Das Cockpit wurde mit einem System zur Erfassung der Blickbewegung ausgestattet, siehe unten.

Für die Untersuchung wurde ein mathematisches Hubschraubermodell mit Flugregelungsunterstützung in Form einer Lageregelung, Attitude Command / Attitude Hold (ACAH) in der Nick- und Rollachse sowie einer Ratenregelung Rate Command (RC) in der Gierachse genutzt. Die Hub- bzw. Kollektivachse blieb ungeregelt. Die Dynamik des Modells erfüllt die Flugeigenschaftskriterien für Handling Qualities Level 1 gemäß [106], siehe Performance Charts im Anhang, Abschnitt F.3.

Weil die virtuelle Masse der Hubschraubersimulation relativ niedrig eingestellt war und sich zum Versuchszeitpunkt nicht verändern ließ, waren die Steigraten zunächst unrealistisch hoch. Daraufhin wurde der Effekt einer höheren Masse durch Hinzufügen eines Offsets von 14 % auf den angezeigten Torquewert und den Torque-Prädiktor simuliert.

7.2.3. Flugaufgabe

Die Anforderungen an das MTE ergeben sich aus dem Untersuchungsziel, die Blickbewegung und den visuellen Fokus sowie die Arbeitsbelastung zwischen den Konfigurationen mit und ohne *Tactile Cueing* während des Startvorgangs miteinander zu vergleichen. Dabei sollte der Pilot ein Interesse verspüren, tatsächlich so viel wie möglich nach draußen zu schauen. Um ein möglichst vollständiges Bild für die Ermittlung der beim Fliegen mit *Tactile Cueing* auftretenden Steuerkräfte zu erhalten, sollte das Manöver außerdem die folgenden verschiedenen Situationen abdecken: Kontaktaufnahme mit dem *Tactile Cue*, Halten am *Tactile Cue* und Bewegtwerden durch das *Tactile Cue*. Letztlich sollte das Manöver einen militärischen Bezug haben, da diese Studie in einem Projekt² durchgeführt wurde, welches das übergeordnete Ziel der Untersuchung des Einsatznutzens von *Tactile Cueing* hatte.

Das gewählte MTE leitet sich von einem Startvorgang in der Hinderniskulisse und der Bedrohung durch Beschuss durch un gelenkte Waffen ab. Dabei kommt es darauf an, die Expositionszeit im niedrigen Höhenbereich, nach Verlassen der natürlichen Deckung, möglichst kurz zu halten und es so einem Schützen zu erschweren, den Hubschrauber ins Visier zu nehmen. Der Pilot hat dazu zuerst die Aufgabe in der Deckung der Hindernisse abzuheben und unterhalb der Baumwipfel auf eine möglichst hohe Geschwindigkeit zu beschleunigen. Je höher die erreichte Geschwindigkeit ist, desto mehr Höhe lässt sich durch Umwandlung der kinetischen in potentielle Energie gewinnen. Beim Steigen wird der Hubschrauber wieder auf die Geschwindigkeit des besten Steigens v_y verzögert. Um die natürliche Deckung ideal nutzen zu können, muss der Pilot sehr tief und sehr dicht an den Hindernissen beschleunigen. Dies erfordert ein hohes Maß an visueller Aufmerksamkeit auf den Boden und die Hindernisse. Die Forderung, möglichst schnell zu steigen erfordert die kontinuierliche Nutzung aller zur Verfügung stehenden Leistungsreserven während des gesamten Manövers.

Abbildung 7.5 illustriert das Manöverprofil und wurde zusammen mit der kurzen Erläuterung der einzelnen MTE-Phasen für das Pilotenbriefing genutzt. Für die Evaluation wurde als Rotationsgeschwindigkeit 70 kt definiert, da die Steuerung in der verwendeten Hubschraubersimulation bei sehr hohen Geschwindigkeiten erschwert ist. Diese Geschwindigkeit soll auch beim Steigen gehalten werden, um einen Wechsel des Limits zu vermeiden, welcher gemäß Hubschrauber-Manual bei $v_y = 65$ kt erfolgt. Der Pilot wurde gebrieft, eine sichere Höhe von 1000 ft zu steigen. Tatsächlich wurde der Durchlauf aber früher beendet, um Versuchszeit zu sparen, frühestens nach Erreichen einer Mindesthöhe von 450 ft. Bei dieser Höhe war ein stabiler Flugzustand erreicht und keine wesentlichen Korrekturen oder größeren Steuereingaben mehr zu erwarten. Die Piloten wurden jedoch vorab nicht darüber informiert, bei welcher Höhe der Versuch beendet wurde, damit sie sich bis zum Schluss auf die Aufgabe konzentrierten. Das hier beschriebene MTE wurde von den teilnehmenden Piloten als plausibel und realistisch bewertet.

Das Small Arms (Evasion) Takeoff-MTE ist dem vorher verwendeten Fog-Departure-Manöver, siehe Abschnitt 5.2.3 ähnlich. Der Unterschied besteht zum einen darin, dass beim Small Arms (Evasion) Takeoff-MTE nicht wie beim Fog-Departure-MTE ein möglichst steiler Steigwinkel erreicht werden soll, um die Startstrecke zu minimieren, sondern ein möglichst schnelles Steigen, um die Zeit bis zum Erreichen einer sicheren Höhe zu minimieren. Prozedural bedeutet dies, dass durch die höhere

²Die Studie wurde im Rahmen des BAAINBw-Projekts „PA ATR“ durchgeführt.

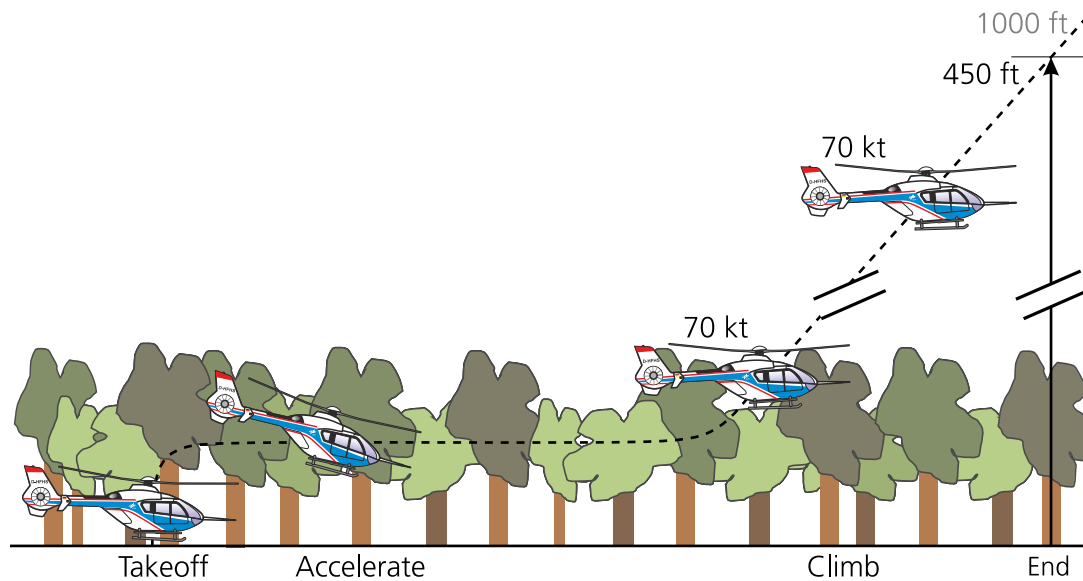


Abbildung 7.5.: **Small Arms Takeoff Manöver**

Briefing Small Arms Takeoff Manöver

1. Anfangszustand: Der Hubschrauber steht am Boden, in der Mitte der Lichtung, ausgerichtet parallel zur Lichtung.
2. Takeoff: Aufnehmen und Stabilisieren des Hubschraubers.
3. Accelerate: Beschleunigen auf 70 kt, dabei unterhalb der Baumwipfelhöhe bleiben.
4. Climb: Bei Erreichen von 70 kt rotieren und steigen, dabei 70 ± 2 kt halten, Zielhöhe 1000 ft.
5. End: Der Versuch kann durch den Versuchsleiter bereits vor Erreichen der gebrieften Zielhöhe beendet werden. Es sollten mindestens 450 ft erreicht sein. Dieser Wert wird jedoch nicht genannt, damit sich der Pilot nicht darauf einstellt und den Steigflug vorher ausleitet.

Anweisung an die Piloten vor jedem Versuchsdurchlauf:

- Halten Sie Ausschau nach Hindernissen und auffälligen Bewegungen am Boden.
- Nutzen Sie in allen Phasen die maximal zulässige Triebwerksleistung.
- Bei einseitigem Triebwerksausfall (OEI) setzen Sie den Takeoff mit maximal zulässiger Leistung fort.

Geschwindigkeit beim ACAH-MTE die Degradierung vom MTP-Limit auf das MCP-Limit bereits in Bodennähe erfolgt, während dies beim Fog-Departure-MTE erst in größerer Höhe erfolgte.

Aus früheren Versuchen ist bekannt, dass die Piloten im Flugsimulator sich nicht unbedingt auf die (simulierte) Darstellung der Außenwelt konzentrieren, sondern zur Einhaltung der Aufgabenkriterien mehr auf die Anzeigen schauen, als sie dies vielleicht in einem echten Hubschrauber tun würden. Dies kann leicht dadurch erklärt werden, dass in einem Simulator eben keine reale Kollisionsgefahr mit unentdeckten Hindernissen besteht. Um die Piloten daran zu erinnern, wurden sie vor jedem einzelnen Flug aufgefordert, möglichst nach draußen schauen und auf Gefahren zu achten, siehe unten.

7.2.4. Versuchsdurchführung

Die teilnehmenden Piloten wurden einleitend über die Funktionsweise der *Haptic Torque-Protection* gebrieft und über die Ziele der Studie informiert. Sie wurden über die Existenz der Blickbewegungskamera in Kenntnis gesetzt. Dabei wurden sie jedoch bewusst über das Ziel im Unklaren gelassen, dass damit eventuelle Unterschiede in der Verteilung der visuellen Aufmerksamkeit zwischen den Konfigurationen ermittelt werden sollen, um damit ihr Verhalten nicht zu beeinflussen. Die Piloten wurden darüber aufgeklärt, dass die Teilnahme freiwillig ist und jederzeit beendet werden kann sowie darüber, dass die erfassten Mess- und Videodaten wissenschaftlich verwendet werden. Alle Piloten unterschrieben darüber eine Einverständniserklärung. Daraufhin füllten sie den Fragebogen zur Erfassung ihrer fliegerischen Vorerfahrung und der Erwartung an eine *Haptic Torque-Protection* aus, siehe Abschnitt 7.2.1.

Die Piloten wurden mit den Sicherheitsvorkehrungen im Simulationscockpit vertraut gemacht. Anschließend erfolgte die individuelle ergonomische Justierung der Positionen von Sitz und der Steuerorganen. Erst danach haben die Piloten die Brille des Blickbewegungssystems aufgesetzt, welche dann kalibriert wurde. Die Piloten wurden zudem instruiert, am Beginn eines jeden Versuchsdurchlauf eine bestimmte Stelle im Cockpit zu fokussieren. Das war hier eine Taste am Instrumentendisplay direkt vor dem Piloten. Dies diente der kontinuierlichen Überprüfung der Kalibrierung des Blickbewegungssystems und gleichzeitig der Erfassung der aktuellen Abweichung für spätere Korrekturen bei der Datenauswertung. Daraufhin hatten die Piloten einige Minuten Zeit sich an die Simulation zu gewöhnen. Das Small Arms (Evasion) Takeoff (SAETO)-MTE wurde anhand der Abbildung 7.5 erläutert und von den Piloten so lange trainiert, bis es fehlerfrei geflogen werden konnte. Während des ersten Trainings war das *Tactile Cueing* der *Haptic Torque-Protection* noch deaktiviert. Danach wurden von jedem Piloten die in nachfolgender Versuchsmatrix genannten fünf verschiedenen Konfigurationen in der genannten Reihenfolge geflogen.

Versuchsmatrix

1. Ohne *Tactile Cueing* (TCoff, Referenzfall/Benchmark).
2. Mit *Tactile Cue* für die Stop-Position (TC^{STOP}), ohne *Info-Cue*.
3. Mit *Tactile Cue* für die Stop-Position und time-constraint (TC_{agg}^{STOP}): Die Piloten erhielten die Anweisung, das gleiche Manöver sehr aggressiv zu fliegen und die Zielhöhe innerhalb einer möglichst kurzen Zeit zu erreichen.
4. Mit *Tactile Cue* für die Stop-Position und die Info-Position (TC_{INFO}^{STOP}).
5. Mit *Tactile Cue* für die Stop-Position und die Info-Position bei einseitigem Triebwerksausfall (OEI), ($TC_{INFO, OEI}^{STOP}$): Während der Beschleunigungsphase wurde per Knopfdruck durch den Versuchsleiter ein plötzlicher einseitiger Triebwerksausfall (OEI) simuliert. Alle Piloten wurden informiert, dass das *Tactile Cue* auch im OEI-Fall wirksam ist und auf die OEI-Limits umschaltet. Sie wurden zudem gebrieft, hier das Manöver unter Beachtung und Nutzung der OEI-Limits, bzw. der zugehörigen *Tactile Cues* immer fortzusetzen. Dieses Briefing erfolgte bereits bei Untersuchungsbeginn, also nicht erst unmittelbar vor dem Fliegen dieser Konfiguration, um den Überraschungseffekt bei einem plötzlichen Triebwerksausfall zu gewährleisten.

Die Konfigurationen TC_{agg}^{STOP} und $TC_{INFO, OEI}^{STOP}$ dienen primär dazu, die Piloten unter Stress zu setzen, um sie dazu zu bewegen, höhere Steuerkräfte zu nutzen. Sie werden für die übrigen Auswertungen nicht berücksichtigt. TC_{agg}^{STOP} wird lediglich bei der Bewertung der Präzision berücksichtigt, weil höhere Steuerkräfte einen Einfluss auf die Präzision haben können, wie aus *Studie 1* bekannt ist, siehe Abschnitt 5.3.3.

Jede Konfiguration wurde so oft wiederholt, bis diese fehlerfrei und unter kontinuierlicher Nutzung der maximal erlaubten Hubschrauberleistung geflogen wurde. Vor jedem Durchlauf, eng. *run*, erfolgte vom Versuchsleiter bei allen Konfiguration die Anweisung, auf die Umgebung zu achten. Nach jedem fehlerfreien Durchlauf hatten die Piloten zudem die Möglichkeit, den Teilversuch zu wiederholen, wenn sie dies wünschten, etwa weil sie erwarteten, ihre Leistung noch weiter verbessern zu können. Die einzelnen Durchläufe wurden aufgezeichnet. In den ersten Durchläufen der Trainingsphase wurden keine Daten aufgezeichnet. In späteren Konfigurationen wurden die Trainingsphasen, bzw. Anzahl der Durchläufe kleiner. Die von den Piloten während der Manöver im Rahmen des *Prinzips des lauten Denkens* geäußerten Gedanken wurden vom Versuchsleiter notiert, siehe Anhang D.1. Direkt im Anschluss an jede Konfiguration haben die Piloten einen Zwischenfragebogen ausgefüllt und ihre Arbeitsbelastung mittels TLX bewertet. Das Transkript der Fragebögen befindet sich im Anhang D.1. Im Debriefing hatten die Piloten noch einmal Gelegenheit sich zu der *Haptic Torque-Protection* speziell und der Studie allgemein zu äußern.

7.2.5. Datenerhebung und -Auswertung

Nachfolgend werden die erhobenen Daten aufgelistet und beschrieben sowie die erfolgten Auswertungsschritte erläutert.

Arbeitsbelastung

Die Arbeitsbelastung wurde mittels subjektiver Selbstauskunft der Piloten erfasst. Dazu wurde der NASA Task Load Index (TLX)-Fragebogen genutzt, siehe auch Abschnitt 5.2.5, der jeweils nach dem letzten Versuchsdurchlauf eines Testpunkts von jedem Piloten ausgefüllt wurde.

Systemakzeptanz und subjektive Bewertung spezifischer Merkmale

Zur Bewertung der Akzeptanz von spezifischen Merkmalen der *Haptic Torque-Protection* wurde ein eigener Fragebogen erstellt. Er bezieht sich auf die folgenden Merkmale:

- die *automatische Verschiebung des Tactile Cues* bei Veränderung des gültigen Limits im normalen Betrieb und bei einseitigem Triebwerksausfall OEI in Bezug auf die Verstellgeschwindigkeit und darauf, ob diese hilfreich und wünschenswert ist,
- das hier gezeigte *Tactile Cue* zur Darstellung des *Stop-Cues* in Bezug auf Detektierbarkeit und dessen Eigenschaft, das Steuer am Limit zu halten und zu führen,
- das hier gezeigte *Tactile Cue* zur Darstellung der Schwelle des *Info-Cues* in Bezug auf die Detektierbarkeit und die Krafthöhe, den Grad der Störung und inwieweit es hilft und wünschenswert ist,
- das hier gezeigte *Tactile Cue* zur Darstellung, dass sich der Torque innerhalb des Info-Bereichs befindet, in Bezug auf Detektierbarkeit und Krafthöhe, Grad der Störung und inwieweit es hilft und wünschenswert ist und dessen Eignung,
- Verbesserungsmöglichkeiten und alternative *Tactile Cues*.

Zusätzlich wurde die Skala zur Messung der Systemakzeptanz nach VAN DER LAAN, JINKE ET AL. [129, S. 3]³ verwendet. Ferner wurden die Piloten gebeten „laut zu denken“ und alles was ihnen auffällt zu kommentieren. Der gesamte Fragebogen mit allen Antworten und Pilotenkommentaren befindet sich im Anhang, Abschnitt D.1.

³Original in englischer Sprache. Deutsche Übersetzung auf: https://www.hfes-europe.org/accept/accept_de.htm

Blickbewegungsmessung

Zur Erfassung der visuellen Aufmerksamkeit kam ein Blickbewegungssystem zum Einsatz. Mit einem Blickbewegungssystem kann erfasst werden, wo der Proband wann und wie lange hinschaut. Die Funktionsweise, die Verwendung und die im Zusammenhang mit der Blickbewegung verwendete Terminologie liefern [130, S.106 ff], [131, S.5 ff]. Die folgenden Größen und Begriffe sind dabei im Rahmen dieser Arbeit von Interesse: Das *Objekt* bezeichnet den Gegenstand, den der Proband betrachtet. Man spricht auch von der Area-of-Interest (AOI). Die AOI beschreibt einen relevanten Bereich, in dem sich mehrere *Objekte* befinden können. Das Blickbewegungssystem bestimmt zu jedem Abtastzeitpunkt einen „Blickpunkt“, engl. *gaze*, auf der Sichtebene. Mehrere räumlich nahbeieinanderliegende und zeitliche aufeinanderfolgenden Blickpunkte werden als *Fixationen* bezeichnet. Dabei ist das Auge quasi auf ein Objekt oder Bildbereich fixiert. Die Bewegung zu einer neuen Fixation auf einen anderen Bildbereich wird *Sakkade* genannt. Die bewusste Verarbeitung des visuellen Reizes erfolgt nur während der *Fixationen*. Die *Fixationsdauer*, engl. *fixation duration* beträgt mindestens 100 ms und liegt typischer Weise bei mehreren 100 ms. Mehrere unmittelbar aufeinanderfolgende, auf ein *Objekt* gerichtete *Fixationen* werden *Verweildauer*, engl. *dwell time* genannt. Wenn man die in einem Versuchszeitraum gemessenen, nicht nötiger Weise unmittelbar aufeinander folgenden, *Fixationen* aufsummiert, spricht man von der *kumulierten Fixationsdauer* oder der *kumulierten Verweildauer*, engl. *cumulative fixation time* oder *cumulative dwell time*. Diese kann sich auch auf ein Objekt, bzw. eine Area-of-Interest (AOI) beziehen.

Hier wird ein Blickbewegungssystem⁴ verwendet, welches einen kopfgetragenen *Eyetracker*, die Brille, siehe Abbildung 7.6 und einen stationären *Headtracker*, ohne Abbildung, kombiniert. Beide Systeme wurden zu einem Gesamtsystem integriert, das aus der Kombination von Kopfbewegung und Augenbewegung automatisch die Blickbewegung messen kann [132, S.16]. Die Berechnung erfolgt in Echtzeit, so dass auf einem Kontrollbildschirm verfolgt werden kann, auf welche AOI der Blick des Probanden gerade fällt. Dazu werden vorab AOI im Raum vermessen und ihre Positionen gespeichert. Die Abtastrate des Systems beträgt 60 Hz, bei einer Winkelgenauigkeit von 0.5°. Das entspricht im AVES-Simulatorcockpit bei einem Abstand zwischen Auge und Instrument von ca. 0,7 m, dieser liegt etwa bei einer Armlänge, einer Positionsgenauigkeit von ± 6 mm. Das ist genau genug, um einzelne Cockpitanzeigen zuordnen zu können. Die Zuordnung und Unterscheidung einzelner Anzeigenelemente innerhalb einer Anzeige mit Gesamtabmessungen im 10 cm Bereich ist hingegen nur dann zuverlässig möglich, wenn diese mindestens das Doppelte der genannten Toleranz auseinander liegen.

Bei der verwendeten Brille handelt es sich um die *Eye Tracking Glasses 2 Wireless* der Firma Senso Motoric Instruments (SMI), Deutschland. Diese ist binokular, d.h. beide Augen werden erfasst. Jedes Auge wird mit einer eigenen auf der Innenseite der Brille eingefassten Infrarotkamera gefilmt und dazu mit einer Infrarotlichtquelle beleuchtet. Mittig auf der Vorderseite der Brille befindet sich eine Videokamera zur Aufnahme des Gesichtsfeldes. Der *Headtracker* besteht aus Infrarotkameras und Infrarotlicht-reflektierenden „geweihförmigen“ Markern an der Brille, Abbildung 7.6. Aus mindestens drei Kamerabildern der Marker errechnet es mittels Triangulation der Bilder sowohl Position und, wegen der charakteristischen Anordnung der Marker, auch die Ausrichtung der Brille im Raum. Hier wurden sogar vier Kameras verwendet, um die Abdeckung des Bewegungsraumes

⁴bereitgestellt vom DLR Institut für Flugführung



Abbildung 7.6.: *Eyetracking*-Brille der Firma SMI mit geweihförmigem Marker für den *Head-tracker*

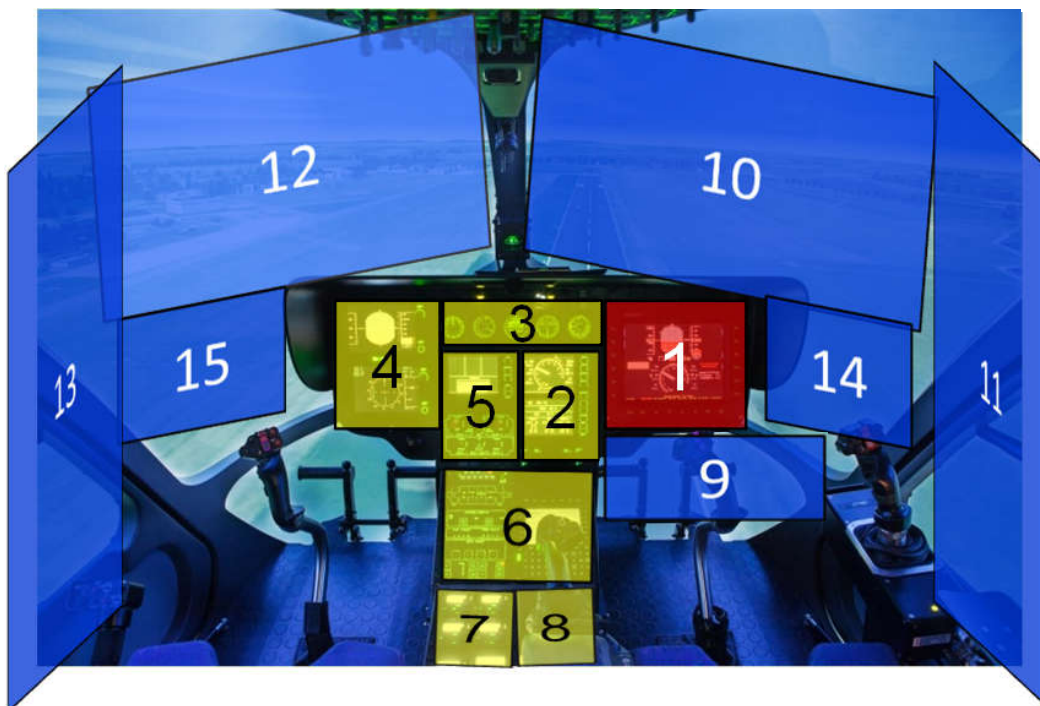


Abbildung 7.7.: Illustration der Areas-of-Interest (AOI) im H135 Cockpit - ungefähre Lage

zu verbessern. Zwei befanden sich hinter dem Piloten, im hinteren Teil des Cockpits, zwei vor dem Piloten, oberhalb des Glareshields, d.h. dem Blendschutz über der Instrumententafel.

Das integrierte Blickbewegungssystem berechnet zu jedem Zeitschritt die im Blick befindliche AOI und sogar die relative Position innerhalb der AOIs, wenn die AOIs vorher eingemessen wurden. Es unterscheidet jedoch nicht automatisch zwischen *Fixation* und *Sakkade*. Zudem misst es weitere Größen, wie z.B. den Pupillendurchmesser, der in dieser Arbeit aber nicht betrachtet wird. Die berechneten Blickbewegungsdaten werden zusammen mit den Rohdaten der reinen Augenbewegung und des Headtrackers in einer gemeinsamen Datei aufgezeichnet. Außerdem werden auch die Videos der Augen- und der Frontalkamera aufgezeichnet. Für die spätere Synchronisation wurde ein Zeitstempel des Eyetracking-Systems an die separate Datenerfassung der Flugzustandsdaten im Experimentalsystem transferiert und in beiden Systemen aufgezeichnet.

Flugmessdaten

Für jeden *run* wurden die simulierten Flugdaten aufgezeichnet, darunter der Flugzustand, mit Flugeschwindigkeiten und -höhe, Steigrate, Fluglage und Drehraten und die Sidestick-Steuerpositionen und -kräfte.

Datenauswertung: Synchronisation der Datenquellen und Segmentierung

Die Aufzeichnung der Flugzustandsdaten und der Daten des aktiven Steuerorgans im Experimentalsystem erfolgte getrennt von der Aufzeichnung der Blickbewegungsdaten im *Eyetracking System*. Die Synchronisation der Daten erfolgte auf der Basis eines Zeitstempels, der während des Betriebs vom *Eyetracking System* an das Experimentalsystem geschickt und in beiden Systemen aufgezeichnet wurde.

Die vom Blickbewegungssystem aufgezeichneten Daten mancher *runs* wiesen Aussetzer von einigen Sekunden Dauer auf. In kurzen Zeitabschnitten fehlte die vom System automatisch berechnete Detektion der betrachteten AOI. Diese traten insbesondere dann auf, wenn die Augen stark nach oben gerichtet waren. Die Videodaten und die Rohdaten des Blickbewegungssystems, insbesondere die momentane Augenposition, waren jedoch fehlerfrei. Mit diesen Daten konnten die fehlenden Zuordnungen der AOI manuell in der Nachbearbeitung vorgenommen werden. Dazu wurden im Video jeder Blickwechsel zwischen den unterschiedlichen AOI identifiziert und mit Benennung der AOI und den Zeitpunkten notiert. Mit Hilfe einer Computersoftware wurden diese Informationen in das Format der Blickbewegungsdaten übersetzt und auf diese Weise alle *runs* mit unvollständigen Daten ersetzt. Dabei war hilfreich, dass das Video zeitsynchron mit den Blickbewegungsdaten aufgezeichnet wurde, so dass der oben beschriebene Synchronisationsmechanismus auch hier funktionierte.

Weil die Datenaufzeichnung bereits vor dem Beginn des Manövers gestartet und erst nach Abschluss des Manövers beendet wurde, wurden die Daten bei der Auswertung zunächst auf die

Dauer des Manövers getrimmt. Als Beginn wurde 1 s vor dem ersten Anheben des Kollektivsticks gewählt, während der Hubschrauber noch am Boden steht. Als Ende wurde das Erreichen einer Übergrundhöhe von 400 ft gewählt.

Entsprechend der vorab definierten Manöverphasen wurden auch die Daten in drei unmittelbar aufeinander folgende Phasen untergliedert: 1. Phase: Aufnehmen und Stabilisieren, 2. Phase: Beschleunigen und 3. Phase: Steigen. Weil die Dauer gleicher Phasen zwischen den Piloten, aber auch zwischen den einzelnen Versuchsdurchläufen jedes Mal anders ist, wurden die folgenden Kriterien zur Gliederung der Manöverphasen definiert, anhand derer die Daten halbautomatisch unterteilt wurden, siehe auch Abbildungen 7.8a und 7.8b:

1. Takeoff: Aufnehmen, Stabilisieren und Schweben

Diese Phase beginnt mit dem Manöver und geht bis zum Beginn der Beschleunigungsphase. Da der Hubschrauber auch im Schwebeflug nicht ganz still steht, wurde als Kriterium für diesen Übergang das Erreichen von $V_{IAS}=10$ kt angezeigter Geschwindigkeit gewählt. Die Dauer dieser Phase unterschied sich zwischen den unterschiedlichen Piloten und Konfigurationen stark und lag zwischen 3 und 20 s. In den ersten beiden getesteten Konfigurationen, TCOFF und TC^{STOP} wurde der Hubschrauber manchmal zunächst im Schwebeflug über dem Startpunkt stabilisiert und dann, unter Beibehaltung der Höhe, also unter koordiniertem, allmählichem Anheben des Kollektivhebels, beschleunigt, und manchmal bereits beim Takeoff die Beschleunigungsphase eingeleitet. Das letztgenannte Vorgehen wurde von den Piloten "taktischer Takeoff" genannt. Auch Mischformen traten auf. Im ersten Fall dauert es daher etwas länger, bis das Torque-Limit erreicht wurde, siehe Abschnitt *NutzungsgradStudie3*, im zweiten Fall wurde direkt an das Torquelimit gegangen.

2. Accelerate:

Die Beschleunigungsphase schließt direkt an die Phase Aufnehmen, Stabilisieren und Schweben an. Laut Flugaufgabe endet sie eigentlich bei Erreichen von $V_{IAS}=70$ kt. Da die Piloten den Übergang von der Beschleunigungs- in die Steigphase aber bereits fließend kurz vor Erreichen der Zielgeschwindigkeit begannen und ihre Zielgeschwindigkeit erst während des Steigflugs erreichten, wurde als Kriterium das Erreichen einer Steigrate von $ROC = 100$ ft/min gewählt. Diese Phase dauerte in den unterschiedlichen Versuchsdurchläufen zwischen 10 und 13 s.

3. Climb:

Die Steigphase schließt unmittelbar Beschleunigungsphase an. Sie endet mit dem Manöver bei Erreichen einer Übergrundhöhe von min. 400 ft. Die Dauer betrug zwischen 18 und 28 s. Dieser große Unterschied in der Dauer ist letztlich darauf zurückzuführen, dass die haptische Torque-Protection sehr konservativ ausgelegt worden ist und die Limit-Absenkung wenige Sekunden vor dem Erreichen des Kriteriums, $v_y = 65$ kt, durchführt. Im Gegensatz dazu haben die Piloten die Absenkung ohne haptische Unterstützung in seltenen Fällen erst später oder sogar zu spät durchgeführt. Durch die damit einhergehende Torqueüberschreitung wurde der Hubschrauber länger im hohen Leistungsbereich operiert und hat damit früher die Zielhöhe erreicht. Die Konfiguration TC^{STOP}_{INFO, OEI} stellt einen Sonderfall dar. Hier haben die Piloten zwar wie gebrieft immer den Startvorgang fortgesetzt, sind dann aber in Richtung einer nahe gelegenen Landebahn geflogen und haben die Landung eingeleitet. Dabei haben sie nicht mehr die volle Leistung genutzt. Nur Pilot 3A hatte den Steigflug zunächst bis zum Erreichen

von der vorgesehenen Zielhöhe von 400 ft fortgesetzt. Für die spätere Auswertung wurde die *runs* der $TC_{INFO, OEI}^{STOP}$ -Konfiguration daher bereits abgeschnitten, sobald der Pilot nicht mehr am Leistungslimit operierte.

Die Abbildung 7.8 zeigt exemplarisch, wie die Daten beschnitten, unterteilt und aufbereitet wurden, damit die gesuchten Kennwerte zur Steuerkraft, zur Wirksamkeit des *Tactile Cues* und zum Einfluss auf die visuelle Aufmerksamkeit ermittelt werden können. Dargestellt werden hier exemplarisch die Daten der Konfiguration TCoff (a) und TC^{STOP} (b) für Pilot 3A. Die Zeitschriebe aller für die weitere Auswertung ausgewählten Versuchsdurchläufe sind im Anhang D angegeben. Die großen leeren Bereiche entstehen dadurch, dass bewusst dieselbe x-Achsen Skalierung gewählt wurde, wie in den entsprechenden Abbildungen in Studie 1, siehe Abbildung 5.7 und 5.8. Die Steuerkraft F_0 ist ganz oben aufgetragen, zusammen mit der aktuellen Reibungskraftschwell F_{FRIC} . Für die Konfiguration mit *Tactile Cueing* wird der Kraftverlauf nach der Kontaktaufnahme rot, bzw. magenta in den transienten Bereichen während der Kontaktaufnahme und Limitreduktion dargestellt. Die Wirksamkeit des *Tactile Cues* kann aus der Kollektivsteuer-Position δ_0 im Verhältnis zur Info-Position, bzw. Stop-Position (2. Zeile) sowie dem Torque-Verlauf Q samt Torque-Limit Q_{STOP} und Torque-Info-Bereich Q_{INFO} abgeleitet werden (3. Zeile). Zur Unterteilung der Manöverphasen nach den oben genannten Kriterien werden hier auch die Flugzustandsgrößen Geschwindigkeit V_{IAS} (4. Zeile) und Höhe über Grund H jeweils mit Referenzwerten aufgetragen (5. Zeile). Um besser den Beginn Steigphase besser erkennen zu können, wurde zusätzlich wurde mit der Höhe auch die Steigrate ROC bzw. hier $\dot{H}$ aufgetragen. Für die visuelle Aufmerksamkeit werden der Verlauf der Blickbewegung in Bezug auf die der einzelnen AOI gemäß Abbildung 7.7 (6. Zeile) dargestellt. Daraus werden schließlich die relativen Blinks-Verweildauern außerhalb des Cockpits t_{OTW} und innerhalb des Cockpits t_{ITC} in Bezug auf die Dauer jeder der drei Manöverphasen angegeben (7. Zeile).

Für einige Konfiguration gab es mehrere gültige Versuchsdurchläufe. In diesem Fall wurde jeweils der beste Datensatz eines Testpunkts für die weitere Auswertung ausgewählt. Zu den Kriterien zählten Vollständigkeit, Einhaltung der Manöverkriterien, Fehlerfreiheit, etwa Ablenkung des Piloten durch Störungen.

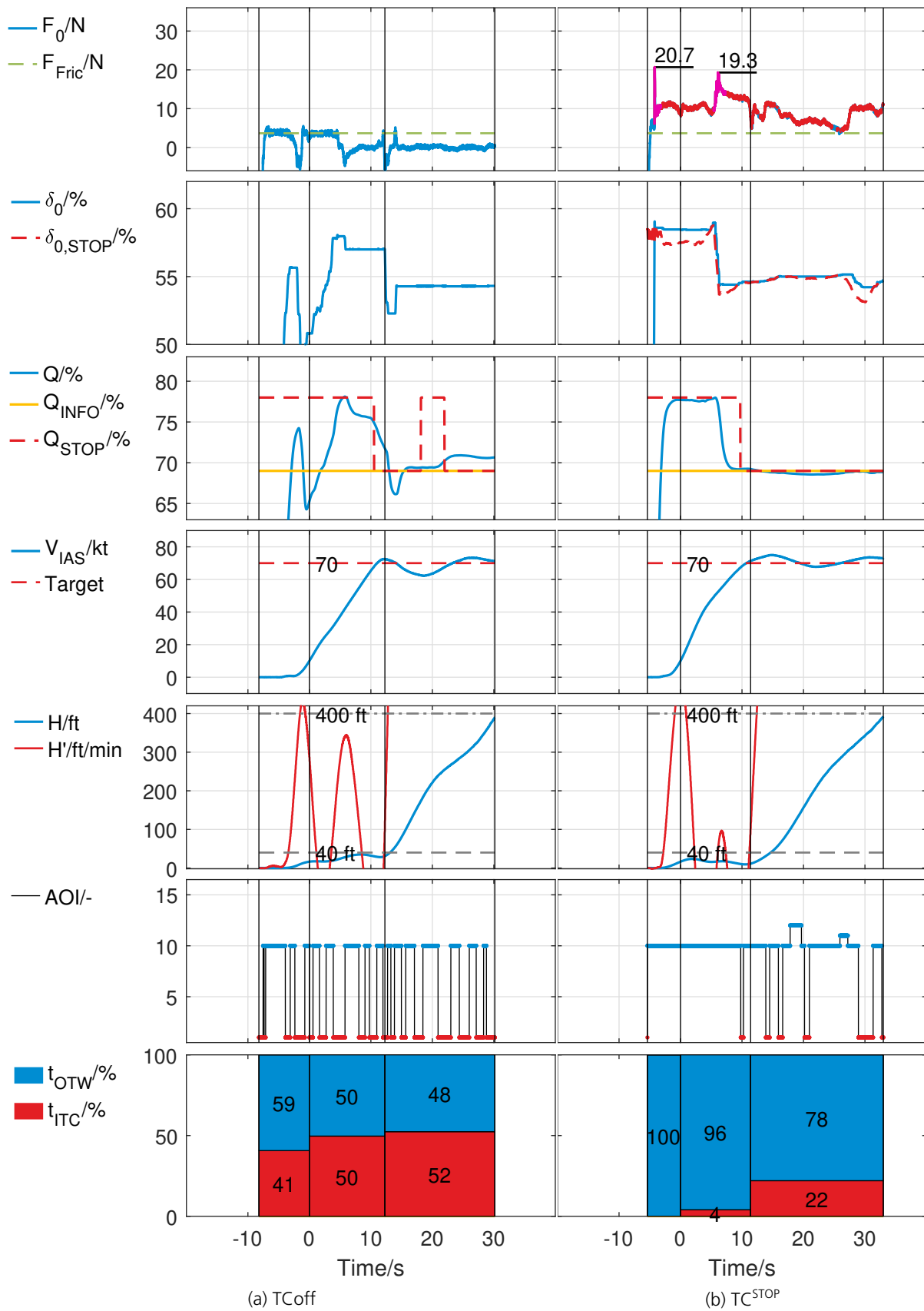


Abbildung 7.8.: Messdaten und Manöverabschnitte Small Arms Takeoff (Pilot 3A)

7.3. Ergebnisse und Diskussion

Nachfolgend werden die Ergebnisse der Blickbewegungs- und Kraftmessung, des Nutzungsgrades sowie die Bewertung der Pilotenarbeitsbelastung und -akzeptanz dargestellt und diskutiert. Die Einordnung der Ergebnisse in den Gesamtkontext dieser Arbeit erfolgt zusammen mit den anderen Studien in Abschnitt 8.

7.3.1. Präzision: Limiteinhaltung und -ausschöpfung

Wie in schon in der *Studie 1* (Abschnitt 5.3.1) wurde auch hier betrachtet wie gut die *Haptic Torque-Protection* Limitüberschreitungen vermeidet und wie gut sie die Ausnutzung des zur Verfügung stehenden Torques ermöglicht. Damit ist es möglich, eventuelle Unterschiede zwischen den verschiedenen *Tactile Cue*-Designs dieser Studie gegenüber *Studie 1* zu erkennen und zu bewerten. Dazu wurde, wie in *Studie 1* (Abschnitt 5.3.1), jeweils die CDF der Differenz ΔQ zwischen dem tatsächlichen Torque und dem aktuell gültigen Limit für die verschiedenen Piloten und Konfigurationen aufgetragen, siehe Abbildung 7.9. Es fiel auf, dass hier unterschiedlich viel Zeit verging, wenn man die unterschiedlichen Piloten und Konfigurationen betrachtet, vom Anfang des Manövers bis der Stick am *Stop-Cue* war. Dies ist darin begründet, dass die Piloten hier unterschiedliche Strategien für den Übergang vom Takeoff in die Beschleunigungsphase gewählt hatten, siehe *Datenauswertung*. Pilot 3B schwebte in der Konfiguration TC^{STOP} relativ lange und nutzte dabei nur die Schwebeleistung, welche geringer war, als das Torque-Limit, bevor er begann zu beschleunigen und dabei, wie in der Aufgabe gefordert, an das Leistungslimit zu gehen. Um den Einfluss des unterschiedlichen Pilotenverhaltens am Beginn des Manövers auf den Wert des Nutzungsgrades zu verringern, wurden hier nur Torquewerte oberhalb eines gewählten Schwellwerts von 59 Torque-% berücksichtigt, bzw. eine Differenz zum Torque-Limit von $\Delta Q \geq -19$ Torque-%.

Bei den Durchläufen mit *Tactile Cueing* fällt auf, dass die Form der Verteilungsfunktion in allen Durchläufen, d.h. mit aktivem *Tactile Cueing* ähnlich ist. Sie scheint unabhängig von Pilot und *Tactile Cueing*-Konfiguration zu sein. Für alle Durchläufe zeigt sich eine charakteristische Form mit einer jeweils insgesamt etwa 5 bis max. 10 s andauernden Unterschreitung von ca. $\Delta Q = 10$ Torque %, erkennbar als „Beule“. Daneben erkennt man eine fast konstante Unterschreitung von $\Delta Q = -0,5$ bis 0 Torque % mit einer akkumulierten Dauer von etwa 30 s und eine geringe, kurze, insgesamt vernachlässigbare Überschreitung.

Überschreitungen

In der Studie wurde nur eine relevante Überschreitung aufgezeichnet. Diese erfolgte durch Pilot 3A in der Referenzkonfiguration, d.h. ohne *Tactile Cueing* (TC_{Coff}). Das Integral der Überschreitung betrug $A_p = 23,9$ Torque-%s, bzw. 6 Torque-%s. Dabei hatte der Pilot zu spät auf die Reduktion des Torquelimits geachtet. Auch in der Konfigurationen mit *Tactile Cueing* gab Überschreitungen.

Diese waren aber von geringer Höhe (Größenordnung: 0,1 Torque-%s) und von sehr kurzer Dauer (Größenordnung: 1 s), bzw. $A_p \leq 0,6$ Torque-%s und damit nicht relevant, bzw. vernachlässigbar.

Ausschöpfung

Der Nutzungsgrad war in allen *Tactile Cueing*-Konfigurationen für alle Piloten besser als in der Referenzkonfiguration ohne *Tactile Cueing*. Mit Ausnahme von Pilot 3B in der Konfiguration TC^{STOP} , war die Nutzung mit *Tactile Cue* immer mindestens doppelt so gut wie ohne. Pilot 3B ging in der ersten getesteten Konfiguration mit *Tactile Cue* während des Schwebeflug noch nicht an das Torquelimit, sondern erst in der nächsten Konfiguration, TC_{agg}^{STOP} , wo es die Vorgabe gab, aggressiv zu fliegen. Alle Piloten erreichten hier die beste Nutzung des zur Verfügung stehenden Torques, da sie schneller an das *Stop-Cue* zogen. Sie behielten dieses Verhalten auch noch in der Konfiguration TC_{info}^{STOP} bei. Dies kann als Gewöhnung, aber auch als Zunahme des Vertrauens in die Funktion gedeutet werden.

Da es nur einen Testpunkt ohne *Tactile Cueing*, gefolgt von drei Testpunkten mit *Tactile Cueing* gab, kann ein möglicher Trainingseffekt als Einfluss auf die beobachtete Verbesserung der Ausschöpfung mit *Tactile Cueing* nicht ausgeschlossen werden. Um diesen möglichen Trainingseffekt zu eliminieren, sollte man in zukünftigen Untersuchungen die Reihenfolge der Testpunkte variieren.

Ursachen der Unter-/Überschreitungen

Wie auch in *Studie 1* wird die erreichte Präzision ohne *Tactile Cueing* durch das Pilotenverhalten bestimmt. So trat die Überschreitung von Pilot 3A auf, weil er das Kollektiv vor dem Limitwechsel von MTP auf MCP zu spät reduziert hatte. Die Unterschreitungen ergeben sich aus dem Sicherheitsabstand zum Limit, den die Piloten aus Vorsicht zur Vermeidung einer unbeabsichtigten Überschreitung wählten.

Die „Beule“ in den Konfigurationen mit *Tactile Cueing* ist, wie bereits in *Studie 1*, siehe Abschnitt 5 auf die Nutzung der antizipierten Fluggeschwindigkeit bei der Umschaltung des des gültigen Limits zurückzuführen. Damit das Limit bei Erreichen von 65 kt bereits reduziert ist, wird die Reduktion und damit die Verschiebung des *Tactile Cues* bereits einige Sekunden vorher eingeleitet. Somit ergibt sich hier eine Unternutzung obwohl, bzw. gerade weil, der Pilot dem *Tactile Cue* folgt. Hier gibt es also noch Reserven, d.h. die Reduktion des Limits von MTP nach MCP könnte noch etwas später und dann ggf. mit einer höheren Rate erfolgen. Dies wurde bereits in *Studie 1* diskutiert und Lösungsmöglichkeiten genannt, siehe Abschnitt 5.3.1. Der längere Bereich mit sehr geringer Unterschreitung ist wahrscheinlich auf die in der *Haptic Torque-Protection* verwendeten Sicherheitsmarge von 0,2 % Steuerweg, siehe Abschnitt 7.1, bedingt, um welche das *Stop-Cue* vor der berechneten Stop-Position platziert wurde.

Die darüber hinaus beobachteten kleineren, vernachlässigbaren Überschreitungen sind auf die Toleranzen des auf der gerätespezifischen Implementierung des *Hardstop-Cues* basierenden *Stop-*

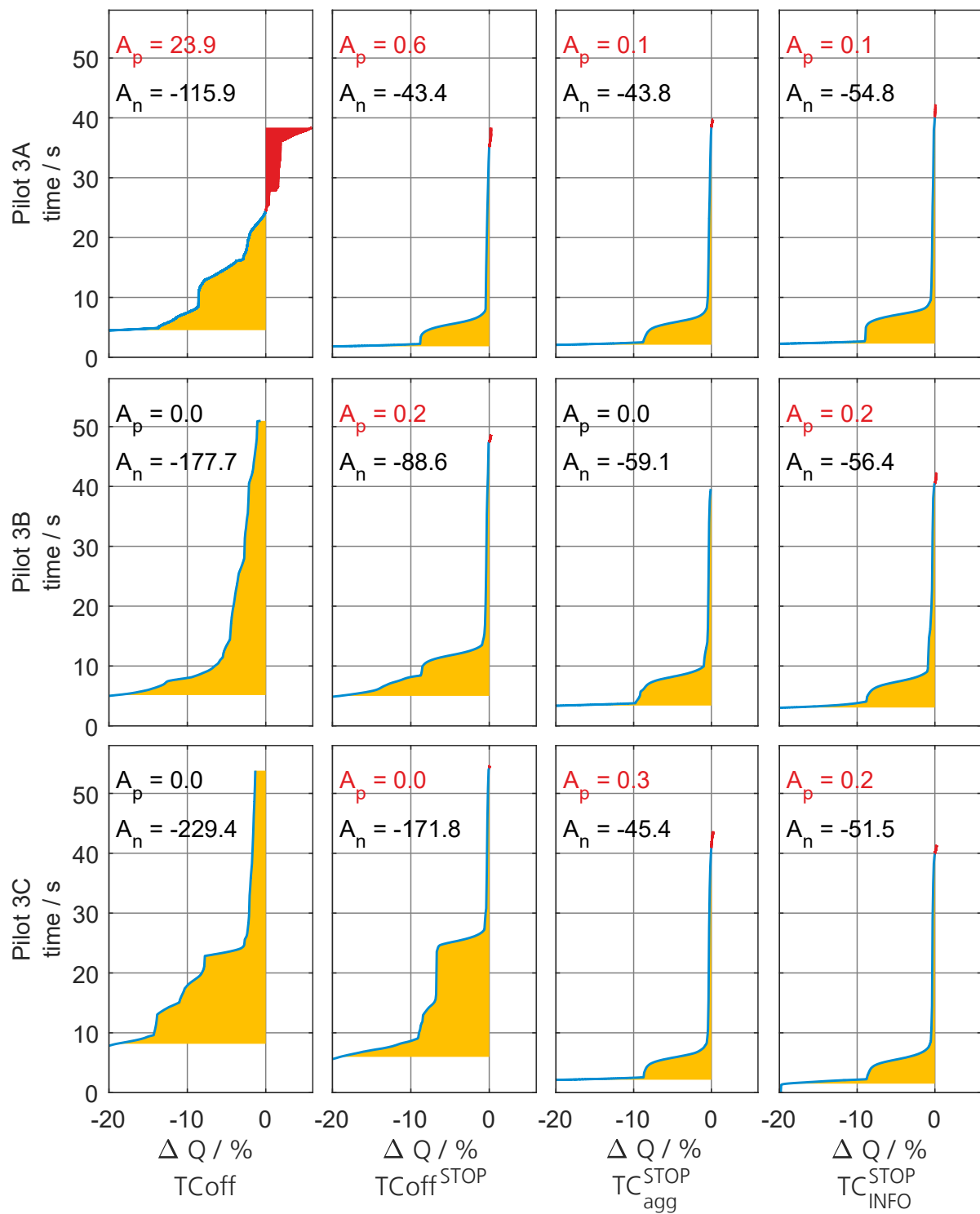


Abbildung 7.9.: **Präzision: Unternutzung (A_n) und Überschreitung (A_p) des verfügbaren Torques *Tactile Cue-Design 3* (CDF und Integrale, berücksichtigt ab $\Delta Q > -19$ Torque-%)**

Cues zurückzuführen, siehe Abschnitt 7.1. Wenn es gelänge, die beschriebenen Einschränkungen des *Hardstop*-Cues zu beheben, so ließen sie sich wahrscheinlich komplett vermeiden.⁵

Die Verläufe sind deshalb für die unterschiedlichen Testpunkte und Piloten in den Konfigurationen mit *Tactile Cueing* fast identisch, weil ab dem Zeitpunkt, ab dem die Piloten Kontakt zum *Softstop* hielten, die *Haptic Torque-Protection* den Torque bestimmte. Da das Manöver immer dasselbe war, kann erwartet werden, dass auch die *Haptic Torque-Protection* in der Flugsimulation, mit gleich bleibenden atmosphärischen Umgebungsbedingungen, auch jedes Mal die gleichen Ergebnisse lieferte. Die dabei trotzdem noch auftretenden, leichten quantitativen Unterschiede rühren wahrscheinlich daher, dass sich die menschlichen Piloten beim Fliegen des Manövers erwartbar jedes Mal etwas anders verhielten, etwa zunächst unterschiedlich lange schwebten, bevor sie die Beschleunigung einleiteten und beim Steuern des hochdynamischen Systems Hubschrauber mit mehreren untereinander gekoppelten Achsen nicht die Wiederholbarkeit einer Maschine erreichen konnten.

7.3.2. Arbeitsbelastung

Die Piloten bewerteten die bei der Ausführung der Startmanöver in der Referenzkonfiguration TCoff empfundene Arbeitsbelastung unterschiedlich hoch. Die Bewertungen der Piloten 3A und 3B lagen bei einem niedrigen TLX-Wert von 20 % und 27 %, für Pilot 3C bei einem deutlich höheren Wert von 65 %, siehe Abbildung 7.10. Alle empfanden die Arbeitsbelastung mit *Tactile Cue* als deutlich geringer. Dabei waren die Bewertungen für die Konfigurationen TC^{STOP} und TC^{STOP}_{INFO} nahezu identisch und lagen zwischen etwa einem Viertel (Pilot 3B: 7 % für TC^{STOP}_{INFO} und 9 % für TC^{STOP}) und der Hälfte (Pilot 3B: 29 %) der Referenzwerte.

Die mittels TLX ermittelten Arbeitsbelastungsniveaus der Piloten waren unterschiedlich hoch. Pilot 3C hatte in allen Konfigurationen deutlich höhere Werte angegeben als die übrigen Piloten. Da die Polbezeichnungen der TLX-Skala relativ ist („sehr gering - sehr hoch“) und die TLX-Bewertung letztlich eine subjektive Selbsteinschätzung darstellt, bedeutet dies nicht, dass sie auch tatsächlich unterschiedlich hohe Arbeitsbelastungen empfunden haben. Aus den Pilotenkommentaren ergibt sich nicht, dass Pilot 3C besondere Schwierigkeiten mit der Aufgabe gehabt hätte. Der Unterschied der Absolutwerte zwischen den Piloten ist für die Bewertung daher nicht relevant. Wichtig ist der relative, intrapersonelle Unterschied zwischen den verschiedenen Konfigurationen. Dieser zeigt bei allen Piloten eine deutliche Verringerung der Arbeitsbelastung durch *Tactile Cueing*.

Von zwei Piloten in dieser Untersuchung wurde ein Beeinflussung des Sehens und der Augen- und Kopfbewegung durch der Brille des Blickbewegungssystems geäußert^{6,7}. Die Brille hat einen relativ breiten unteren Rand, der einen Teil des unteren Sichtbereichs einschränkt. Je nach Kopfhöhe, bzw. Oberkörperlänge, und insbesondere bei hohem negativen Nickwinkel (starkem Abnicken) des Hubschraubers kann dies erforderlich machen, dass der Pilot seinen Kopf bewegen muss, anstatt

⁵Modifikationen an der Implementierung der *Tactile Cues* können üblicherweise aber nur die Hersteller der aktiven Sidesticks vornehmen. Dies ist meist mit Zusatzkosten verbunden. Es wäre daher wünschenswert, wenn auch der Anwender Zugriff auf die Programmierung hätte.

⁶„Rahmen der Brille liegt auf FLI“ (Pilot 3A)

⁷„[...] hier] muss ich Kopf und Augen bewegen“ (Pilot 3C)

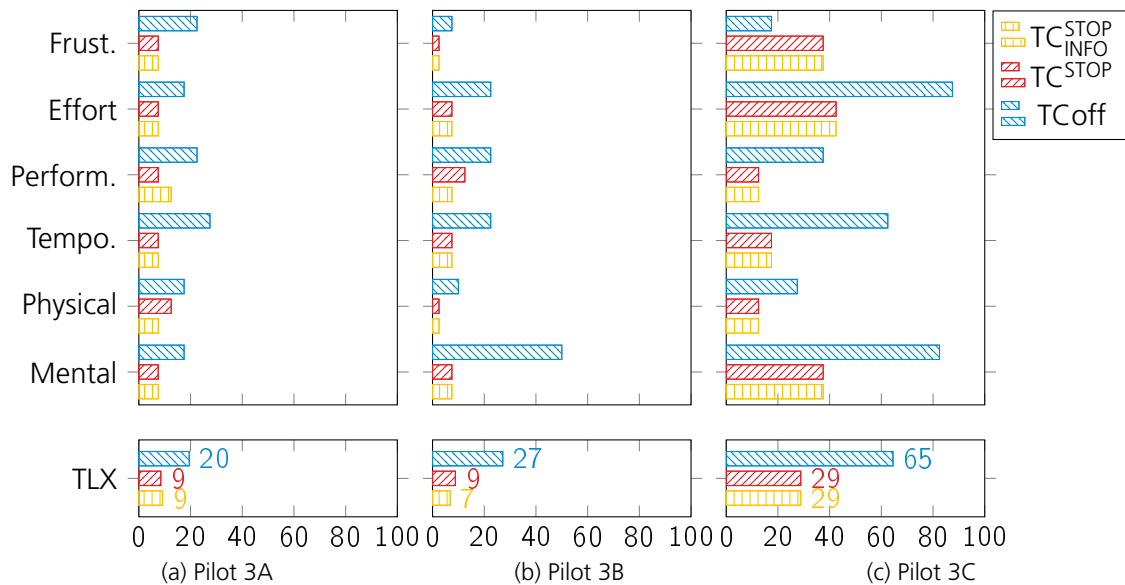


Abbildung 7.10.: NASA TLX Small Arms Takeoff

lediglich die Augen, um seinen Fokus zwischen Display und Außensicht zu wechseln. Stattdessen musste dieser Pilot seinen Kopf auf und ab bewegen. Dies könnte die empfundene Arbeitsbelastung in der Konfiguration ohne *Haptic Torque-Protection* zusätzlich etwas erhöhen und damit den Unterschied zur Konfiguration mit *Haptic Torque-Protection* etwas vergrößern. Ursächlich für die Reduktion der Arbeitsbelastung einer *Haptic Torque-Protection* ist die Blickbewegungskamera jedoch nicht, da diese Reduktion auch schon in *Studie 1*, ohne Blickbewegungssystem, siehe Abschnitt 5.3.2, gezeigt wurde. Auch hier hat der Pilot letztlich abmildernd ergänzt, "Die Übungskünstlichkeit durch die Brille ist akzeptabel". In zukünftigen Versuchen sollten die Piloten aber nach einer Sichteinschränkung durch die Brille befragt werden. Hier kann ggf. auch eine Veränderung der Sitzhöhe oder des Sitzabstands Abhilfe schaffen.

7.3.3. Verteilung der visuellen Aufmerksamkeit

Mit der Blickbewegungsmessung sollte ermittelt werden, wie hoch das Potential der *Haptic Torque-Protection* zur Vergrößerung der für die Betrachtung der Außenwelt vorhandenen visuellen Ressourcen ist. In Abbildung 7.11 ist der prozentuale Anteil der nach außen gerichteten visuellen Aufmerksamkeit (t_{OTW}) für unterschiedliche Konfigurationen und Piloten jeweils für die drei Flugphasen gegenübergestellt. Für diese Betrachtung wurden die Konfigurationen 1-TCoff, 2-TC^{STOP} und 4-TC^{STOP}_{INFO} verwendet. Die Konfiguration 1 stellt den Referenzfall ohne *Tactile Cueing* dar. Die Konfiguration 2 den einfachsten Fall der *Haptic Torque-Protection* mit *Tactile Cue* für die Stop-Position und die Konfiguration 4 die *Tactile Cues* für die Stop-Position und die Info-Position.

Alle Piloten haben während der Takeoff- und der Acceleration-Phase in den Konfigurationen mit *Tactile Cueing* (TC^{STOP} und TC^{STOP}_{INFO}) mehr nach draußen geschaut als ohne *Tactile Cueing* (TCoff). Beim Takeoff in der Konfiguration TC^{STOP} haben die Piloten sogar überhaupt nicht auf die

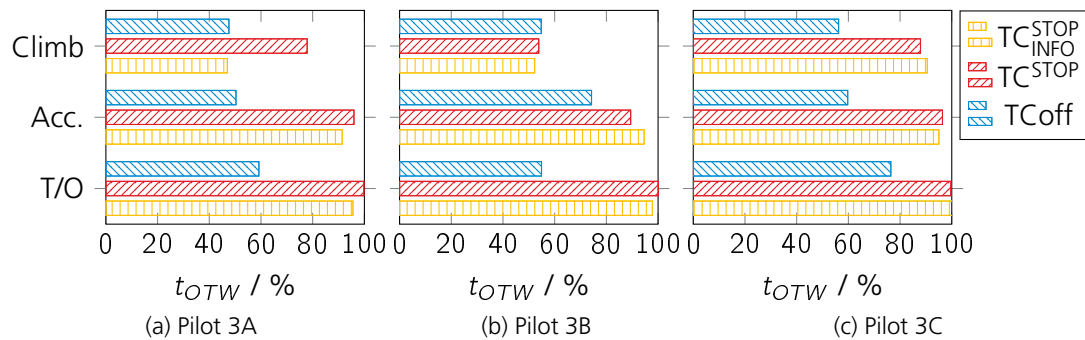


Abbildung 7.11.: **Prozentualer Anteil der nach außen gerichteten visuellen Aufmerksamkeit (out-the-window (OTW)) im Vergleich zwischen den Konfigurationen und Flugphasen**

Instrumente, sondern nur nach draußen gesehen (100 %, gegenüber 48-76 % ohne *Tactile Cueing*). In der Konfiguration TC_{STOP}_{INFO} haben sie fast die gesamte Zeit nach draußen gesehen (95-100 %). In der Beschleunigungsphase lag die akkumulierte Blickdauer ohne *Tactile Cueing* bei 49-74 % gegenüber 89-96 % für TC_{STOP} und 91-95 % für TC_{STOP}_{INFO}. Lediglich in der Steigphase änderte sich der Vergleich: Nur Pilot 3C sieht in beiden *Tactile Cueing*-Konfigurationen mehr nach draußen als ohne *Tactile Cueing* (TCoff: 56 %, TC_{STOP}: 87 %, TC_{STOP}_{INFO}: 91 %). Pilot 3B schaut nur in der TC_{STOP}-Konfiguration mehr nach draußen (88 % gegenüber TCoff: 48 % und TC_{STOP}_{INFO}: 47 %). Für Pilot 3B sind die Zeiten in allen Konfigurationen annähernd identisch (TCoff: 55 %, TC_{STOP}: 54 % und TC_{STOP}_{INFO}: 53 %).

Während der Effekt auf die *kumulierte Blickdauer* in der Takeoff- und der Beschleunigungsphase relativ groß war, war dieser im anschließenden Steigflug geringer, bzw. bei einem der drei Piloten gar nicht zu beobachten. Dazu gibt es zwei mögliche, sich ergänzende Erläuterungen. Zum einen bewegt sich der Hubschrauber während der ersten beiden Phasen in Hindernishöhe, übersteigt diese jedoch sehr schnell nach Beginn des Steigflugs. Dabei erhöht sich der Hindernisabstand und das Kollisionsrisiko nimmt ab, bzw. die Zeitreserve, innerhalb derer es durch unbeabsichtigte Flugbahnabweichungen zu einer Kollision kommen kann, eng. *time-to-collision*, steigt. Gegenüber dem Flug in Boden- und Hindernisnähe hat der Pilot beim Steigflug also mehr Zeitreserven, um auf die Instrumente schauen zu können. Zum anderen hat der Pilot insbesondere bei dieser Flugaufgabe ein zusätzliches Interesse, die Fluggeschwindigkeitsanzeige zu betrachten, da es in diesem Flugabschnitt eine Geschwindigkeitsvorgabe gibt. Daher schaut er häufiger auf die Instrumente und weniger nach außen. Dies gilt unabhängig davon, ob er mit oder ohne *Haptic Torque-Protection* fliegt. Bei der *Acceleration*-Phase hingegen, die mit dem Einleiten der Rotation in den Steigflug bei Erreichen von 70 kt endet, könnte sich durch die *Haptic Torque-Protection* ein unbeabsichtigter Vorteil ergeben: Der Pilot könnte durch das automatische Absenken der Stop-Position bei $v_y = 65$ kt, d.h. knapp unterhalb von 70 kt auf die Geschwindigkeit schließen. Bis zu diesem Ereignis bräuchte er also nicht auf die Geschwindigkeitsanzeige zu schauen. Tatsächlich schauen die Piloten mit aktiver *Haptic Torque-Protection* meist nach Absenken des *Softstops* das erste Mal auf die Anzeigen. Dieser mögliche Zusammenhang könnte also einen Einfluss auf die *kumulierte Blickdauer* in der *Acceleration*-Phase haben. Es ist anzunehmen, dass dieser Einfluss klein bei niedrigen Fluggeschwindigkeiten ist und größer wird, je schneller der Hubschrauber fliegt.

Mehr Einblick könnte eine detailliertere Auswertung AOI innerhalb des Displays geben. Wenn man die Anteile der visuellen Aufmerksamkeit, die auf die Geschwindigkeitsanzeige entfallen, von denen unterscheiden könnte, die auf den FLI entfallen, ließen sich die Effekte trennen. Zumindest für die *Takeoff*-Phase ist der Effekt der vollständigen Fokussierung auf die Außenwelt eindeutig auf die *Haptic Torque-Protection* zurückzuführen.

7.3.4. Kräfte

Wie schon in *Studie 1* beobachtet, variieren auch hier die von den Piloten aufgewandten Kräfte zum Halten des Steuers an der Stop-Position während des Versuchs, wie exemplarisch im zeitlichen Verlauf in Abbildung 7.8b zu sehen ist. Die ermittelten *Peaks* und Haltekräfte aller Konfigurationen und Piloten wurden in Abbildung 7.12 zusammengefasst. Die Darstellung entspricht der Darstellung aus Kapitel 5. Dabei lässt sich zwischen Haltephasen und transienten Phasen mit *Peaks* unterscheiden. Zusätzlich zu den *Peaks* bei der Kontaktaufnahme (*contact*) mit dem *Softstop* und der erwarteten Reduktion des Torque-Limits (*push*) gibt es hier noch den Fall der unerwarteten Limitreduktion nach einseitigem Triebwerksausfall (*push OEI*). Die maximalen Haltekräfte betrugen zwischen 7 und 17 N. Der höchste *Peak*-Wert betrug 28 N bei Pilot 3A in der Konfiguration TC_{agg}^{STOP} .

Auch außerhalb der oben beschriebenen Ereignisse variiert die von den Piloten aufgebraachte Kraft zum Halten des Steuers am *Stop-Cue* über die Zeit eines Versuchsdurchlaufs. Zur besseren Übersicht wurden die Verteilungen der Haltekraft in Form von Boxplots dargestellt. Die oben genannten Transienten-Ereignisse wurden bei der Berechnung der Boxplots ausgeschlossen. Dazu wurde der Zeitraum vor dem ersten Kontakt mit dem *Stop-Cue*, als auch die erste Sekunde nach der Kontaktaufnahme und die Zeitspanne der Verschiebung des *Softstops* ausgeklammert. Für die Konfigurationen mit *Info-Cue*, d.h. mit zusätzlicher Reibungsschwelle wurde jeweils nur die Zeitabschnitte berücksichtigt, in denen das *Info-Cue* aktiv war, d.h. nur der Zeitabschnitt vor der Reduktion des Torque-Limits bei 65 kt Fluggeschwindigkeit. Die größte Spanne der Haltekraftverteilung betrug 2-17 N bei Pilot 3A und trat in der Konfiguration TC_{agg}^{STOP} auf. Die hier aufgetretenen *Peak*werte bei der Kontaktaufnahme und Verschiebung des *Softstops* liegen aber oberhalb einiger der in der Literatur angegebenen Kraftschwellen, hätten also zu Überschreitungen geführt.

Rückschluss auf die Kontaktgüte

Aus der Kraftmessung lässt sich zudem ableiten, wie gut der Kontakt zu dem *Stop-Cue* letztlich war und damit auch, wie gut der *Tactile Cueing*-Prototyp funktioniert. Der Pilot ist nur dann im Kontakt mit dem *Stop-Cue*, wenn die aufgewandten Kräfte größer als die eingestellte Reibung sind. Nur so kann er spüren, wenn sich das *Stop-Cue* bewegt. In dieser Studie ist dies entweder die Grundreibung von 4 N in den ersten beiden Konfigurationen ohne *Info-Cue* oder die erhöhte Reibung von 10 N in den beiden letzten Konfigurationen mit *Info-Cue*, siehe auch Abbildung 7.1. Die *Peak*-Werte aller Piloten und Konfigurationen lagen jeweils oberhalb dieser Schwellen. Anders war dies jedoch bei den Haltekräften, diese lagen teilweise unterhalb der Schwellenwerte. Das ist bedeutsam, weil der Pilot dann nicht merken kann, wenn sich das *Stop-Cue* in Richtung höherer

Auslenkungen, bzw. vom Stick weg bewegt.

Es zeigten sich die folgenden Unterschiede zwischen den Piloten. Pilot 3A hat in allen Konfigurationen mehr als die aktuell wirksame Reibungskraft am *Stop-Cue* aufgewendet. Die maximale Haltekraft lag bei 17 N. Pilot 3C hingegen hat nur beim aggressiven Fliegen in der Konfiguration TC_{agg}^{STOP} immer mehr Kraft als die Basisreibung aufgewendet, in einer Konfigurationen sogar nur in 25 % der Zeit, wie anhand der Boxplots erkennbar ist. Dabei hat er nie mehr als ca. 12 N aufgewendet. Pilot 3B hat die geringsten Steuerkräfte aufgewendet, maximal 9 N. Seine Steuerkräfte waren in den Konfigurationen ohne *Info-Cue* zu 25-50 % unterhalb der Basisreibung und in den Konfigurationen mit *Info-Cue* sogar für die gesamte Dauer des Manövers unterhalb der Reibungsschwelle. Hier hatte der Pilot also keinen andauernden Kontakt mit dem *Stop-Cue*. Wenngleich hier trotzdem fast die gesamte Zeit Kontakt mit dem *Stop-Cue* bestand, so besteht doch die Gefahr, dass der Kontakt verloren geht und der Pilot nicht merkt, wenn sich das *Tactile Cue* von ihm weg bewegt und mehr Leistung verfügbar wird. Diese bliebe dann ungenutzt.

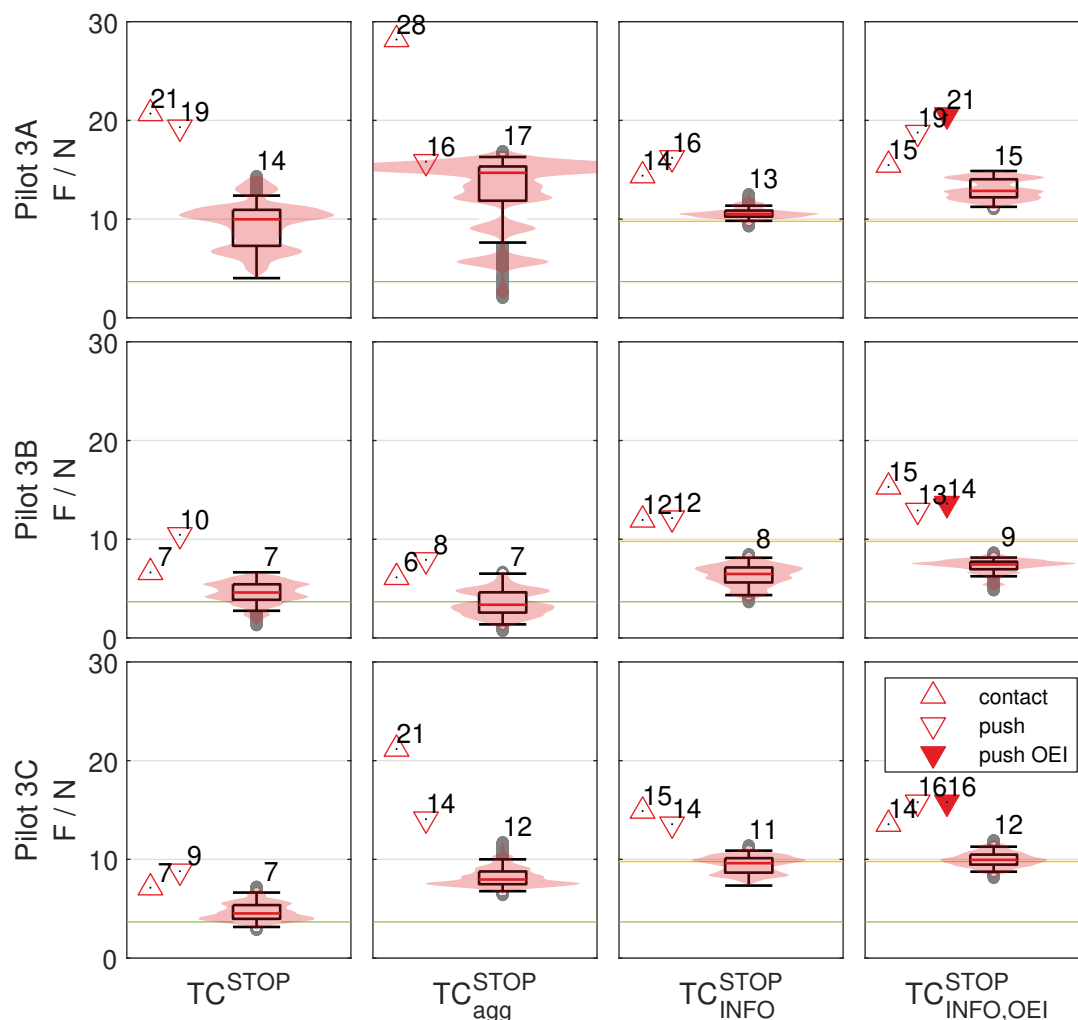


Abbildung 7.12.: Haltekraftverteilung und Kraftmaxima bei Kontakt- und Limitverschiebung für *Tactile Cue*-Design 3

Daraus kann geschlussfolgert werden, dass Situationen auftreten, in denen die Piloten nicht kontinuierlich im Kontakt mit dem *Stop-Cue* sind, obwohl sie annehmen, dies zu sein. Der beim *Tactile Cue*-Design gewünschte Vorteil eines harten Stopps, der sich wie eine unnachgiebige Wand anfühlt, siehe oben, erweist sich hier in Verbindung mit hoher Reibung als Nachteil. Zwar wenden alle Piloten zunächst eine ausreichend hohe Kontaktkraft auf, um diese Reibung zu überwinden. Die Haltekraft sinkt dann bei manchen aber komplett unter die Reibungsschwelle, mit dem Risiko, dass der Pilot den Kontakt zum *Stop-Cue* verliert. Daher erscheint der hier verwendete *Tactile Cue*-Prototyp, der eine Reibungsschwelle mit einem *Hardstop* kombiniert, als noch nicht ausgereift, um den Piloten längere Zeit auf einer variierenden Steuerposition zu führen. Dies funktionierte nur bei einem von drei Piloten, der sich durch besonders hohe Kräfte von den anderen unterschied. Die bei der Auslegung des *Tactile Cue*-Prototypen implizite Annahme, die Piloten würden zum Kontakthalten mit dem *Stop-Cue* immer aktiv mindestens so viel Kraft aufwenden, dass die Reibungsschwelle überwunden ist, ist also falsch. Offenbar wird unbewusst nur soviel Kraft aufgewandt, wie zum Halten des Sticks an einer Schwelle vermeintlich erforderlich ist. Der Grund ist wahrscheinlich, dass sich das *Stop-Cue* qualitativ nicht von der Grundreibung im unlimitierten Bereich, bzw. der erhöhten Reibung im Info-Bereich, unterscheiden lässt. Faktisch zeigt der Stick in beiden Fällen auch das gleiche Verhalten. Erst wenn der eingestellte Reibungswert überwunden wird, bewegt sich der Stick, vorher nicht. Dies steht der Eignung des *Tactile Cues* „*Reibungsstufe*“, zumindest in der hier gezeigten Kombination mit einem steifen *Softstop* und Basisreibung entgegen. Eine Verbesserung könnte darin bestehen, das *Stop-Cue* mit einer noch zu bestimmenden Mindest-Elastizität zu konfigurieren, aufweisen, weil es dadurch bei einer Relativbewegung zwischen Stick und *Stop-Cue* zu einer spürbaren Variation der Kraft kommen würde.

Einfluss aggressiveren Pilotenverhaltens

Es lassen sich die folgenden Beobachtungen zum Einfluss der Konfiguration auf die angewandten *Peak*- und Haltekräfte machen. In der Konfiguration TC_{agg}^{STOP} , in der die Piloten durch eine Zeitvorgabe zu aggressiveren Steuereingaben verleitet werden sollten, wenden nur zwei der drei Piloten (3A und 3C) höhere Kräfte auf als in der Konfiguration TC^{STOP} . Dies gilt sowohl für die *Peak*-Werte als auch für die Haltekräfte. Die Steuerkräfte von 3B sind auf dem gleichen Niveau wie vorher, weil er keine aggressiveren Steuereingaben als vorher gemacht hat. Er hatte sich also durch die Formulierung der geforderten Aufgabe, nun eine möglichst kurze Manöverzeit zu erreichen, nicht dazu verleiten lassen, den Sidestick noch kräftiger ins *Tactile Cue* zu ziehen. Dies hätte auch tatsächlich keinen Vorteil gebracht, solange das *Stop-Cue* nicht überschritten wurde. Daher tragen seine Ergebnisse nicht zur Ermittlung des Einflusses höherer Steueraggressivität auf die Steuerkräfte bei.

Durch den Vergleich mit dem Verlauf der Steuerposition bei der Kontaktaufnahme lässt sich erkennen, dass die *Verschiebe-Peak*-Werte der Piloten 3A (28 N) und 3C (21 N) auf eine höhere Bewegungsrate und damit einen höheren Impuls beim Kontakt mit dem *Stop-Cue* zurückzuführen sind. Dabei trifft die bewegte Masse aus Hand und Arm des Piloten, aber auch Steuergriff, Getriebe und Motor des aktiven Sidesticks auf das *Stop-Cue* und taucht etwas ein. Es zeigte sich dabei eine geschwindigkeitsabhängige Nachgiebigkeit.⁸

⁸Diese Nachgiebigkeit ist damit zu erklären, dass der aktive Sidestick am *Stop-Cue* die kinetische Energie der bewegten

Einfluss einer zusätzlichen Kraftschwelle als *Info-Cue*

Zur Bewertung des Einflusses der zusätzlichen Kraftschwelle des *Info-Cue* auf die aufgewandten Pilotenkräfte am *Stop-Cue*, werden die beiden Konfigurationen mit *Info-Cue*, nämlich TC_{INFO}^{STOP} und $TC_{INFO, OEI}^{STOP}$, betrachtet, siehe Abbildung 7.12. Diese Konfigurationen sind bis zum Auslösen des Triebwerkausfalls (OEI) identisch. Das bedeutet, dass die hier aufgetragenen Werte für *Contact-Peak*, Haltekraft und *Verschiebe-Peak* für die beiden Konfigurationen unter identischen Bedingungen entstanden sind.

Die *Peaks* und das Haltekraftniveau sind nur bei Piloten 3B und 3C höher als in der Konfiguration TC^{STOP} . Bei Pilot 3A sind die *Contact-Peaks* niedriger als bei TC^{STOP} , aber immer noch höher als bei den anderen Piloten, siehe oben. Die Verteilung der Haltekraft ist enger als vorher. Die *Contact-Peaks* könnten bei Pilot 3A deshalb niedriger sein als vorher, weil das *Info-Cue* nach dessen eigener Aussage wie ein „Vorstopper“⁹ wirkt.

Einfluss unerwarteter Limitreduktion (OEI)

Die Kraft bei einer unerwarteten Reduktion des Limits bei einem plötzlichen (OEI), d.h. einer Verschiebung des *Tactile Cues* in die Pilotenhand, ist nur bei zwei von drei Piloten etwas höher als die Kraft bei der erwarteten Verschiebung (14 N gegenüber 13 N, bzw. 21 N gegenüber 19 N). Sie liegt damit unterhalb der hier ermittelten Kontakt-Peaks.

Präzision des *Tactile Cues*

Die Nachgiebigkeit der in dieser Studie als *Stop-Cue* verwendeten Kombination aus *Hardstop* und *Softstop* ist in Abbildung 7.13 zu erkennen. Darin sind die Kräfte und Positionen relativ zum *Stop-Cue* aller vier Testfälle aufgetragen, jeweils mit den Daten aller drei Piloten. Diese Form der Darstellung wurde bereits in Studie 1 verwendet, siehe Abbildung 5.14.

Man erkennt, dass auch diese *Tactile Cue*-Variante transiente Überschreitungen von bis zu 2 % und in dem Fall einer sehr schnellen Bewegung des Sticks sogar kurzzeitig bis zu 5 % zulässt (außerhalb des abgebildeten Bereichs). Diese sehr kurzzeitigen Überschreitungen können hier wegen der relativ langsamen Dynamik der Torqueantwort toleriert werden.

Die Überschreitungen während der Haltephasen liegen bei maximal $\delta_{0,tol.} = 1,5 \%$, bei Haltekraften von bis zu 17 N. Stellt man diesem Wert den Wert aus Studie 1, siehe Abschnitt 5.3.3 gegenüber, welcher bei etwa 1,8 % lag und aus Haltekraften von bis zu 18 N herrührte, so zeigt sich kaum ein Unterschied. Damit stellt der hier als *Stop-Cue* verwendete *Tactile Cue* in Bezug auf die erreichte Präzision keine Verbesserung gegenüber dem in Studie 1 verwendeten *Softstop* dar. Dennoch

Stick-Masse abrupt dissipieren muss, wenn der Stick auf das Cue trifft. Die Dissipationsfähigkeit, bzw. -leistung des zugrunde liegenden elektromechanischen Systems ist aber limitiert.

⁹Pilot 3A: „Vorstopper gut zum sensitiv Fliegen“

sollte das hier vorgestellte Konzept eines steifen *Softstops* nicht verworfen, sondern hardwareseitig optimiert werden, wie bereits in Abschnitt 7.3.1 diskutiert.

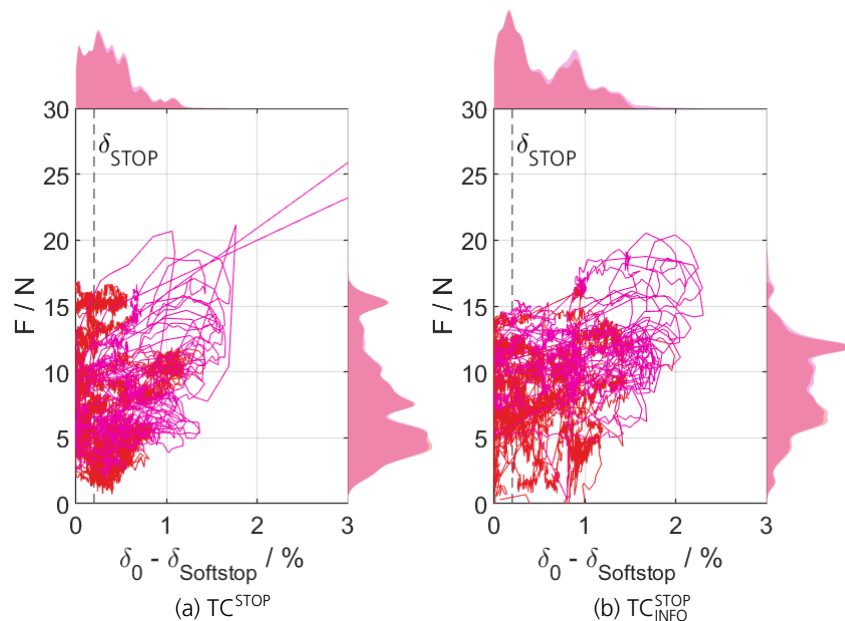


Abbildung 7.13.: **Nachgiebigkeit des *Softstops*: Haltekraft (rot) und Transientkraft (magenta) am Sollgradient (Gerade) mit Hysteresis (dünn gestrichelt) für alle runs und eigentliche Stop-Position $\delta_{0,STOP}$ (gestrichelt); außen kumulative Verteilungsdichten**

7.3.5. Subjektive Bewertung

Die Piloten wurden mit einem Fragebogen nach ihrer Akzeptanz des gezeigten Prototypen der *Haptic Torque-Protection* im Allgemeinen und zu verschiedenen spezifischen Merkmalen im Besonderen befragt, siehe auch Abschnitt 7.2.5. Der gesamte Fragebogen mit allen Antworten befindet sich im Anhang, Abschnitt D.1. Im Kontext dieser Arbeit sind die folgenden Beobachtungen von Interesse.

Gemäß Akzeptanzfragebogen nach VAN DER LAAN, JINKE ET. AL. gaben alle Piloten höchste Werte für Zufriedenheit und Nützlichkeit der getesteten *Haptic Torque-Protection* an, siehe Abbildung 7.14. Allgemein kommentierten die Piloten, das Fliegen mit *Haptic Torque-Protection* sei „deutlich angenehmer [als ohne Tactile Cue]“ und „Kann viel mehr rausschauen“, „Easy“, „macht Spaß“ (Pilot 3A). Weiter sei es „Ziemlich nah an perfekt, genial“ und „intuitiv, sehr schön“ (Pilot 3B). Und schließlich „Kann nach draußen schauen, bessere SA [Situational Awareness]“, „tip-top super“ (Pilot 3C). Dieser Eindruck deckt sich mit der Blickbewegungsmessung, siehe Abschnitt 7.3.3.

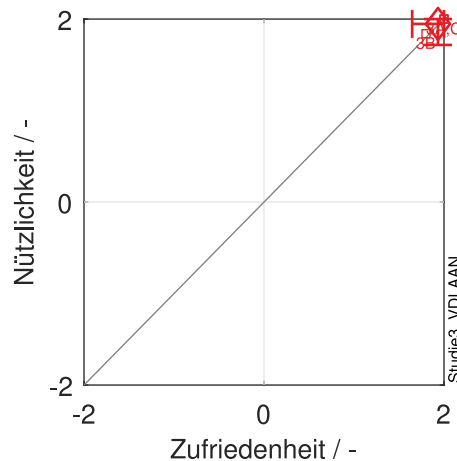


Abbildung 7.14.: **Tactile Cue-Design 3 Akzeptanz: Nützlichkeit über Zufriedenheit**

Subjektive Bewertung des Stop-Cue

Die automatische Verschiebung des *Stop-Cues* bei Veränderung des gültigen Torque-Limits im normalen Betrieb und bei einseitigem Triebwerksausfall OEI wurde von allen Piloten als hilfreich und wünschenswert empfunden. Die Geschwindigkeit der Verschiebung, hier $10\ \%_s \hat{=} \text{ca. } 10\ \text{mm/s}$, wurde im Allgemeinen als angemessen, d.h. weder als zu langsam, noch als zu schnell empfunden. Nur ein Pilot empfand die Verschiebung beim aggressiven Fliegen in der Konfiguration $\text{TC}_{\text{agg}}^{\text{STOP}}$ als zu schnell. Die Führung durch das *Stop-Cue* wurde von zwei Piloten als wünschenswertes Merkmal gegenüber einer reinen Signalisierung, z.B. durch eine Vibration, bewertet. Ein Pilot hat dies als neutral, mit der Tendenz zu wünschenswert bewertet.

Subjektive Bewertung des Info-Cue

Die Schwellendarstellung wurde von zwei Piloten als „*immer spürbar*“, von einem Piloten als „*neutral*“ mit der Tendenz zu „*immer spürbar*“ bewertet. Die Intensität wurde von allen Piloten als „*genau richtig*“ bewertet. Zwei Piloten hielten die Darstellung der Schwelle für „*hilfreich*“, ein Pilot (Pilot 3A) für „*nicht hilfreich*“. Allerdings kommentierte er, dass sich seine Antwort explizit auf „*diese Aufgabe des schnellen Abflugs*“ beziehe. Auch Pilot 3C kommentierte, dass das *Tactile Cue* „*generell hilfreich sei, aber bei dieser Task nicht notwendig*“. Dem entgegen steht der Kommentar eines anderen Piloten (3B). Dieser sagte, dass das *Info-Cue* hilfreich zur Einschätzung der Leistungsreserve beim Takeoff sei: „*Gut für safe Takeoff: Nur bis MCP, dann weiß ich, dass ich safe bin.*“. Ein anderer Pilot 1C sagte, es erfülle die Funktion eines „*Vorstoppers*“ und sei daher „*gut zum sensitiv Fliegen*“. Zwei Piloten hielten dieses Merkmal für „*wünschenswert*“, einer gab „*neutral*“ an, d.h. weder „*wünschenswert*“ noch „*nicht wünschenswert*“. Alle Piloten haben angegeben, dass sowohl die Schwellendarstellung als auch die erhöhte Reibung innerhalb des Info-Bereichs „*nie störend*“ gewesen ist.

Die Signalisierung, dass sich das Steuer, bzw. der Torque bereits innerhalb des Info-Bereichs befindet,

bewerteten die Piloten komplett unterschiedlich zwischen „*immer spürbar*“, über „*neutral*“ bis „*neutral, eher nicht immer spürbar*“. Dabei wurde kommentiert, dass die Spürbarkeit „*von der Bewegungsschnelligkeit des Kollektives abhängig*“ sei und, dass dazu ein „*größerer Unterschied vom Normbereich*“ erforderlich sei. Die Intensität wurde entsprechend mit „*genau richtig*“ bis „*ok, aber ein bisschen zu schwach*“ bewertet. Dabei fällt auf, dass derselbe Pilot, der sagte, die Schwelle sei zu niedrig, zu wenig Kraft aufbrachte und zu 50 % der Zeit unterhalb der Reibungsschwelle blieb. Es scheint also schwierig, unterschiedliche *Tactile Cues*, die aber qualitativ identisch sind, nur aufgrund ihrer Kraft zu unterscheiden, wie oben bereits diskutiert.

Zwei Piloten hielten das Merkmal erhöhter Reibung als *Tactile Cue* für „*hilfreich*“, einer für „*neutral, mit der Tendenz zu hilfreich*“. Letzterer begründete dies damit, dass „*Friction kein Feedback gibt über die Position im gelben Bereich*“. Später ergänzte er jedoch, dass in diesem Fall die „*Friction ausreichend*“ sei, da ohnehin „*der Bereich so kurz*“ sei. Alle Piloten hielten das Merkmal für „*wünschenswert*“.

Auf die Frage, ob das *Info-Cue* in allen Flugsituationen gleich sein solle, antwortete ein Pilot, dies sei „*abhängig von der Mission*“. „*Windenarbeit mit Außenlast benötigt mehr Sensitivität in Bezug wo bin ich genau. Hierbei möchte ich sehr wohl wissen, wann/wo der gelbe Bereich anfängt, bzw. an den max. roten Bereich anschlage*“. Hingegen könne „*in Missionen, in denen ich nur die max. Leistung benötige, der erste 'Soft-Stop' vernachlässigt werden.*“ Die beiden anderen Piloten sagten klar, das *Info-Cue* müsse „*immer gleich*“ sein. Ein Pilot begründete dies mit Sicherheitsanforderungen, denn „*unterschiedliche Konfigurationen können gefährlich sein unter Stress*“.

Abschließend wurden die Piloten nach alternativen Ausprägungen von *Tactile Cues* befragt, die Ausdrücken sollten, dass sich das Steuer bereits innerhalb des Info-Bereichs befindet. Zwar bewerteten alle die Eigenschaft des gezeigten *Info-Cues* in Form einer erhöhten Reibkraft, dass es nur beim Erhöhen der Handkraft über die Grundreibung hinaus von letzterer unterscheidbar ist, als „*wünschenswert, genau richtig.*“ - Dennoch wählten alle aus den vorgeschlagenen Alternativen für ein ideales *Info-Cue* die Eigenschaft, es „*sollte immer spürbar sein*“ aus, d.h. spürbar ohne, dass man das Steuer dabei bewegen muss. Sie wählten speziell die vorgeschlagene Alternativoption, „*z.B. dadurch, dass der Pilot eine moderate Gegenkraft (z.B. Softstop) aufbringen muss. -Auch wenn man dann den Stick nicht loslassen kann, ohne dass er durch diese Kraft unter die Schwelle zum gelben Bereich zurückkehrt.*“ Das gezeigte *Tactile Cue* für genau richtig zu halten und sich trotzdem eine andere ideale Form zu wünschen, erscheint zunächst widersprüchlich. Wahrscheinlich liegt der vermeintliche Widerspruch aber an der unterschiedlichen Interpretation der Frage, bzw. des Begriffs *Softstop*. Im Kontext von *Tactile Cueing* wird unter *Softstop* ein lokaler Federgradient verstanden. Die Piloten bezeichneten allerdings fälschlicher Weise hin- und wieder auch den als *Info-Cue* verwendeten sprunghaften Anstieg der Reibung als *Softstop*. Die Frage ist daher ungünstig formuliert, auch wenn sie explizit benennt, dass man bei einem *Softstop* dagegenhalten muss, weil das Steuer sonst unter den Beginn des Info-Bereichs zurückkehrt. Ein *Softstop* könnte aber den von einem Piloten benannten Nachteil des Reibungssprungs kompensieren, „*dass man dort nicht merkt, wo innerhalb des Info-Bereichs sich das Steuer befindet*“, wie einer der Piloten hier trotz Akzeptanz des gezeigten *Tactile Cues* kritisch anmerkte. Dieser kommentierte an anderer Stelle, dass man das System dahingehend verändern sollte, dass man „*einen Force Gradient im gelben Bereich*“ verwenden solle. Dies gelte vor allem „*bei anderen Maschinen*“, bei denen „*der gelbe*

Bereich länger“ ist. Hier aber, bei einem „kurzen [Info-Bereich] merkt man eh keinen Unterschied“ und daher sei „*Friction* vielleicht ausreichend gegenüber der Alternative des *Softstops*“.

Unabhängig von der Wirksamkeit¹⁰ des *Stop-Cues* kann man bezüglich der Akzeptanz des aktuellen *Tactile Cue*-Designs generell resümieren, dass es von den Piloten für sinnvoll und nützlich erachtet wurde. Bezüglich der Details gingen die Pilotenmeinungen aber auseinander. Zunächst gab es gegensätzliche Meinungen darüber, ob der Info-Bereich überhaupt als *Tactile Cue* dargestellt werden sollte oder nicht. Dann stellte sich die Frage, wieviel Informationsgehalt mit dem *Tactile Cue* überhaupt transportiert werden sollte. Die bisherige Ausprägung erlaubt die Erfassung der Ein- und Austretens in den, bzw. aus dem Info-Bereich, nicht aber ob man sich noch darin befindet oder die Position innerhalb des Info-Bereichs. Hier sollten weitere Formen untersucht und miteinander verglichen werden, z.B. ein *Softstop*. Denkbar wäre auch eine Vibration. Eine anhaltende Signalisierung könnte jedoch als dauerhaft störend empfunden werden. In zukünftigen Studien sollte daher immer auch der Gesichtspunkt der Störung einbezogen werden und die Akzeptanz einer Störung im Verhältnis zum Nutzen bewertet werden.

7.4. Zusammenfassung Studie 3

Schwerpunktmäßig wurde in dieser Flugsimulator-Studie der Einfluss einer *Haptic Torque-Protection* mit unterschiedlichen *Tactile Cue*-Ausprägungen auf die Verteilung des visuellen Fokus während eines mehrphasigen Startmanövers in der Hinderniskulisse untersucht. Dabei wurden auch die Arbeitsbelastung und die Systemakzeptanz sowie das *Tactile Cueing*-Design subjektiv durch die drei teilnehmenden Testpiloten bewertet. Des Weiteren wurden die Wirksamkeit und die auftretenden Betätigungskräfte ermittelt. Nachfolgend sind die wichtigsten Ergebnisse zusammengefasst.

1. *Präzision*: Mit der *Haptic Torque-Protection* wurde der zur Verfügung stehende Torque besser genutzt, d.h. es wurde über längere Zeit dichter am Limit operiert, als ohne *Haptic Torque-Protection*. Mit der *Haptic Torque-Protection* kam es nicht zu Limit-Überschreitungen, ohne diese trat dies einmal auf.
2. *Arbeitsbelastung*: Die subjektiv empfundene Arbeitsbelastung sank in den Konfigurationen mit *Haptic Torque-Protection* für alle Piloten jeweils auf wenigstens die Hälfte gegenüber der Referenzkonfiguration.
3. *Visuelle Aufmerksamkeit*: Gegenüber der Referenzkonfiguration ohne *Tactile Cueing* konnte mit *Tactile Cueing* der Zeitanteil mit nach außen gerichteter visueller Aufmerksamkeit, eng. *out-the-window* (OTW), welche als *kumulierte Blickdauer* mittels Blickbewegungssystem erfasst wurde, erhöht werden. Dabei traten Unterschiede in den verschiedenen Phasen des Startmanövers auf. In Boden- und Hindernisnähe war die Verbesserung des OTW-Zeitanteils durch die *Haptic Torque-Protection* am deutlichsten. Beim *Takeoff* haben zwei von drei Piloten mit *Haptic Torque-Protection* sogar überhaupt nicht mehr auf die Anzeige geschaut, sondern nur nach draußen. In der Steigphase, d.h. oberhalb der Hinderniskulisse, war der Unterschied

¹⁰Hier zeigte sich das Risiko, dass der Kontakt verloren geht, siehe Abschnitt 7.3.4

geringer, vermutlich deshalb, weil die Piloten in allen Konfigurationen zur Einhaltung der Sollgeschwindigkeit auf die Geschwindigkeitsanzeige schauen mussten.

4. *Kraft*: Die von den Piloten maximal aufgewandten Kräfte, um den Stick am *Stop-Cue* zu halten, variierten sowohl zwischen den Piloten und Konfigurationen als auch während der einzelnen Versuche. Sie lagen zwischen 8 und 28 N. Die maximalen Haltekräfte lagen zwischen 7 und 17 N. Bei der Kontaktaufnahme gab es meist einen *Peak*-Wert, der meistens, aber nicht immer, höher war als die danach aufgewandten Haltekräfte. Er erreichte maximal 28 N und lag damit bis zu 12 N über der zugehörigen Haltekraft.
5. *Systemakzeptanz*: Die Systemakzeptanz der gezeigten *Haptic Torque-Protection* war sehr hoch. Dies zeigte sich auch in den Bewertungen auf der Van der Laan Skala. Pilotenkommentar: „Ziemlich nah an perfekt, genial“.
6. *Tactile Cue Design*: Aus der Datenauswertung und der subjektiven Pilotenbewertung konnten die folgenden Schlussfolgerungen in Bezug auf die Eignung des aktuellen *Tactile Cueing*-Design-Prototypen gezogen werden: Bei der Verwendung eines sehr steilen Kraft-Gradienten als *Stop-Cue*, besteht in Verbindung mit der Basisreibung die Gefahr, dass der Kontakt zum *Tactile Cue* verloren geht. Denn es kann passieren, dass der Pilot seine Kraft soweit reduziert, dass sie kleiner ist als die Reibungskraft. Dann würde er es nicht bemerken, wenn sich der *Stop-Cue* weg bewegt. Ein mögliche Lösung könnte darin bestehen, das *Stop-Cue* mit einem noch zu bestimmende Mindestgradienten zu konfigurieren, damit es bei einer Relativbewegung zwischen Stick und *Stop-Cue* zu einer spürbaren Kraftveränderung kommt. Das *Info-Cue* wurde von den Piloten grundsätzlich als geeignet bewertet. Dennoch wurden Vorschläge zur Verbesserung gemacht, etwa indem es ebenfalls als *Softstop* ausgeführt wird. Dies sollte in weiteren Versuchen erprobt und verglichen werden.

8. Schlussfolgerungen und Ausblick

In diesem Kapitel werden die Ergebnisse der im Rahmen durchgeführten und zuvor beschriebenen drei Studien zusammenfassend in Hinblick auf die in der Einleitung definierten, übergeordneten wissenschaftlichen Fragestellungen diskutiert und in den Stand der Wissenschaft eingeordnet.

8.1. Präzision: Limiteinhaltung und -Ausschöpfung

*Wie wirkt sich Tactile Cueing am Kollektivsteuer eines Hubschraubers zur Vermeidung einer unwillentlichen Überschreitung des Triebwerk-Drehmomenten-Limits und zur Information über den genutzten Arbeitsbereich, eng. Haptic Torque-Protection, auf die **Präzision**, d.h. auf die Einhaltung des Limits und die Ausschöpfung des zur Verfügung stehenden Torques aus?*

Die Auswirkungen einer *Haptic Torque-Protection* auf die Präzision, d.h. die Einhaltung des Limits und die Ausnutzung des Limits, bzw. des zur Verfügung stehenden Torque wurden in der Studie 1, Abschnitt 5.3.1 und der Studie 3, Abschnitt 7.3.1 dieser Arbeit untersucht und diskutiert.

Zusammenfassend lässt sich dabei festhalten, dass sich mit einer *Haptic Torque-Protection* eine höhere Präzision erreichen lässt. Es traten in beiden Studien mit einem *Tactile Cue* seltener und geringere Überschreitungen auf als ohne *Tactile Cue*. Die Piloten konnten näher am Limit operieren. Es wurden dabei die folgenden Einflüsse auf die Präzision identifiziert: Pilotenverhalten und Flugaufgabe, Güte des Modells zur Berechnung der *Tactile Cue*-Position und Ausprägung des *Tactile Cues*. Dabei gilt auch für die Präzision, was schon für die Arbeitsbelastung diskutiert wurde: Die Aufgabe kann den Piloten, auch im manuellen Flug dazu verleiten, näher an das Limit zu gehen, oder aggressiver zu fliegen, als er es normalerweise tun würde. Dabei steigt das Risiko von Überschreitungen. Die Präzision der *Haptic Torque-Protection* wird maßgeblich durch die Genauigkeit des Torque-Prädiktors bestimmt. Denn die Einhaltung des Torquelimits wird vollständig durch das System geregelt, sobald der Pilot den Kontakt zum *Tactile Cue* hält. Hier zeigte sich Optimierungspotential bei der Umsetzung der automatischen Reduktion des Torquelimits bei Überschreiten einer bestimmten Flugeschwindigkeit gemäß Flughandbuch. Diese war in der hier verwendeten *Haptic Torque-Protection* eher konservativ ausgelegt, wodurch die Reduktion des Torquelimits einige Sekunden früher als erforderlich erfolgte und daraus resultierend weniger Torque als erlaubt genutzt wurde. Einen weiteren Einfluss auf die Präzision der *Haptic Torque-Protection* hat neben dem Prädiktor auch die Toleranz des *Tactile Cues*, siehe unten. Diese kann, zumindest in einem fly-by-wire (fbw)-System, durch eine nachträgliche Begrenzung der gemessenen Sidestick-Steuerposition auf die berechnete Stop-Position kompensiert werden.

8.2. Arbeitsbelastung

*Welchen Einfluss hat eine Haptic Torque-Protection auf die **Arbeitsbelastung** von Piloten?*

In den in dieser Arbeit durchgeführten Studien 1 und 3 wurde der Einfluss einer *Haptic Torque-Protection* auf die Arbeitsbelastung experimentell während verschiedener Takeoff-Manöver untersucht, siehe Abschnitte 5 und 7. In beiden Studien mit insgesamt sieben Piloten konnte gezeigt werden, dass sich die subjektiv empfundene Arbeitsbelastung mit *Tactile Cueing* gegenüber einer Referenzkonfiguration deutlich reduzieren lässt. Die Versuche beider Studien wurden im Simulator durchgeführt. Der Versuche der ersten Studie wurden zudem von einem der Piloten in dem realen Forschungshubschrauber ACT/FHS wiederholt. In allen Versuchen wurde mit *Tactile Cueing* eine Reduktion der Arbeitsbelastung gegenüber der Referenz ohne *Tactile Cueing* ermittelt. Sie lag über alle Piloten zwischen 36-67 % für das gewählte *Whiteout-Escape-Manöver*, im Wesentlichen ein vertikaler Steigflug. Für die beiden horizontalen Takeoffs lag sie bei 50-80 % für das *Fog-Departure-Manöver*, bzw. bei 55-74 % für das *Small Arms Takeoff Manöver*. Im Flugversuch lag die Reduktion der Arbeitsbelastung durch *Tactile Cueing* etwa in der gleichen Größenordnung wie im Simulatorversuch. Die Studien bestätigen damit die Annahmen und Ergebnisse Dritter, dass eine *Haptic Torque-Protection* die Pilotenarbeitsbelastung senken kann, etwa [13, S.5 f.]. Die Größenordnung für der Reduktion der Arbeitsbelastung in den hier durchgeführten Untersuchungen ist jedoch höher als die in der Literatur gefundene Angabe, die aus einer ähnlichen Untersuchung stammt. Dort wurde das *Vertical Maneuver* aus dem AERONAUTICAL DESIGN STANDARD (ADS-33) [106, S.32], einem dem *Whiteout-Escape-Manöver* ähnlichen – aber nicht identischen – Manöver mit dem Hubschraubermuster CH-47G geflogen. Dabei wurde eine Verbesserung der Arbeitsbelastung für die Konfiguration mit *Tactile Cue* gegenüber der Referenzkonfiguration von nur ca. 8 % angegeben [37, S.9].

Die folgenden methodischen Unterschiede können als wahrscheinliche Ursachen für die unterschiedlichen Größenordnungen der hier und in der Literatur gefundenen Reduktion der Arbeitsbelastung durch eine *Haptic Torque-Protection* angeführt werden. Zunächst handelte es sich um unterschiedliche Hubschraubermuster mit unterschiedlicher Reglerunterstützung, welche wahrscheinlich auch unterschiedlich schwer zu handhaben sind. Dort, in der AH-64, wurde ein höherer Grad an Reglerunterstützung verwendet, nämlich ein Translational Rate Command (TRC), also eine Regelung der Translationsgeschwindigkeit. Jene hält den Hubschrauber, wenn man das Steuer nicht ausschlägt, auf der Stelle. Hier wurden nur ein SAS, d.h. eine Ratenrückführung, siehe Kapitel 5, und ein ACAH, d.h. eine Lageregelung, siehe Kapitel 7, verwendet. Der Pilot musste hier somit selbst Position und Translationsgeschwindigkeit, bzw. mit SAS auch noch die Lage des Hubschraubers regeln. Der größere Einfluss liegt aber wahrscheinlich in den unterschiedlichen Manövern. Zwar sind die Flugprofile des dort verwendeten *Vertical Maneuver* und des hier genutzten *Whiteout-Escape-Manövers* ähnlich, aber die Performance-Kriterien sind unterschiedlich. Beim *Whiteout-Escape-Manöver* wurde explizit gefordert, dass das Manöver permanent am Leistungslimit geflogen wird. Das *Vertical Maneuver* hat lediglich eine zeitliche Vorgabe.¹ Dabei wurde das Torquelimit nur einmal, lediglich für weniger als 1 s, erreicht, nämlich beim Einleiten des Steigflugs. Daneben enthält dieses Manöver

¹Beim Vertical Manöver soll innerhalb von 13-15 s zunächst aus dem Hover in 15 ft um 25 ft gestiegen, dort für 2 s geschwebt und danach wieder um 25 ft auf die Ausgangshöhe gesunken werden, um dort stabil zu schweben, siehe [106, S.32]

nur eine weitere kritische Stelle, bei der eine Überschreitung des Torque-Limit droht, nämlich beim Abbremsen des Sinkflugs. In Verbindung mit der hohen Reglerunterstützung brauchte der Pilot in diesen Phasen also nur auf den Torque als einzige Regelgröße achten. In den übrigen Manöverphasen hingegen spielte der Torque keine Rolle. Dadurch ergab sich für das gesamte Manöver dort bereits im Referenzfall eine niedrige Arbeitsbelastung von nur 7 TLX auf einer Skala von 0 bis 100, an welcher die Einhaltung des Torques nur einen geringen Beitrag hat, so dass sie mit einer *Haptic Torque-Protection* auch nur noch wenig reduziert werden kann.

Die Ursache für die geringere Arbeitsbelastung beim Fliegen der Versuchsmanöver mit *Haptic Torque-Protection* gegenüber dem Fliegen ohne *Tactile Cue* dürfte darin bestehen, dass der Pilot mit *Haptic Torque-Protection* insgesamt weniger Aufgaben hat. Wie die Messung der Blickbewegung zeigte, schaut der Pilot mit *Haptic Torque-Protection* viel weniger auf die Cockpitanzeigen, in manchen Phasen gar nicht mehr, siehe auch Abschnitte 7.3.3 und 8.3. Das lässt den Schluss zu, dass die Aufgaben, die mit der Einhaltung des Torquelimits zusammenhängen mit der *Haptic Torque-Protection* entfallen: Dies sind der regelmäßige Wechsel der Aufmerksamkeit zwischen Außenwelt und Torque-Display, das Ablesen und Interpretieren der Anzeige, die Entscheidung, welche der abgebildeten Limitmarkierungen gerade gültig sind und schließlich das manuelle Nachführen und Korrigieren der Stickposition auf Basis der vom Display entnommenen Informationen. Mit der *Haptic Torque-Protection* werden diese beiden Tätigkeiten auf das Ziehen und das Halten des Kollektivsteuers an das *Stop-Cue*, bzw. den *Softstop* ersetzt. Aus der Aufgabe „Visuelles Monitoring mit häufigem Blickwechsel und manuellem Regeln“ wird „Anlehnen an einen mechanischen Anschlag“. Wenn man annimmt, dass das Halten des Sticks am *Softstop* keine nennenswerte Arbeitsbelastung bewirkt, kann man also daraus schlussfolgern, dass die mittels TLX bestimmte Differenz der Arbeitsbelastung zwischen der Referenzkonfiguration und den *Tactile Cue*-Konfigurationen dem Aufwand entspricht, welcher der Pilot zum manuellen Regeln des Torques genau am Limit aufbringen muss.

Die hier genutzten Manöver können als plausibel und für den Einsatz relevant angesehen werden, dabei aber eher Extremsituationen darstellen. Eine Reduktion der Arbeitsbelastung in der gemessenen Höhe könnte einen Vorteil bringen und das Risiko für Unfälle senken, gerade wenn noch andere Aufgaben oder Stressfaktoren dazu kommen. Eine Übertragbarkeit auf andere Manöver muss geprüft werden. Sie fällt wahrscheinlich unterschiedlich hoch aus und dürfte davon abhängen, wie der Leistungsbedarf relativ zum Limit ist und wie häufig und wie lange bei maximaler Leistung operiert wird.

Abschließend lässt sich also schlussfolgern: Eine *Haptic Torque-Protection* ermöglicht beim Operieren am Leistungslimit eine deutliche Reduktion der subjektiv empfundenen Arbeitsbelastung.

8.3. Verteilung der visuellen Aufmerksamkeit

*Welchen Einfluss hat eine Haptic Torque-Protection auf die Verteilung der **visuellen Aufmerksamkeit** von Piloten?*

Mittels Messung der Blickbewegung konnte in einer Simulatorstudie, Studie 3, siehe Abschnitt 7, mit

drei Piloten gezeigt werden, dass die Piloten mit einem *Tactile Cue*, welches die Torquelimits darstellt, mehr nach draußen und weniger auf die Anzeigen schauten. In den Flugphasen in Bodennähe konnten sie fast vollständig nach draußen schauen, während dies ohne *Tactile Cue* nur etwa für insgesamt die Hälfte der Dauer dieser Phase möglich war. In der Steigphase des Manövers war dieser Effekt deutlich kleiner. Dies ist wahrscheinlich darauf zurückzuführen, dass es hier erforderlich wurde, andere Informationen von den Cockpit-Displays abzulesen, die nicht mittels *Tactile Cue* dargestellt wurden, wie etwa die Geschwindigkeit. Dies wird in Abschnitt 7.3.3 ausführlich beschrieben.

Eine Übertragbarkeit der hier für die *Haptic Torque-Protection* gezeigten Verlagerung visueller zu haptischer Perzeption auf andere Anzeigen oder Limits erscheint wahrscheinlich, wenn der Systemzusammenhang ähnlich dem hier betrachteten ist. Der Zusammenhang zwischen Steuerung und Torque ist quasi-proportional und stark gedämpft, d.h. ohne Überschwungstendenz, siehe Abschnitt 4.4. Damit bewegt sich das *Tactile Cue* selbst relativ wenig und relativ langsam. Es ist damit für den Piloten erwartbar immer an der gleichen Steuerposition anzutreffen und somit eindeutig zuzuordnen. Bei anderen *Tactile Cueing*-Funktionen mit einer anderen Übertragungsfunktion, bzw. Ordnung, kann die Dynamik des *Tactile Cues* am Steuer anders sein. Dabei könnte sich das *Tactile Cue* stärker bewegen, seine Position wechseln und situationsabhängig auch ganz verschwinden. Dies könnte die Zuordnung des *Tactile Cues* zu seiner Quelle, etwa dem zugehörigen Limit, für die Piloten erschweren. Dadurch werden sie wahrscheinlich unwillkürlich auf die Anzeigen schauen, um zu versuchen weitere Informationen zur Ursache des *Tactile Cues* zu bekommen. Es wäre dann also wichtig, die *Tactile Cues* so verständlich zu gestalten, dass ein Pilot möglichst wenig auf die Anzeigen schauen muss, insbesondere dann, wenn es mehrere *Tactile Cueing*-Funktionen für unterschiedliche Aufgaben gibt. Ein solcher Effekt wäre wissenschaftlich zu untersuchen, siehe Abschnitt 8.6.

Allgemein ist zu vermuten, dass das Potential durch eine *Haptic Torque-Protection* die visuelle Aufmerksamkeit außerhalb des Cockpits zu erhöhen, von der Flugaufgabe abhängt. Dabei dürften die gleichen Zusammenhänge gelten, wie schon in der Diskussion der Arbeitsbelastung genannt, Abschnitt 8.2. Je dichter, länger und häufiger am Leistungslimit operiert wird, desto besser zeigt die *Haptic Torque-Protection* gegenüber der Referenzkonfiguration ohne *Tactile Cueing* ihr Potential, die visuelle Aufmerksamkeit der Piloten für das Monitoring der Außenwelt zu erhöhen.

8.4. Kräfte

Welche **Kräfte** bringen Piloten bei der Interaktion mit *Tactile Cues* auf?

Es sollte bestimmt werden, welche Kräfte Piloten bei der Interaktion mit einem *Softstop* naiv aufbringen, d.h. ohne dass sie aus Rücksicht vor einer versehentlichen Überschreitung Vorsicht walten lassen müssen. Dazu wurde die Kraftschwelle des *Softstops* mit 50 N ausreichend kräftig eingestellt.

In zwei von drei im Rahmen dieser Arbeit durchgeführten Studien, Studie 1 (Abschnitt 5) und Studie 2 (Abschnitt 7), mit insgesamt sechs Piloten,² wurden die Interaktionskräfte am *Tactile Cue* während

²Ein Pilot hat an beiden Studien teilgenommen, so dass es insgesamt sieben Datensätze gibt.

insgesamt drei unterschiedlicher Manöver im Flugsimulator aufgezeichnet und ausgewertet. Ein Pilot hat den Versuch aus Studie 1 zusätzlich auch im Forschungshubschrauber ACT/FHS wiederholt. Die Piloten hatten in allen Flugmanövern, in denen ein *Tactile Cue* aktiv war, die Aufgabe, den Stick an den *Softstop* zu führen und permanent Kontakt zu halten. Zur Stimulation möglichst hoher Kräfte wurden in die Bedingungen variiert und die Piloten etwa zu aggressiven Eingaben angehalten, Notsituationen eingespielt und zusätzliche Kraftschwellen aktiviert. Die Ergebnisse beider Studien werden hier nachfolgend zusammengefasst.

Es fiel auf, dass die Kräfte während der etwa 13 bis 53 s dauernden Flugmanöver variierten. Außerdem traten in folgenden Situationen Kraftspitzen, eng. *Peaks*, auf: a) Wenn der Stick in das *Stop-Cue* gezogen wurde und b) wenn sich das *Tactile Cue*, getriggert durch den Wechsel zu einem niedrigeren Torquelimit nach unten, d.h. gegen die Hand bewegte. Diese *Peaks* lagen meist erkennbar oberhalb der Haltekraft. Es traten allerdings nicht immer *Peaks* auf. Zudem zeigte sich, dass sich auch die Kraftniveaus zwischen den Piloten unterschieden.

Die Maxima aller aufgebrauchten Kräfte variierten über alle Piloten, Manöver und Konfigurationen zwischen 8 und 28 N. Die Haltekraften waren geringer und variierten über alle Piloten und Manöver zwischen 7 und 18 N. Ein Versuchsdurchlauf konnte in dem realen Hubschrauber ACT/FHS von einem der Piloten, der den Versuch bereits im Flugsimulator geflogen war, wiederholt werden. Dabei wandte dieser Pilot im ACT/FHS mit max. 18 N um 7 N höhere Kräfte auf als im Flugsimulator, wo er maximal 11 N aufgewandt hatte.

Die ermittelten Werte liegen in dem aus Literaturwerten ermittelten Wertebereich zwischen einer Mindestkraft von 20 N gegen versehentliches Überschreiten und einer maximalen Kraft von 44 N, zur Erfüllung des Level 1 Flugeigenschaftskriteriums, siehe Abbildung 2.3 in Abschnitt 2.3.

Im Sinne der anzustrebenden Minimierung der Betätigungskräfte, siehe Abschnitt 1.2.2, stellt sich die Frage, ob die maximal aufgebrauchte Pilotenkraft von ca. 30 N repräsentativ für die Grundgesamtheit der Piloten ist und eine Kraftschwelle dieser Höhe allgemein die unbeabsichtigten Überschreitung des *Softstops* verhindern kann. Diese Frage kann wegen der relativ kleinen Stichprobe von sechs unterschiedlichen Piloten nicht abschließend beantwortet werden.

Es ist jedoch anzunehmen, dass eine Schwelle in der genannten Höhe in jedem Fall wahrnehmbar ist. Selbst wenn es zu einer versehentlichen Überschreitung des *Softstops* kommen sollte, würde der Pilot dies aufgrund der anhaltenden Gegenkraft bemerken und könnte dieser schnell nachgeben. Die unabsichtliche Überschreitung des *Softstops* würde also nur kurz bestehen, wahrscheinlich nur für Sekundenbruchteile. Im Falle der *Haptic Torque-Protection* dürfte solch eine Überschreitung aufgrund der stark gedämpften Torqueantwort sogar tolerabel sein. Allgemein könnte man formulieren: Je träger das System reagiert, desto höher und länger darf eine transiente, d.h. vorübergehende Überschreitung der Stop-Position sein, ohne dass auch das zugehörige Limit überschritten wird, siehe auch Abschnitt 5.3.3. Bei einer gutmütigen Systemantwort ließe sich die Kraftschwelle dann sogar bis auf das Niveau der ermittelten Haltekraft reduzieren, das hier bei etwa 20 N liegt. Eine versehentliche Überschreitung dieser Kraftschwelle dürfte schnell bemerkt und korrigiert werden. Zudem ließe sich die Überschreitung durch zusätzliche *Tactile Cues* noch leichter bemerkbar machen, siehe unten.

Die Kraftwerte wurden bisher, in dieser Arbeit wie auch in der Literatur, unter der Anforderung ermittelt, das Minimum zur Vermeidung einer versehentlichen Überschreitung zu ermitteln. Auf der anderen Seite muss aber auch ein willentliche Überschreitbarkeit bei Beibehaltung der Steuerbarkeit gegeben sein. Aus der Literatur wurde ein maximaler Kraftwert von 44 N für das Kollektivsteuer für gute Flugeigenschaften angegeben. Dabei wird aber nicht deutlich, wie lange diese Kraft aufgebracht werden kann. Zwar besteht grundsätzlich die Möglichkeit, ein *Tactile Cue* bei Bedarf durch einen Schalter zu deaktivieren, etwa wenn es zu anstrengend wird. Es ist aber schon aus technischen Erwägungen vorzuziehen, eine Lösung zu finden, bei welcher keine zusätzlichen Schalter erforderlich sind. Idealerweise sollten dazu die in dieser Arbeit gefundenen Schwellwerte daraufhin untersucht werden, ob sie ausreichend lange überschritten werden können und die Steuerbarkeit dabei gegeben ist.

8.5. Systemakzeptanz und nützliche *Tactile Cueing*-Ausprägungen

Wie ist die **Pilotenakzeptanz**? Welche **Ausprägungen** von *Tactile Cues* erweisen sich als nützlich?

In den drei Teilstudien dieser Arbeit wurden von den insgesamt 22 teilnehmenden Piloten auch subjektive Aspekte, wie die Systemakzeptanz einer *Haptic Torque-Protection* im Allgemeinen und die Nützlichkeit einzelner Ausprägungen der verwendeten *Tactile Cue*-Designs bewertet. In Studie 2, Abschnitt 6.3, und Studie 3, Abschnitt 7.3.5, wurde explizit die Pilotenakzeptanz eines Systems für die *Haptic Torque-Protection* abgefragt. Dabei wurden die Piloten auch nach Merkmalen der verwendeten *Tactile Cues* befragt. Der Schwerpunkt in Studie 2 lag zudem auf der Akzeptanzbewertung geeigneter *Tactile Cues* für die Darstellung eines Betriebsbereichs, der zeitlich befristet genutzt werden darf, hier Info-Bereich oder „gelber Bereich“ genannt. In allen drei Studien wurden zudem Pilotenkommentare erfasst. Zudem lässt sich die Eignung einiger Ausprägungen auch unter objektiven Gesichtspunkten bewerten.

Grundsätzlich erfährt die *Haptic Torque-Protection* über alle Studien hinweg eine sehr hohe Systemakzeptanz. Dies zeigte eindrücklich die Bewertung mittels standardisierter Bewertungsschema zur Systemakzeptanz nach VAN DER LAAN, JINKE ET AL., siehe Abschnitte 6.3.3 und 7.3.5. Demnach halten alle Piloten die *Haptic Torque-Protection* für nützlich und wünschenswert. Zudem waren die während der Versuche und während der Debriefings von den teilnehmenden Piloten geäußerten Kommentare in allen Studien ausnahmslos positiv. Die Bewertung einzelner Ausprägungen war hingegen differenzierter, siehe unten.

Die Erkenntnisse und neu entstandenen Fragen der Detailbewertung in Bezug auf die formulierten Anforderungen, siehe Abschnitt 4.1, kurz „Stoppen und Führen am Limit“ und „Informieren über den Betriebsbereich“ können hier folgendermaßen zusammengefasst werden.

Als *Tactile Cue* zum Stoppen und Führen des Sticks an der mit dem Torquelimit korrespondierenden Steuerposition wurde in allen Studien ein *Softstop* verwendet, d.h. eine lokale Kraftschwelle, deren

Gradient bzw. Steifigkeit sich zwischen den Studien unterschied. Grundsätzlich geht aus den Pilotenkommentaren keine Präferenz hervor, wobei kein expliziter Vergleich vorgenommen worden ist. Allerdings gibt es quantitative Gesichtspunkte, die einen Einfluss auf die erreichbare Präzision haben:

Dadurch, dass die Pilotenkräfte beim Kontakthalten mit dem *Softstop* variieren, siehe oben, führt ein endlicher Gradient dazu, dass der Stick nicht genau auf der erforderlichen Steuerposition steht. Stattdessen ergibt sich ein Ungenauigkeitsbereich. Dieser wirkt sich negativ auf die Präzision der *Haptic Torque-Protection* aus. Die Größe dieses Bereichs hängt von der Kraftvariation ab und scheint proportional zum Kehrwert des *Softstop*-Gradienten zu sein, Studie 1. Um die Präzision zu erhöhen wurde das *Tactile Cueing*-Design des *Stop-Cues* in Studie 3 verändert. Dabei wurde versucht, unter Verwendung der *Hardstop*-Funktion des aktiven Sidesticks einen besonders steifen Gradienten zu verwirklichen. Weil die herstellerseitige Implementierung der *Hardstop*-Funktion auf der verwendeten Sidestickhardware keine Führung, bzw. Verschiebung in Richtung niedrigerer Positionswerte ermöglichte, wurde zusätzlich ein *Softstop* verwendet, siehe Abschnitt 7.1. Auch diese Ausprägung konnte die Überschreitung wirksam vermeiden, siehe Abschnitt 8.1. Die Präzision des *Tactile Cues* liegt dabei in der Größenordnung der vorher verwendeten *Softstops*. Aber es kann wegen der genannten Einschränkungen abschließend keine Aussage darüber getroffen werden, wie ein „unendlich steifer“ *Softstop* zu bewerten wäre. Für die weitere Forschung wäre es wünschenswert, dass das aktive Steuerorgan über solch einen Element verfügt.

Neben dem „roten Limit“ wurde auch für den „gelben Bereich“ eine haptische Repräsentation gesucht. Diese hatte den Zweck darüber zu informieren, dass in diesem Bereich operiert wird. Dazu wurden unterschiedliche Ausprägungen entworfen und subjektiv bewertet, siehe Abschnitte 6.1 (Studie 2) und 7.1 (Studie 3). Darunter waren eine Reibungsstufe, eine Raste am Bereichsbeginn und letztlich eine Kombination aus beidem. Grundsätzlich lässt sich sagen, dass die meisten Piloten ein *Tactile Cue* für diesen Bereich für sinnvoll erachteten. Dabei bevorzugten die unterschiedlichen Piloten unterschiedliche Ausprägungen.

Die Reibungsstufe wurde von der Mehrzahl der Piloten als geeignet empfunden. Sie wurde neben ihrer Funktion zur Bereichsdarstellung auch als „Vorstopper“ wahrgenommen, um damit den Stick bereits vor Erreichen des *Stop-Cues* abzubremesen. Es fiel jedoch auf, dass die Steuerkräfte beim Halten des Steuers am *Softstop* manchmal unter das Niveau der Reibungsstufe fallen. Damit besteht die Gefahr, dass die Piloten nicht merken, wenn sich der *Softstop* wegbewegt und damit, im Glauben, das Steuer befände sich noch am *Stop-Cue*, die zur Verfügung stehende Leistung nicht voll ausschöpfen. Es ist zudem nicht möglich, bei einer konstanten Reibungskraft auf die Position innerhalb des Bereichs zu schließen. Das kann bei kurzen Bereichen vernachlässigt werden. Wenn dies aber gewünscht ist, sollte ein Gradient verwendet werden.

Bei der Raste ist von Vorteil, dass sie deutlich den Übergang in den Bereich hinein und aus dem Bereich heraus zeigt. Sie kann daher gut in Kombination mit einem *Tactile Cue* zur Bereichsdarstellung verwendet werden. Es ist jedoch nachteilig, wenn sie, wie in der hier zunächst genutzten Realisierung, aufgrund technischer Restriktionen, eine große Randwirkung hat, also den Stick bereits ininigem Abstand in ihr Zentrum „zieht“. Zur Eliminierung dieser Randwirkung, wurde sie später als durch einen sehr kurz aktivierten *Stickshaker* realisiert. Dies wurde von den Piloten als Raste wahrgenommen. Dies zeigt beispielhaft die Möglichkeiten aktiver Steuerorgane, *Tactile*

Cues zu generieren, die über das Reproduzieren mechanischer Ersatzsysteme hinausgehen. Um diese Freiheiten bei zukünftigen *Tactile Cue*-Designs nutzen und neue Ausprägungen entwickeln zu können, ist es von Vorteil, Zugriff auf die interne Regelung der aktiven Sidesticks zu bekommen.

8.6. Ausblick

Nachfolgend wird dargestellt, auf welche Bereiche sich die Ergebnisse übertragen lassen und welche Fragen offen geblieben, bzw. neu dazugekommen sind.

8.6.1. Die *Haptic Torque-Protection* in anderen Flugphasen

In dieser Arbeit konnte gezeigt werden, dass eine *Haptic Torque-Protection* nützlich für den Startvorgang, bzw. Steigflug ist, weil sie die Arbeitsbelastung reduziert und den Piloten ermöglicht, weniger auf die Instrumente schauen zu müssen und länger nach draußen schauen zu können, als ohne. Es ist zu erwarten, dass sich diese Vorteile auch für anderen Flugphasen zeigen. Grundsätzlich dürfte die Funktion in allen Situationen hilfreich sein, in denen der Hubschrauber a) nah am Leistungslimit und b) boden- und hindernisnah operiert und sich die Situation dynamisch verändert. In diesen Situationen ist der Pilot darauf angewiesen, ein stets aktuelles Bild der Außenwelt zu haben, weshalb er seine visuelle Aufmerksamkeit vor allem nach außen lenken möchte. Solche Situationen liegen, neben der in dieser Arbeit behandelten Startmanövern, auch bei der Landung, beim Bodenkonturflug oder bei der Luftarbeit, etwa der Lastaufnahme im bergigen Gelände der Fall vor. Bei der Landung kommt hinzu, dass sich während des Fluges die Bedingungen derart verändern können, dass die zum Schweben benötigte Leistung höher ausfällt als beim Start. Das ist etwa dann der Fall, wenn Seitenwind dazukommt und damit mehr Leistung für den Heckrotor benötigt wird oder die Landung in großer Höhe erfolgt. Dies müsste der Pilot zunächst erkennen, seine Strategie anpassen, und z.B. eine Gleitlandung durchführen. Hubschrauberpiloten wissen zwar um diesen Umstand und prüfen die Leistungsreserve bei der Landung durch Ablesen der Anzeigen. Dabei ist ein ständiger Abgleich von Leistungsreserve, Fahrt- und Sinkrate erforderlich. Dadurch können sie wiederum in den Konflikt geraten, Instrumente und Außenwelt gleichzeitig überblicken zu müssen, um sowohl eine Kollision als auch eine Überschreitung des Torquelimits zu verhindern. Es sollte daher untersucht werden, ob und wie hilfreich eine *Haptic Torque-Protection* in diesen Situationen ist.

In dieser Arbeit wurden zudem erste Untersuchungen der *Haptic Torque-Protection* bei einseitigem Triebwerksausfall OEI vorgenommen, mit dem Fokus auf die dabei aufgewandten Pilotenkräften. Es ist zu erwarten, dass eine *Haptic Torque-Protection* gerade in der mit einem OEI einhergehenden Stresssituation hilfreich für den Piloten ist, die dann veränderten Torquelimits korrekt zu erfassen und einzuhalten. Die Limits verändern sich nicht nur im Moment des Triebwerksausfalls, sondern auch danach in relativ kurzen Zeitabständen in Richtung niedrigerer Werte. So gibt es ein 90-s-Limit und ein 2-min-Limit und schließlich ein kontinuierliches Limit (MCP). Es bietet sich an, diesen Fall im Zusammenhang mit sogenannten „CAT A“ Start- und Landeverfahren zu untersuchen. Diese

Verfahren geben Flugprofile vor, die der Pilot nach einem Triebwerksausfall abzufliegen hat. Sie unterscheiden sich, je nachdem, ob der Triebwerksausfall vor Erreichen, bzw. nach Durchschreiten eines sogenannten „Takeoff-Decision-Point“ oder „Landing-Decision-Point“ geschieht. In die OEI-Untersuchungsmanöver sollte schließlich auch die Landung bis zum Aufsetzen mit einbezogen werden. Denn bei OEI steht definitiv weniger Gesamtleistung als beim Start unter Normalbedingungen zur Verfügung, was sich erschwerend auf die Landung auswirken kann, wie oben bereits diskutiert. Alle oben genannten Untersuchungen lassen sich ohne weitere Veränderung der hier entwickelten Funktion und mit den verwendeten Untersuchungsmethoden und ohne Aufbau zusätzlicher, realer oder simulierter, Sichtreferenzen durchführen.

Darüber hinaus die *Haptic Torque-Protection* auch für Manöver erprobt und nötigenfalls optimiert werden, in denen die Steuerführung dynamischer ist, z.B. der Geländefolgeflug in der Hinderniskulisse, bei welchem im schnellen Wechsel Steig- und Sinkphasen aufeinander folgen. Dies ist etwa im Bodenkonturflug der Fall.

8.6.2. Die *Haptic Torque-Protection* für geregelte Hubschrauber

In dieser Arbeit konnte gezeigt werden, wie eine *Haptic Torque-Protection* für einen Hubschrauber mit direkter Kollektivsteuerung ausgelegt werden kann. Es ist zu erwarten, dass in zukünftigen fly-by-wire (fbw)-Hubschraubern auch Flugregler zum Einsatz kommen, die das Antwortverhalten auf Steuereingaben verändern. Das Steuerorgan dient in diesem Fall zur Vorgabe einer Führungsgröße für den Regler. Das bisherige Kollektivsteuer kommandiert dann eine Vertikalrate, d.h. die Steig-, bzw. Sinkrate des Hubschraubers. Der Torque wird somit nur noch mittelbar durch den Steuerausschlag beeinflusst. Weil der sich dabei einstellende stationäre Kollektivwinkel und damit auch der stationäre Torque proportional zur Steigrate sind, bleibt auch bei einem Vertikalratenkommando die proportionale Zuordnung von Pilotensteuer und stationärem Torque erhalten. Jedoch ist zu erwarten, dass es zusätzlich einen differentiellen Anteil gibt, also eine Abhängigkeit des Torques von der Steuerrate. Dies würde zu einem zur Steuerrate proportionalen Überschwinger führen. Es sollte daher untersucht werden, ob und wie sich die in dieser Arbeit beschriebene *Haptic Torque-Protection* modifizieren lässt, um diese Überschwinger zu vermeiden. So ist es denkbar, das *Tactile Cueing* um eine Ratenbegrenzung zu erweitern, welche den Überschwinger auf ein tolerables Niveau beschränkt wird. Zur Auslegung und Bewertung dieser, dann nicht mehr als rein proportional klassifizierbaren, *Tactile Cue*-Funktionen sollten dynamische Manöver genutzt werden, welche mehr Steueraktivität, bzw. wiederholte Interaktion mit dem *Tactile Cue* erfordern. Dabei könnte auch ein Vergleich mit einem alternativen Ansatz erfolgen, bei dem die Ratenlimitierung innerhalb des Reglers passiert und nur das stationäre Steigratenlimit per *Tactile Cue* dargestellt wird. In diesem Fall würde sich das *Tactile Cue* weniger stark bewegen, was in Vorstudien als günstig erachtet wurde. Jedoch bliebe die Ratenlimitierung dann durch den Piloten unbemerkt. Grundsätzlich wird erwartet, dass auch fbw-Systeme von einer *Haptic Torque-Protection* profitieren. Die dazu erforderlichen Anpassungen sind Gegenstand weiterer Forschung.

8.6.3. *Tactile Cueing*-Formen und Kräfte

In dieser Arbeit wurden Kräfte und Formen für *Tactile Cues* identifiziert, bzw. bewertet, welche das versehentliche Überschreiten erfolgreich vermeiden. Gemäß des o.g. Paradigmas sollte ein *Tactile Cueing* zur Vermeidung einer versehentlichen Limit-Überschreitung aber das absichtliche Überschreiten durch den Piloten zulassen. Die Erfahrungen in den Simulatorversuchen lassen vermuten, dass ein Schwellwert von etwa 30 N absichtlich problemlos überschritten werden könnte. Es fehlt aber noch der praktische Nachweis, ob und wie lange dies im Bedarfsfall möglich ist und wie gut die Feinkontrolle bei der Bedienung der betroffenen Steuerachse beim Überschreiten und Halten der Schwellkraft ist. Letztlich entscheidet dies darüber, ob es eines Schalter zum Deaktivieren des *Softstops* bedarf. Alternativ sollten dazu auch Kombinationen von *Tactile Cue*-Ausprägungen entwickelt und untersucht werden, welche zur Vermeidung einer transienten Überschreitung im Moment der Kontaktaufnahme eine höhere Kraftschwelle besitzen, die dann nach zum Halten und Führen auf ein geringeres und bei Bedarf leichter zu überschreitendes Niveau reduziert wird.

Ein für die *Haptic Torque-Protection* plausibles Testmanöver könnte z.B. in der o.g. Landung bei zu geringer Torque-Marge bestehen, etwa durch veränderte atmosphärische Bedingungen oder nach einem OEI-Fall. Dabei könnte sich der Pilot dazu entschließen, das Torquelimit absichtlich zu überschreiten, um eine sichere Landung auf Kosten eines (weiteren) Triebwerkschadens zu gewährleisten und den Hubschrauber, wie bei einer Autorotationslandung, unter Nutzung der Rotationsenergie des Hauptrotors sicher abzufangen.

In der Arbeit wurden unterschiedliche Varianten von *Stop-Cues* in Bezug auf die erreichte Präzision untersucht. Der Einfluss des *Softstop*-Gradienten auf die Präzision sollte in zukünftigen Studien weiter untersucht werden. Eine weitere Möglichkeit zur Erhöhung der Präzision könnte auch darin bestehen, einen spürbaren „Knick“ in der Kraft-Weg-Kennlinie des *Softstop* genau auf der Position zu platzieren, an welcher der Pilot den Stick halten soll.³

Wenn weitere Funktionen für das *Tactile Cueing* hinzukommen, d.h. mehr *Tactile Cueing*-Funktionen gleichzeitig aktiv sein sollen, muss untersucht werden, ob der Pilot diese korrekt zuordnen und interpretieren kann. In dieser Arbeit konnten die Piloten zwei unterschiedliche *Tactile Cues* auf derselben Steuerachse des aktiven Sidesticks, eines für den Torque-Info-Bereich und eines für das Torque-Limit, unterscheiden. Es ist noch nicht bekannt, wieviele Stufen von Kraftschwellen unterscheidbar sind und eindeutig zugeordnet werden können, bzw. wie weit diese auseinanderliegen müssen, damit dies möglich ist. Dabei muss berücksichtigt werden, dass der nutzbare Kraftbereich zwischen einer minimalen, d.h. gerade wahrnehmbaren Schwelle und einer maximalen, d.h. noch absichtlich überschreitbaren Schwelle begrenzt ist. Für die systematische, experimentelle Untersuchung stellt die sogenannte *Psychophysik* Methoden bereit. Diese beschäftigt sich mit der menschlichen Wahrnehmung und der Bestimmung von Wahrnehmbarkeitsschwellen und Unterscheidbarkeitsdifferenzen von Reizen auf die verschiedenen Sinnesmodalitäten. Die zukünftige Untersuchung von Kombinationsmöglichkeiten und Auslegung beinhaltet daher ein großes Potential für die Erweiterung der Einsatzmöglichkeiten von *Tactile Cueing*.

³Während der Dokumentation dieser Arbeit wurde eine Nachfolgestudie durchgeführt und veröffentlicht, in dem ein Stickshaker mit dem *Softstop* verglichen wurde [40, S.1 ff.] und [41, S.1 ff.]

8.6.4. Anforderungen an aktive Steuerorgane: Kraftreduktion und Programmierbarkeit

Aus den Untersuchungen können folgende Annahmen für die Spezifikation zukünftiger aktiver Sidesticks getroffen werden. Die hier maximal aufgetretenen Kräfte von 28 N lagen weit unterhalb der maximal aufbringbaren Kraft des verwendeten aktiven Sidesticks von 140 N, welche üblich ist für aktive Sidesticks. Dies lässt die Vermutung zu, dass aktive Steuerorgane deutlich weniger Kraft generieren können müssen und dadurch leichter und kleiner gebaut werden könnten, wodurch sie sich leichter in ein Cockpit integrieren lassen würden. Dies sollte in zukünftigen Studien, auch für andere Steuerachsen untersucht und das Reduktionspotential ermittelt werden.

Die auf der hier verwendeten Hardware implementierten *Tactile Cueing*-Formen, wie etwa der *Hardstop*, waren zwar grundsätzlich geeignet zur Demonstration und Untersuchung des Potentials von *Tactile Cueing*, sollten aber noch besser an die beabsichtigte Funktion zugeschnitten werden. Hier bestand z.B. das Problem, dass der *Hardstop* das Steuer zwar stoppen konnte, aber nicht geeignet war den Stick nach unten zu verschieben. Dazu war eine relativ aufwändige Kombination, bzw. Improvisation mit anderen *Tactile Cueing*-Elementen erforderlich. Dies erfordert ein Umdenken bei der Spezifikation von *Tactile Cueing*-Formen. Bisher orientierte man sich an passiven mechanischen Ersatzsystemen, wie etwa (vorgespannten) Federn, Rasten oder Dämpfern und versuchte diese nachzuahmen. Besser wäre es, sich davon zu lösen und die Vorteile eines frei programmierbaren, digitalen Systems zu nutzen und dazu die Intention und den erwünschten Eindruck des *Tactile Cue*-Elements zu spezifizieren und umzusetzen. Zum Beispiel ließe sich, wie in dieser Arbeit gezeigt wurde, der gewünschte „Eindruck einer Raste an Position xy“ besser mit einer aktiven Bewegung des Sticks, bzw. einer Vibration, darstellen als mit einer Kraft-Weg-Kennlinie. Der Stick sollte diese *Effekte* als fertige *Tactile Cues* bereitstellen, etwa zur „zur Vermeidung einer unabsichtlicher Überschreitung und Führung“. Neben diesen Beispielen, die aus der konkreten Anwendung in dieser Arbeit stammen, ergeben sich wahrscheinlich weitere Anforderungen für neue Anwendungen bei ihrer Umsetzung. Für die zukünftige Entwicklung und Untersuchung von *Tactile Cues* ist es daher unbedingt erstrebenswert, dass Applikationsentwickler die benötigten *Tactile Cueing*-Ausprägungen auf der Hardware selbst programmieren können, anstatt wie aktuell, nur auf einen Vorrat konfigurierbarer bestehender Funktionen zurückgreifen zu können.

8.6.5. Aktive Steuerorgane für multimodales Cueing und bidirektionale Kommunikation

Diese Arbeit konnte die Wirksamkeit und den Nutzen von *Tactile Cueing* für die Sicherheit, die Verlagerung der visuellen Aufmerksamkeit auf die Außenwelt und die Reduktion der Pilotenarbeitsbelastung anschaulich anhand von Simulatoruntersuchungen und eines Flugexperiments zeigen. Alle teilnehmenden Piloten waren dieser Technologie gegenüber aufgeschlossen und einige wünschten, sie bald im Hubschrauber nutzen zu können. Die Tatsache, dass *Tactile Cueing* mit aktiven Steuerorganen nach und nach in mehr Hubschraubern verfügbar gemacht wird, zeigt die Relevanz dieser Technologie auch aus Herstellersicht. Der Forschungsbedarf verlagert sich nun von der Betrachtung aktiver Steuer und *Tactile Cueing* als isolierte Technologie hin zu einem integrierten Subsystem, das mit den anderen Cueing Systemen abgestimmt für „multimodales Cueing“ verwendet wird [50, S. 10-13]. Dabei zeigen aktuelle Forschungsarbeiten das Potential als bidirek-

tionales, haptisches Kommunikationsmedium für die kooperative Führung von hochautomatisierten Systemen. Ermöglicht wird dies durch die Fähigkeit aktiver Steuerorgane, Kraft(-messung) und Bewegung zu entkoppeln und gleichzeitig Kräfte und Steuerbewegung modulieren zu können, siehe Abschnitt 1.1.1.

Die Herausforderung liegt nun in der Gesamtsystembetrachtung und der Verknüpfung der Einzelsysteme zu einem wirksamen und widerspruchsfreien Ganzen, das besser ist als die Summe seiner Teile. Zur Evaluation solcher Gesamtsysteme lassen sich die in dieser Arbeit gezeigten Methoden der nutzerzentrierten Entwicklung über mehrere Iterationen einschließlich Untersuchung der Systemakzeptanz sehr gut einsetzen. Insbesondere die Blickbewegungsmessung, die sich erstmals in dieser Arbeit als wertvolles Instrument für die Bewertung von *Tactile Cueing* erwiesen hat, dürfte detaillierte „Einblicke“ in die Mensch-Maschine-Interaktion mit multimodaler Pilotenassistenz ermöglichen.

Literaturverzeichnis

- [1] MÜLLHÄUSER, Mario ; LEISSLING, Dirk: Development and Inflight-Evaluation of a Haptic Torque Protection Corresponding with the First Limit Indicator Gauge. In: *American Helicopter Society 69th Annual Forum Proceedings*. Phoenix (AZ), 2013
- [2] MÜLLHÄUSER, Mario ; LEISSLING, Dirk: Development and In-Flight Evaluation of a Haptic Torque Protection. In: *Journal of the American Helicopter Society* 64 (2019), Januar, Nr. 1, 1–9. <http://dx.doi.org/10.4050/JAHS.64.012003>. – DOI 10.4050/JAHS.64.012003
- [3] MÜLLHÄUSER, Mario: Effect of a Haptic Torque Protection with an Active Sidestick on Pilot's Eyes-Out Capability During a Helicopter Takeoff. In: *Proceedings of the 49th European Rotorcraft Forum*. Bückeburg, GE, September 2023
- [4] DÖGOW, Roger: *Zuarbeit Auflistung Potentieller Limits (2.1.1 Gem. LuFo IV-4), AP 2.1 Tactile Cueing*. Lübeck/Braunschweig : Fachhochschule Lübeck, DLR Braunschweig, 2012
- [5] DÖGOW, Roger: *Erhebung von realistischen Hindernisszenarien und Pilotenerwartung für ein Haptisches Hinderniswarnsystem sowie 3D-Darstellung der Szenarien für den Simulator: Projektarbeit*. Lübeck and Braunschweig : Fachhochschule Lübeck, DLR Braunschweig, 2013
- [6] DÖGOW, Roger: *Explorative Simulatorstudie zur Ermittlung Geeigneter Haptischer Kräfte an Aktiven Steuern für Ausgewählte Hubschrauber-Assistenzsysteme: Bachelorarbeit*. Lübeck and Braunschweig : Fachhochschule Lübeck, DLR Braunschweig, 2015
- [7] MÜLLHÄUSER, Mario: LuFo IV SiRaSKoF-H DLR : Ermittlung des Spektrums der taktilen Flugassistentenfunktionen für Hubschrauber und Implementierung eines haptischen Vokabulars : Schlussbericht Berichtszeitraum: 01.01.2012-31.12.2015. Version: 2016. <http://dx.doi.org/10.2314/GBV:870930214>. Braunschweig : Deutsches Zentrum für Luft- und Raumfahrt e.V. , Institut für Flugsystemtechnik, 2016. – Forschungsbericht
- [8] MÜLLHÄUSER, Mario ; WALKO, Christian: *US-German PA ATR Aufgabe 1: Haptische Pilotenunterstützung mittels Aktiver Steuerorgane - BAAINBw Fortschrittliche Technologien für Drehflügler: EIL2DN/FA489/EF008 - Abschlussbericht (2015-2017)*. Braunschweig, 2017 (DLR-IB-FT-BS-2017-222). <https://elib.dlr.de/115844/>
- [9] KRAUTER, Ralf: *Kleine Klappe, Große Wirkung: Ingenieure Entwickeln Hubschrauber mit neuem Dreh*. Deutschlandfunk (Köln), 12.08.2007 · 16:30 Uhr (Wissenschaft Im Brennpunkt). <http://www.dradio.de/dlf/sendungen/wib/653914/>

- [10] EUROPEAN HELICOPTER SAFETY TEAM (EHST) ; EUROPEAN AVIATION SAFETY AGENCY (EASA) (Hrsg.): *Final Report - EHST Analysis of 2000-2005 European Helicopter Accidents: ISBN 92-9210-095-7*. Köln, Germany, 2010 <https://www.easa.europa.eu/en/downloads/44242/en>
- [11] EUROPEAN AVIATION SAFETY AGENCY (EASA): *Annual Safety Review 2021*. LU : Publications Office, 2021 <https://data.europa.eu/doi/10.2822/071257>
- [12] COUCH, Mark ; LINDELL, Dennis: Study on Rotorcraft Safety and Survivability. In: *American Helicopter Society 66th Annual Forum Proceedings*, 2010
- [13] MASSEY, C. P. ; WELLS, P.: Helicopter Carefree Handling Systems. In: *Royal Aeronautical Society Conference on Helicopter Handling Qualities and Control*. London, UK : Royal Aeronautical Society, 1988
- [14] Pilot Warning Device. In: *Aviation Week* (1949), Oktober
- [15] *Stick Shaker*. 2022 https://en.wikipedia.org/wiki/Stick_shaker
- [16] MCCLELLAN, J. M.: Bell 430. In: *Flying Magazine* (2001), März
- [17] MCGRATH, Braden ; COX, Jeffrey ; MCKAY, Joe ; RUPERT, Angus: Mission Utility of a Tactile Display in Rotary Wing Operations. In: *American Helicopter Society 71th Annual Forum Proceedings*. Virginia Beach (VA), Mai 2015
- [18] MCGRATH, Braden ; RUPERT, Angus ; GANESWARAN, Ganen ; BARZINJY, Hakar: Tactile Cueing System for Degraded Visual Environments. In: *American Helicopter Society 74th Annual Forum Proceedings*. Phoenix (AZ), 2018
- [19] ALBERY, William B.: Multisensory Cueing for Enhancing Orientation Information during Flight. In: *Aviation Space and Environmental Medicine* 78 (2007), Nr. 5, S. B186–B190
- [20] WHALLEY, Matthew S. ; HINDSON, William S. ; THIERS, George G.: A Comparison of Active Sidestick and Conventional Inceptors for Helicopter Flight Envelope Tactile Cueing. In: *American Helicopter Society 56th Annual Forum Proceedings*. Virginia Beach (VA), Mai 2000
- [21] HOWITT, J.: Carefree Manoeuvring in Helicopter Flight Control. In: *American Helicopter Society 51st Annual Forum Proceedings*. Fort Worth, TX, Mai 1995
- [22] WHALLEY, Matthew S. ; ACHACHE, Marc: Joint U.S./France Investigation of Helicopter Flight Envelope Limit Cueing. In: *American Helicopter Society 52nd Annual Forum Proceedings*. Washington (DC), 1996
- [23] BATEMAN, Alec ; WARD, David ; BARRON, Roger ; WHALLEY, Matthew: Piloted Simulation Evaluation of a Neural Network Limit Avoidance System for Rotorcraft. In: *24th Atmospheric Flight Mechanics Conference*, 1999

- [24] AUGUSTIN, M. J. ; DREIER, M. ; YEARY, R. D. ; ERDOS, R. ; GUBBELS, A. ; DAMIN, M. ; WHALLEY, M.: Development and Flight Demonstration of a HUMS-Based Helicopter Limit Cueing (HLC) System. In: *American Helicopter Society 58th Annual Forum Proceedings*. Montreal (Canada), Juni 2002
- [25] EINTHOVEN, Pieter G. ; MILLER, David G.: The HACT Vertical Controller. In: *American Helicopter Society 58th Annual Forum Proceedings*. Montreal (Canada), 2002
- [26] SAHANI, Nilesch A. ; HORN, Joseph F.: Collective Axis Cueing and Limit Avoidance Algorithms for Carefree Maneuvering. In: *American Helicopter Society Flight Controls and Crew System Design Specialists' Meeting*. Philadelphia (PA), 2002
- [27] SAHASRABUDHE, Vineet ; SPAULDING, Robert ; FAYNBERG, Alexander ; HORN, Joe ; SAHANI, Nilesch: Simulation Investigation of a Comprehensive Collective-Axis Tactile Cueing System. In: *American Helicopter Society 58th Annual Forum Proceedings*. Montreal, Canada, Juni 2002
- [28] BUCHANAN, Rod ; CHARLTON, Malcolm T. ; HALSEY, Kieran M. ; HASWELL, John R. ; HOWITT, J.: Intelligent Flight Path Guidance. In: *American Helicopter Society 61th Annual Forum Proceedings*, 2005
- [29] KING, David W. ; BIANCO-MENGOTTI, Riccardo ; FORTENBAUGH, R.L ; SCHAEFFER, Joseph M.: A Systems Engineering Approach to Carefree Maneuvering in the BA609. In: *American Helicopter Society 61th Annual Forum Proceedings*, 2005, S. 160–181
- [30] GREENFIELD, Aaron ; KUBIK, Stephen ; FAYNBERG, Alexander ; LITWIN, Jonathan ; MARZELLA, Steven ; SAHASRABUDHE, Vineet ; RUCCI, John ; CORRY, Christiaan ; MCCULLEY, Steve ; PAVELKA, Ed ; RHINEHART, Matthew ; ROARK, Sean ; FLETCHER, Jay W. ; OTT, Carl R.: CH-53K Control Law Risk Reduction Flight Testing on the RASCAL UH-60a In-Flight Simulator. In: *American Helicopter Society 68th Annual Forum Proceedings*. Fort Worth (TX), Mai 2012
- [31] LANTZSCH, Robin ; GREISER, Steffen ; WOLFRAM, Jens ; WARTMANN, Johannes ; MÜLLHÄUSER, Mario ; LÜKEN, Thomas ; DÖHLER, Hans-Ullrich ; PEINECKE, Niklas: ALLFlight: A Full Scale Pilot Assistance Test Environment. In: *American Helicopter Society 68th Annual Forum Proceedings*. Fort Worth (TX), 2012
- [32] GREISER, Steffen ; LANTZSCH, Robin ; WOLFRAM, Jens ; WARTMANN, Johannes ; MÜLLHÄUSER, Mario ; LÜKEN, Thomas ; DÖHLER, Hans-Ullrich ; PEINECKE, Niklas: Results of the Pilot Assistance System "Assisted Low-Level Flight and Landing on Unprepared Landing Sites" Obtained with the ACT/FHS Research Rotorcraft. In: *Aerospace Science and Technology* 45 (2015), S. 215–227
- [33] ENNS, Russel ; DRYFOOS, James ; LUKES, George ; HAYES, Pam ; KASHAWLIC, Bryan: Adaptive Vehicle Management Systems Phase I Overview. In: *American Helicopter Society 69th Annual Forum Proceedings*. Phoenix (AZ), Mai 2013
- [34] SUNG K. KIM ; BOTHWELL, Mike ; FORTENBAUGH, R.L: The Bell 525 Relentless, The World's

- First "Next Generation" Fly-by-Wire Commercial Helicopter. In: *American Helicopter Society 70th Annual Forum Proceedings*. Montréal/Québec, Canada, Mai 2014
- [35] HOELSCHER, Stephanie ; BOTHWELL, Mike: 525 Aircraft Zero, the Relentless Advanced Systems Integration Lab. In: *American Helicopter Society 71st Annual Forum Proceedings*. Virginia Beach (VA), Mai 2015
- [36] ENNS, Russel ; SEGNER, David ; DRYFOOS, James: Adaptive Vehicle Management Systems Program Phase II Overview. In: *American Helicopter Society 72th Annual Forum Proceedings*. West Palm Beach (FL), Mai 2016
- [37] KLEIN, Gary ; KASHAWLIC, Bryan ; ENNS, Russel: Design and Flight Test of an Adaptive Vehicle Management System on an AH-64 Helicopter Demonstrator. In: *American Helicopter Society 72th Annual Forum Proceedings*. West Palm Beach (FL), Mai 2016
- [38] KASHAWLIC, Bryan ; ENNS, Russel ; IRWIN, Joseph G. I. ; MOORE, Rucie: Carefree Maneuvering via Tactile Cueing Flight Demonstrations. In: *American Helicopter Society 72th Annual Forum Proceedings*. West Palm Beach (FL), 2016
- [39] FAYNBERG, Alex: *CH-53K: Improved Safety and Performance in the Degraded Visual Environment*. Dresden, 2019
- [40] MÜLLHÄUSER, Mario ; LUSARDI, Jeff: US-German Joint In-flight and Simulator Evaluation of Collective Tactile Cueing for Torque Limit Avoidance – Shaker vs. Soft Stop. In: *Vertical Flight Society's 76th Annual Forum & Technology Display*. online, Oktober 2020
- [41] MÜLLHÄUSER, Mario ; LUSARDI, Jeff: US-German Joint In-flight and Simulator Evaluation of Collective Tactile Cueing for Torque Limit Avoidance – Shaker vs. Soft Stop. In: *Journal of the American Helicopter Society* (2022)
- [42] DENICOLA, Lucia ; BELLUOMINI, Luca ; HAIDAR, Ahmad ; XIAO, Sid: Flight Test Validation of Thrust Axis Tactile Cueing System on AW609 Tiltrotor. In: *Vertical Flight Society 78th Annual Forum Proceedings*. Fort Worth, Texas : The Vertical Flight Society, Mai 2022, 1–11
- [43] MOORMAN, Robert W.: AW609 Coming to Fruition. In: *Vertiflite* (2017), Nr. May/June 2017
- [44] ABILDGAARD, Max: *Tactile Cueing for Vortex Ring State Avoidance*. Braunschweig, Germany, Technische Universität Braunschweig, Diss., 2013
- [45] ABILDGAARD, Max ; GRÜNHAGEN, Wolfgang v.: Demonstration of an Active Sidestick in the DLR Flying Helicopter Simulator (FHS). In: *34th European Rotorcraft Forum*, 2008
- [46] BINET, Laurent ; RAKOTOMAMONJY, Thomas: Using Haptic Feedbacks for Obstacle Avoidance in Helicopter Flight. In: *6th European Conference for Aeronautics and Space Sciences (Eucass)*. Krakow (PL), 2015

- [47] RAKOTOMAMONJY, Thomas ; BINET, Laurent ; MÜLLHÄUSER, Mario: ONERA-DLR Joint Research on Tactile Cueing for Reactive Obstacle Avoidance Dedicated to Low Speed Helicopter Maneuvers. In: *42nd European Rotorcraft Forum*. Lille (France), 2016
- [48] MÜLLHÄUSER, Mario: Tactile Cueing with Active Cyclic Stick for Helicopter Obstacle Avoidance: Development and Pilot Acceptance. In: *CEAS Aeronautical Journal* 4 (2017), Nr. 2, S. 27–37. <http://dx.doi.org/10.1007/s13272-017-0271-2>. – DOI 10.1007/s13272-017-0271-2. – ISSN 1869–5582
- [49] WALKO, Christian ; MÜLLHÄUSER, Mario: Design of a Haptic Obstacle Avoidance for Low Speed Helicopter Operations Using Active Sidesticks. In: *Proceedings of the 47th European Rotorcraft Forum*. online, September 2021
- [50] SCHMERWITZ, Sven ; DIKAREW, Alexej ; LAUDIEN, Tim ; ERNST, Johannes ; MÜLLHÄUSER, Mario: Investigating Multimodal Cueing Concept for Human-Machine Shared Control under Automatic Trajectory Following Low-Level Operation. In: *SPIE Defence + Commercial Sensing Conference*. Orlando, FL, 30.04.-04.05.2023
- [51] NONNENMACHER, Daniel ; MÜLLHÄUSER, Mario: Optimization of the Equivalent Mechanical Characteristics of Active Side Sticks for Piloting a Controlled Helicopter. In: *CEAS Aeronautical Journal* (2011). <http://dx.doi.org/10.1007/s13272-011-0022-8>. – DOI 10.1007/s13272-011-0022-8. – ISSN 1869–5582
- [52] SCHÖNENBERG, Thorben: *Flugeigenschaftskriterien zur Hubschraubersteuerung mit aktiven Sidesticks*. Braunschweig (Germany), Technische Universität Braunschweig, Diss., 2012
- [53] SCHÖNENBERG, Thorben: Development of Rotorcraft Handling Qualities Criteria Development of Rotorcraft Handling Qualities Criteria for Active Sidestick Force-Displacement Characteristics. In: *American Helicopter Society 69th Annual Forum Proceedings*. Phoenix (AZ), 2013
- [54] MALPICA, Carlos A. ; LUSARDI, Jeff: Handling Qualities Analysis of Active Inceptor Force-Feel Characteristics. In: *American Helicopter Society 69th Annual Forum Proceedings*. Phoenix (AZ), 2013
- [55] GRÜNHAGEN, Wolfgang v. ; MÜLLHÄUSER, Mario ; HÖFINGER, Marc ; LUSARDI, Jeff: In-Flight Evaluation of Active Sidestick Parameters With Respect to Handling Qualities For Rate Command and Attitude Command Response Types. In: *American Helicopter Society Handling Quality Specialists Meeting 2014*. Huntsville (AL), 2014
- [56] DOS SANTOS SAMPAIO, Rodolfo: *Influence of Variable Inceptor Coupling on Dual Pilot Helicopters Using Active Sidesticks*, Technische Universität Braunschweig, Diss., November 2018. <https://elib.dlr.de/125260/>
- [57] STIGTER, Sebastiaan de ; MULDER, M. ; VAN PAASSEN, M. M.: Design and Evaluation of a

- Haptic Flight Director. In: *AIAA Journal of Guidance, Control and Dynamics* 30 (2007), Nr. 1.
– ISSN 0731–5090
- [58] SCHMIDT-SKIPIOL, Florian: *Haptisches Feedback Bei der Führung von Fly-by-Wire-Flugzeugen*. Braunschweig, Technische Universität Braunschweig, Diss., April 2018
- [59] UEHARA, Alan F. ; NIEDERMEIER, Dominik: Limited Evaluation of the Influence of Coupled Sidesticks on the Pilot Monitoring's Awareness during Stall in Cruise. In: *AIAA Modeling and Simulation Technologies (MST) Conference*, 2013
- [60] ALEXANDER, Marc ; HÖFINGER, Marc: Survey of Variable Stability Helicopter Applications in Handling Qualities Research. In: *American Helicopter Society 69th Annual Forum Proceedings*. Phoenix (AZ), Mai 21-23 Mai 2013
- [61] STILES, Lorren R. ; MAYO, John ; FREISNER A., Lynn ; LANDIS, K. H. ; KOTHMANN, Bruce D.: "Impossible to Resist": The Development of Rotorcraft Fly-By-Wire Technology. In: *American Helicopter Society 60th Annual Forum Proceedings*. Baltimore (MD), 2004
- [62] KUBO, Yoshiharu ; KURAYA, Naohiko ; IKARASHI, Reiichi ; AMANO, Takaki ; IKEUCHI, Kenzo ; TOBARI, Shigeru: The Development of FBW Flight Control System and Flight Management System for ATIC BK117 Experimental Helicopter. In: *American Helicopter Society 57th Annual Forum Proceedings*. Washington (DC), Mai 2001
- [63] COLUCCI, Frank: Cue Me & Eyes-Out in Brownout. In: *Vertiflite* (2016), Nr. July/August, S. 14–20
- [64] LUSARDI, Jeff ; FUJIZAWA, Brian ; MORFORD, Zachariah: Flight Testing of Coupled Collective toward Reducing Pilot Workload during Landing in DVE. In: *American Helicopter Society 73th Annual Forum Proceedings*. Fort Worth (TX), Mai 2017
- [65] GUBBELS, Arthur W.: *Digital Redesign of the Bell 205 Artificial Feel System*. Ottawa, CA, Carleton University, Diplomarbeit, 1996
- [66] GUBBELS, Arthur ; GOHEEN, K.R.: Digital Redesign of the NRC BELL 205 Artificial Feel System. In: *Canadian Aeronautics and Space Journal* 43 (1997), März, Nr. 1
- [67] GUBBELS, Arthur ; CARIGNAN, Stephan ; ELLIS, D.: The NRC Bell 412 Advanced Systems Research Aircraft - Facility Description and Results of Safety System Flight Tests. In: *Modeling and Simulation Technologies Conference*. Denver, CO, U.S.A. : American Institute of Aeronautics and Astronautics, August 2000
- [68] GUBBELS, A. ; CARIGNAN, Stephan J. ; ELLIS, D. K.: The NRC Bell 412 Advanced Systems Research Aircraft-Facility Description and Results of Initial In-Flight Evaluation. In: *American Helicopter Society 58th Annual Forum Proceedings*. Montreal (Canada), 2002

- [69] KALETKA, Jürgen ; KURSCHEID, Hermann ; BUTTER, Ulrich: FHS - the New Research Helicopter Ready for Service. In: *29th European Rotorcraft Forum*, 2003, S. 35/1 – 35/12
- [70] DUDA, Holger ; GERLACH, Torsten ; ADVANI, Sunjoo K. ; POTTER, Mario: Design of the DLR AVES Research Flight Simulator. In: *AIAA Modeling and Simulation Technologies (MST) Conference*. Boston (MA) : American Institute of Aeronautics and Astronautics, August 2013
- [71] GRÜNHAGEN, Wolfgang v. ; MÜLLHÄUSER, Mario ; ABILDGAARD, Max ; LANTZSCH, Robin: Active Inceptors in FHS for Pilot Assistance Systems. In: *36th European Rotorcraft Forum*. Paris (France), 2010
- [72] DULLO, Constantin Markus U. ; MÜLLHÄUSER, Mario ; DOS SANTOS SAMPAIO, Rodolfo: 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, September 2019
- [73] BURGMAIR, Raphael ; ALFORD, Adrian ; MOURITSEN, Stephen: Definition and Verification of Active Inceptor Requirements for a Future Tiltrotor. In: *31th European Rotorcraft Forum*. Florence (Italy), 2005
- [74] GESTWA, Martin: ALL-In-Flight Assisted Low Level Flight Using in-Flight Simulation Capability Projektabschlussbericht. Version: Juni 2018. <https://elib.dlr.de/120577/>. 2018. – Forschungsbericht
- [75] KLAUBERT, Jens P. ; BICKEL, Norbert: *Ausrüstungs-Industrie System Offensive - Katalysator für Umweltrelevante und Effizienz Steigernde Systembausteine, Teilvorhaben ECD: Aktive Steuerorgane: Schlussbericht ARISTO-KAT ; Laufzeit des Vorhabens: 01.01.2009 Bis 31.03.2013*. Donauwörth : Eurocopter Deutschland GmbH, 2013 <https://www.tib.eu/de/suchen/id/tema:TEMA20141104218/ECD-Aktive-Steuerorgane-Teilvorhaben-Ausr%C3%BCstungs>
- [76] DULLO, Constantin Markus U. ; MÜLLHÄUSER, Mario: Sicherheitssystem zur Erweiterung des Situationsbewusstseins durch Haptische Merkmale auf den Steuerorganen eines Hubschraubers (SISTEB) / DLR. Version: 2020. <https://www.tib.eu/de/suchen/id/TIBKAT:1841238554/Sicherheitssystem-zur-Erweiterung-des-Situationsbewusstseins>. Braunschweig, 2020. – Forschungsbericht
- [77] BARNETT, Miles: *Flight Test Techniques and the Influence on Rotorcraft Handling Qualities during Isometric Failures of Active Sidesticks*. Braunschweig (Germany), Technische Universität Braunschweig, Diss., 2022
- [78] U.S. Army Cancels Comanche Helicopter Will Shift Money into Other Aviation Programs. In: *CNN* (2004), Februar. <https://web.archive.org/web/20121025024033/http://edition.cnn.com/2004/US/02/23/helicopter.cancel/>
- [79] *Boeing-Sikorsky RAH-66 Comanche*. <https://en.wikipedia.org/wiki/>

- [Boeing-Sikorsky_RAH-66_Comanche#cite_note-CNN_Army_cancels-17](#), . – Acces-
sed: 2022-11-06
- [80] COLUCCI, Frank: Philadelphia's Flexible Chinook Factory. In: *Vertiflite* (2019), Januar, Nr. Jan/Feb 2019
- [81] TAYLOR, Adam ; GREENFIELD, Aaron ; SAHASRABUDHE, Vineet: The Development of Active Inceptor Systems and the Scope and Design Issues of Tactile Cueing Systems. In: *American Helicopter Society 64th Annual Forum Proceedings*. Montreal (Canada), 2008
- [82] COLUCCI, Frank: Testing Kings. In: *Vertiflite* (2016), Nr. January/February
- [83] HEAD, Elan: *Meet the King*. <https://www.verticalmag.com/features/meet-the-king/>. Version: 2017
- [84] SPOLDI, Steven ; FAYNBERG, Alex ; EGEL, David ; COFELICE, Chris: CH-53K Control Laws: Improved Safety and Performance in the Degraded Visual Environment. In: *Vertical Flight Society's 76th Annual Forum and Technology Display*. Virginia Beach, VA, Oktober 2020
- [85] WULFF, Ole ; SAHASRABUDHE, Vineet ; BEALE, Raymond ; LAMB, Richard ; RIGSBY, James ; FLETCHER, Jay W. ; BRADDOM, Steven: Flight Test of Load Alleviating Control and Tactile Cueing System. In: *American Helicopter Society 66th Annual Forum Proceedings*. Phoenix (AZ), Mai 2010
- [86] COLUCCI, Frank: Mike Model Upgrade. In: *Vertiflite* Spring 2008 (2008)
- [87] FLETCHER, Jay W. ; LUSARDI, Jeff ; MANSUR, Mohammadreza H. ; ARTEBURN, David R. ; CHEREPINSKY, Igor ; DRISCOLL, Joe ; MORSE, Chenning S. ; KALINOWSKI, Kevin F.: UH-60M Upgrade Fly-By-Wire Flight Control Risk Reduction Using the RASCAL JUH-60A In-Flight Simulator. In: *American Helicopter Society 64th Annual Forum Proceedings*. Montréal (Canada), April 2008
- [88] MEHRA, Anil: Artificial Force Feel in the BA609 Tiltrotor. Philadelphia (PA), Oktober 2002
- [89] WARWICK, Graham: Sidestick Activity: Active Inceptors Gaining in Popularity for Commercial Aircraft. In: *Aviation week & space technology* (2015), Nr. February 2-15
- [90] WARWICK, Graham: *Active Sidestick Controls Make Commercial Debut*. 2015 <http://aviationweek.com/technology/active-sidestick-controls-make-commercial-debut>
- [91] NOWACK, Timo: *Die Weltpremiere im Cockpit der Irkut MS-21*. <https://www.aerotelegraph.com/aktive-sidesticks-die-weltpremiere-im-cockpit-der-irkut-ms-21>. Version: Februar 2020

- [92] JERAM, Geoffrey J.: *Open Platform for Limit Protection with Carefree Maneuver Applications*. Atlanta (GA), Georgia Institute of Technology, Diss., 2004
- [93] FORTENBAUGH, R.L ; HOPKINS, Roy I. ; KING, David W.: BA609 First Flight VSTOL Handling Qualities. In: *American Helicopter Society 60th Annual Forum Proceedings*. Baltimore (MD), 2004
- [94] BROOKS, Tom ; KING, David W.: Hardware-In-The-Loop Simulation (HILS) Testing of the BA609 Vehicle Management System. In: *American Helicopter Society Flight Controls and Crew System Design Specialists' Meeting*. Philadelphia (PA), Oktober 2002
- [95] ERWIN, Jeffery W.: BA609 Flight Deck Design and Workload. In: *American Helicopter Society 61st Annual Forum Proceedings*. Grapevine, TX, Juni 2005
- [96] MÜLLHÄUSER, Mario ; BARNETT, Miles: Development of a Generic Test for Transient Recovery Handling from Helicopter Active Inceptor System Failures to a Near-Zero Control Force Condition. In: *American Helicopter Society 71th Annual Forum Proceedings*. Virginia Beach (VA), 2015
- [97] SAE INTERNATIONAL: Aerospace Active Inceptor Systems for Aircraft Flight and Engine Controls. 2013 (ARP5764). – Forschungsbericht
- [98] RIDDLE, D. L. ; CHAPMAN, R. J.: Tactile Language Design. In: *Proceedings of the Human Factors and Ergonomics Society Annual Meeting* 56 (2012), Nr. 1, 478–482. <http://pro.sagepub.com>. – ISSN 1071–1813
- [99] HORN, Joe ; CALISE, Anthony ; PRASAD, J.V.R.: Development of Envelope Protection Systems for Rotorcraft. In: *American Helicopter Society 55th Annual Forum Proceedings*. Montreal (Canada), 1999
- [100] ISO: *Ergonomics of Human-System Interaction – Part 210: Human-centered Design for Interactive Systems*. 2010 (ISO 9241-210)
- [101] DEUTSCHES INSTITUT FÜR NORMUNG E.V.: *Ergonomie der Mensch-System-Interaktion – Teil 910: Rahmen für Die Taktile und Haptische Interaktion*. Berlin : Beuth Verlag, 2011 (DIN EN ISO 9241-910)
- [102] PONS Online-Wörterbuch. <https://www.de.pons.com/übersetzung/englisch-deutsch/cue>
- [103] KERN, Thorsten A. (Hrsg.): *Engineering haptic devices: A beginner's guide for engineers*. Dordrecht and New York : Springer, 2009. – ISBN 9783540882480
- [104] TICHY, Franz: *Theoretische und Experimentelle Untersuchungen zu Aktiven Geregelter Steuerknüppeln*. Als Ms. gedr. Düsseldorf : VDI-Verl., 1995 (Fortschrittberichte VDI : Reihe 12, Verkehrstechnik, Fahrzeugtechnik). – ISBN 3–18–323312–6

- [105] HERZOG, H.J. ; REW, R.: Force Feedback Compensation: A New Concept for Improved Manual Control System Performance. In: *Third Annl. NASA-University Conf. on Manual Control* Bd. NASA SP-144, 1213, 1967
- [106] UNITED STATES ARMY AVIATION AND MISSILE COMMAND AVIATION ENGINEERING DIRECTORATE: *ADS-33E-PRF: Aeronautical Design Standard, Performance Specification, Handling Qualities Requirements for Military Rotorcraft*. Redstone Arsenal (AL), 2000
- [107] KEY, David L. ; BLANKEN, Chris L. ; HOH, Roger H. ; MITCHELL, David G. ; APONSO, Bimal L.: *Background Information and User's Guide (BIUG) for Handling Qualities Requirements for Military Rotorcraft*. 2015
- [108] WOODSON, Wesley E. ; TILLMAN, Barry ; TILLMAN, Peggy: *Human Factors Design Handbook: Information and Guidelines for the Design of Systems, Facilities, Equipment, and Products for Human Use*. Second. New York : McGraw-Hill, 1992. – ISBN 978-0-07-071768-8
- [109] CS-27 *Certification Specifications for Small Rotorcraft*. <https://www.easa.europa.eu/downloads/1623/en>. Version: November 2003
- [110] CS-29 *Certification Specifications for Large Rotorcraft*. <https://www.easa.europa.eu/downloads/1630/en>. Version: November 2003
- [111] BEHRENS, Anne-Marie: Optimierung eines Tactile Cues in Hinblick auf Präzision und Steuerkräfte. Braunschweig, Dresden, 2021. – Forschungsbericht
- [112] PRIETO-AGUILAR, Gemma: *Méthodologie de conception des lois de retour de force par simulation de boucle de commande hélicoptère*. Paris, Sorbonne, Diss., Dezember 2021
- [113] SCHUCHARDT, Bianca I.: Workload Reduction through Steering Wheel Control for Rotorcraft. In: *CEAS Aeronautical Journal* 10 (2019), September, Nr. 3, 893–902. <http://dx.doi.org/10.1007/s13272-018-00360-3>. – DOI 10.1007/s13272-018-00360-3. – ISSN 1869-5582, 1869-5590
- [114] GRÜNHAGEN, Wolfgang v. ; ABILDGAARD, Max ; MÜLLHÄUSER, Mario: Active Sidesticks Integrated in DLR's Flying Simulator FHS. In: ICEAE (Hrsg.): *Proceedings of the Centenary International Conference on Aerospace Engineering (ICEAE)*, 2009
- [115] VON GRÜNHAGEN, Wolfgang ; ABILDGAARD, Max: *Integration eines aktiven Steuerorgans (Side Stick) in den FHS (1): Abschlussbericht zum BWB Vertrag E/LR3H/5A026/5F007: Extern beschränkt zugänglich*. Braunschweig : DLR, Institut für Flugsystemtechnik, 2006
- [116] GRÜNHAGEN, Wolfgang von ; MÜLLHÄUSER, Mario: *Integration eines aktiven Steuerorgans (Side Stick) in den FHS (2): Abschlussbericht zum BWB Vertrag E/LR3H/6A177/5F007: Extern beschränkt zugänglich*. Braunschweig : DLR, Institut für Flugsystemtechnik, 2009 (Institutsbericht IB 111-2009/33)

- [117] MÜLLHÄUSER, Mario ; SCHIEBEN, Anna ; GRÜNHAGEN VON, Wolfgang ; FLEMISCH, Frank: Simulatorengestützte Studien zur Aktiven Sidesticksteuerung von Luft- und Bodenfahrzeugen am DLR. In: GRANDT, Morten (Hrsg.) ; BAUCH, Anna (Hrsg.): *Simulationsgestützte Systemgestaltung*. Hamburg (Deutschland), 2007, S. 27–45
- [118] HANKE, Dietrich ; HERBST CHRISTIAN: Active Sidestick Technology – a Means for Improving Situational Awareness. In: *Aerospace Science and Technology* (1999), Nr. 3, 525–532. <http://www.sciencedirect.com/science/journal/12709638/3>
- [119] EUROCOPTER DEUTSCHLAND GMBH: *EC 135 T2+ (with CPDS Installed): Approved Rotorcraft Flight Manual: Restricted Distribution*. 2006. – nicht öffentlich verfügbar
- [120] VAN DER WALL, Berend G. d.: *Grundlagen der Hubschrauber-Aerodynamik*. 2., ergänzte, überarbeitete und korrigierte Auflage. Berlin [Heidelberg] : Springer Vieweg, 2020 (VDI-Buch). – ISBN 978–3–662–60365–9 978–3–662–60364–2
- [121] HORN, Joseph ; SAHANI, Nilesh: Detection and Avoidance of Main Rotor Hub Moment Limits on Rotorcraft. In: *Journal of Aircraft* (2004), Nr. 41, S. 372–379
- [122] BENOIT, Bernard ; KAMPA, Konstantin ; DEQUIN, Andre-Michael ; GRÜNHAGEN, Wolfgang v. ; BASSET, Pierre-Marie ; GIMONET, Bernard: HOST, a General Helicopter SimulationTool for Germany and France. In: *American Helicopter Society 56th Annual Forum Proceedings*. Virginia Beach (VA), 2000
- [123] SEHER-WEISS, Susanne: Fitlabgui - a Versatile Tool for Data Analysis, System Identification and Helicopter Handling Qualities Analysis. In: *42nd European Rotorcraft Forum*. Lille (France), 2016
- [124] REHMANN, Albert J.: *Handbook of Human Performance Measures and Crew Requirements for Flightdeck Research*. FAA, 1995 (DOT/FAA/CT-TN95/49). <http://www.tc.faa.gov/its/worldpac/techrpt/cttn95-49.pdf>
- [125] HART, Sandra G. ; STAVELAND, Lowell E.: Development of NASA-TLX (Task Load Index) Results of Empirical and Theoretical Research. In: HANCOCK, P.A (Hrsg.) ; MESHKATI, N. (Hrsg.): *Human Mental Workload*. Amsterdam, The Netherlands : North Holland Press, 1988, S. 239–250
- [126] ROSCOE, A.H ; ELLIS, G.A: *A Subjective Rating Scale for Assessing Pilot Workload in Flight: A Decade of Practical Use*. Bedford (UK) : Royal Aerospace Establishment, 1990 (TR 90019, 7672000H)
- [127] SEDLMEIER, Peter ; RENKEWITZ, Frank: *Forschungsmethoden und Statistik für Psychologen und Sozialwissenschaftler*. 2., aktualisierte und erweiterte Auflage. München Harlow Amsterdam Madrid Boston San Francisco Don Mills Mexico City Sydney : Pearson, 2013 (PS Psychologie). – ISBN 978–3–86894–131–9

- [128] JERAM, Geoffrey J.: Distributing Limit Protection between Autonomous Restraint and Voluntary Tactile Cues. In: *43rd AIAA Aerospace Sciences Meeting and Exhibit*, 2005
- [129] VAN DER LAAN, Jinke D. ; HEINO, Adriaan ; WAARD, Dick de: A Simple Procedure for the Assessment of Acceptance of Advanced Transport Telematics. In: *Transportation Research Part C: Emerging Technologies* 5 (1997), Nr. 1, S. 1–10. [http://dx.doi.org/10.1016/S0968-090X\(96\)00025-3](http://dx.doi.org/10.1016/S0968-090X(96)00025-3). – DOI 10.1016/S0968-090X(96)00025-3. – ISSN 0968090X
- [130] RÖTTING, Matthias: *Schriftenreihe Rationalisierung und Humanisierung*. Bd. 34: *Parametersystematik der Augen- und Blickbewegungen für Arbeitswissenschaftliche Untersuchungen*. Aachen : Shaker, 2001. – ISBN 978-3-8265-8805-1
- [131] BLASCHECK, T. ; KURZHALS, K. ; RASCHKE, M. ; BURCH, M. ; WEISKOPF, D. ; ERTL, T.: Visualization of Eye Tracking Data: A Taxonomy and Survey: Visualization of Eye Tracking Data. In: *Computer Graphics Forum* 36 (2017), Dezember, Nr. 8, 260–284. <http://dx.doi.org/10.1111/cgf.13079>. – DOI 10.1111/cgf.13079. – ISSN 01677055
- [132] FRIEDRICH, Maik ; BIERMANN, Maresa ; GONTAR, Patrick ; BIELLA, Marcus ; BENGLER, Klaus: The Influence of Task Load on Situation Awareness and Control Strategy in the ATC Tower Environment. In: *Cognition, Technology & Work* 20 (2018), Nr. 2, S. 205–217. <http://dx.doi.org/10.1007/s10111-018-0464-4>. – DOI 10.1007/s10111-018-0464-4. – ISSN 1435-5558
- [133] SCHÖNENBERG, Thorben: *Kalibrierung der Aktiven Sidesticks im Hubschrauber-Bodensimulator*. Braunschweig, 2012 (Institutsbericht IB 111-2012/11)

A. Pilotenbiographien

Tabelle A.1.: **Piloten- und Testübersicht, Zuordnung Aliase**

LfNr	Alias	LfNr-Jahr	Bio ¹	Blick	TLX	Qual. ²	v.d. Laan	Trust	DT ⁵	Informationen
1	1A	2012-1	ja	nein	ja	nein	nein	nein	nein	SIM
2	1B	2012-2	ja	nein	ja	nein	nein	nein	nein	SIM und FHS
3	1C	2013-1	ja	nein	ja	nein	nein	nein	nein	SIM
4	1D	2013-2	ja	nein	ja	nein	nein	nein	nein	SIM
5	2A	2014-1	ja	nein	nein	ja	ja ³	nein	nein	SiRaSKoF-H Obstacle City
6	2B	2014-2	ja	nein	nein	ja	ja ³	nein	nein	
7	2C	2014-3	ja	nein	nein	ja	ja ³	nein	nein	
8	2D	2015-1	ja	nein	nein	ja	ja ³	nein	nein	PA, Studie 1 Demo Obstacle City
9	2E	2015-2	ja	nein	nein	ja	ja ³	nein	nein	
10	2F	2015-3	ja	nein	nein	ja	ja ³	nein	nein	
11	2G	2015-4	ja	nein	nein	ja	ja ³	nein	nein	
12	2H	2015-5	ja	nein	nein	ja	ja ³	nein	nein	
13	2I	2015-6	ja	nein	nein	ja	ja ³	nein	nein	
14	2J	2015-7	ja	nein	nein	ja	ja ³	nein	nein	
15	2K	2015-8	ja	nein	nein	ja	ja ³	nein	nein	PA, Studie 2 Manöverauswahl Waldlichtung
16	2L	2016-1	ja	nein	nein	ja	nein	nein	nein	
17	2M	2016-2	ja	nein	nein	ja	nein	nein	nein	
18	2N	2016-3	ja	nein	nein	ja	nein	nein	nein	
19	2O	2016-4	nein	nein	nein	ja	nein	nein	nein	PA, Studie 3 Blickbewegung, Takeoff
20	3A	2018-1	ja	ja	ja	ja	ja ⁴	ja	ja	
21	3B	2018-2	ja	ja	ja	ja	ja ⁴	ja	ja	
22	3C	2018-3	ja	ja	ja	ja	ja ⁴	ja	ja	

¹ Daten zur Pilotenbiographie erfasst.

² Qualitative Daten per Fragebogen erfasst.

³ v.d. Laan Skala: 2014/2015 verwendet zum Vergleich zwischen den Prototypen

⁴ v.d. Laan Skala: 2017/2018 für Bewertung finaler Prototyp

⁵ Experiment zur Wahrnehmbarkeitsschwelle (Detection Threshold) durchgeführt.

Tabelle A.2.: Pilotenbiographien Studie 1 - A bis D

Pilot	Pilot 1A	Pilot 1B	Pilot 1C	Pilot 1D
Alias	2012-1	2012-2	2013-1	2013-2
Lizenz	zivil	militärisch, zivil	zivil	zivil
Bisherige Tätigkeits- felder und Zusatz- qualifikationen	Testpilot (TP1), Heer, Luftrettung, Winde, Lastha- ken, Seeflug, Gebirgsflug, VFR- Tag/Nacht, NVG, IFR	Luftwaffe, DLR, SAR, Winde, Lasthaken, Ge- birgsflug, VFR- Tag/Nacht, NVG, IFR, VIP	Testpilot, Heer, Luftrettung, Win- de, Lasthaken, Seeflug, Gebirgs- flug, Schiffsdeck- landung, Gefecht, VFR-Tag/Nacht, NVG, IFR	VFR-Tag, Nacht VFR-
Muster	EC/H 135, Alou- ette II, BO 105, UH 1D, Tiger, ACT/FHS, Bell 206, A 109, AS 365, Mi 2, Mi 8, Sokol W 3, Super Puma, UH 60, Sea King, BK117/EC/H 145, AS 350, u.a.	EC/H 135/635, BO 105, ACT/FHS, Alouette III, AS 532	EC/H 135, BO 105, Alouette II, UH 1D, ACT/FHS	R 22, R 44, EC 120
Flugerfahrung in Jahren	42	13	35	3
in Stunden - gesamt	8900	2600	5000	190
- in den letzten 12 Monaten	160	200	180	40

Tabelle A.3.: **Pilotenbiographien Studie 2 - A bis C**

Pilot	Pilot 2A	Pilot 2B	Pilot 2C
Alias	2014-1	2014-2	2014-3
Lizenz	zivil	zivil	zivil
Bisherige Tätigkeits- felder und Zusatz- qualifikationen	Luftrettung, SAR, Polizei, Winde, Lasthaken, See- flug, Gebirgsflug, VFR-Tag, VFR- Nacht, NVG, IFR	Luftrettung, Poli- zei, VFR-Tag, VFR- Nacht, NVG	Luftrettung, Militär, Polizei, VFR-Tag, VFR- Nacht, NVG
Muster	SA 318, SA 330, AS 332, UH 1D, EC/H 135, BO 105	EC/H 135	SA 318, AS 332, EX/H 135, Bo 105
Flugerfahrung in Jahren	26	5	23
in Stunden - gesamt	4400	1200	3400
- in den letzten 12 Monaten	150	160	140

Tabelle A.4.: **Pilotenbiographien Studie 2 - D bis F**

Pilot	Pilot 2D	Pilot 2E	Pilot 2F
Alias	2015-1	2015-2	2015-3
Lizenz	zivil	militärisch, zivil, Testpilot	militärisch, Testpi- lot
Bisherige Tätigkeits- felder und Zusatz- qualifikationen	ehemals Heer	ehemals Luftwaffe	ehemals Heer
Muster	EC/H 135, ACT/FHS, BO 105, CH 53	EC/H 135, ACT/FHS, BO 105, W 41 K, u.a.	CH 53, EC/H 135, UH 60, u.a.
Flugerfahrung in Jahren			
in Stunden			
- gesamt	650	3500	2200
- in den letzten 12 Monaten			

Tabelle A.5.: **Pilotenbiographien Studie 2 - G bis I**

Pilot	Pilot 2G	Pilot 2H	Pilot 2I
Alias	2015-4	2015-5	2015-6
Lizenz	militärisch	militärisch	militärisch
Bisherige Tätigkeits- felder und Zusatz- qualifikationen	Heer	Heer	Luftwaffe
Muster	NH 90	Tiger	CH 53 G
Flugerfahrung in Jahren			
in Stunden			
- gesamt	2200	2500	2900
- in den letzten 12 Monaten			

Tabelle A.6.: **Pilotenbiographien Studie 2 - J bis L**

Pilot	Pilot 2J	Pilot 2K	Pilot 2L
Alias	2015-7	2015-8	2016-1/2015-9
Lizenz	militärisch	militärisch	militärisch
Bisherige Tätigkeits- felder und Zusatz- qualifikationen	Luftwaffe	Marine	Marine
Muster	CH 53 GA	W Mk 88 Sea Lynx	EC/H 135
Flugerfahrung in Jahren			
in Stunden			
- gesamt	4500	1200	820
- in den letzten 12 Monaten			

Tabelle A.7.: **Pilotenbiographien Studie 2 - M bis O**

Pilot	Pilot 2M	Pilot 2N	Pilot 2O
Alias	2016-2/2015-10	2016-3/2015-11	2016-4/2015-12
Lizenz	militärisch	militärisch	militärisch, Testpilot
Bisherige Tätigkeits- felder und Zusatz- qualifikationen	Heer	Heer	US Army
Muster	NH 90	NH 90	UH 60, RASCAL, u.a. (Muster nicht erfasst)
Flugerfahrung in Jahren			nicht erfasst
in Stunden			
- gesamt	1900	2800	nicht erfasst
- in den letzten 12 Monaten			nicht erfasst

Tabelle A.8.: **Pilotenbiographien Studie 3**

Pilot	Pilot 3A	Pilot 3B	Pilot 3C
Alias	2018-1	2018-2	2018-3
Lizenz	militärisch, Testpilot	militärisch, Testpilot	militärisch, Testpilot
Bisherige Tätigkeits- felder und Zusatz- qualifikationen	Heer, Winde, Last- haken, VFR-Tag, VFR, Nacht, NVG, IFR, Sensor-VFR	Heer, Marine, Luftwaffe, SAR, Winde, Lastha- ken, Seeflug, Gebirgsflug, Schiffsdecklan- dung, Gefecht, VFR-Tag, VFR- Nacht, NVG, IFR	Heer, Winde, Lasthaken, Ge- birgsflug, VFR-Tag, VFR-Nacht, NVG, IFR
Muster	CH 53 GS/GE, Alouette II, Bo 105, UH 1D, NH 90	UH 1D, Bo 105, CH 53 GS/GE, Sea King MK 41, Sea Lynx MK 88 a, NH 90	Tiger, Bo 105, UH 1D, CH 53 GS/GE, CH 53 GA, NH 90, EC 145, ACT/FHS, RASCAL
Flugerfahrung in Jahren	18	34	23
in Stunden - gesamt	2000	5000	4000
- in den letzten 12 Monaten	180	100	213

B. Rohdaten Studie 1

B.1. Versuchsübersicht

Tabelle B.1.: Haptic-FLI Demonstrationen und Evaluationen in 2012

11. Oktober 2012	ACT/FHS Demonstration mit ETPS Ausbilder (Testpilot), Kommentar: <i>Optimal workload reducer for takeoff!</i>
12. November 2012	ACT/FHS Systemtest DLR Pilot
22./23. November 2012	Systemsimulator Evaluation System und Reduktion der Arbeitsbelastung (Pilot 1A, externer Testpilot), Kommentar: <i>Mit Haptic-FLI absolut niedrige Workload!</i>
07. Dezember 2012	ACT/FHS Evaluation System und Reduktion der Arbeitsbe- lastung (Pilot 1B)
23. Januar 2013	Systemsimulator Evaluation System und Reduktion der Arbeitsbelastung (Pilot 1B)
30. Januar 2013	Systemsimulator Evaluation System und Reduktion der Arbeitsbelastung (Pilot 1C)
21. Februar 2013	Systemsimulator Evaluation System und Reduktion der Arbeitsbelastung (Pilot 1D)

Tabelle B.2.: **Pilot 1A, 23.11.2012¹**

Run-Nr.	Manöver	Konf.	Beschreibung, Kommentar
-	Fog Dep.	TCoff	3 Training runs
1	Fog Dep.	TCoff	leichter Overtorque
-	Fog Dep.	TC ^{STOP}	$t_p = 5s$; 3 Training runs
2	Fog Dep.	TC ^{STOP}	$t_p = 5s$; verworfen, zu dynamisch, zu viel Vertrauen ins System: "Overconfidence"
3	Fog Dep.	TC ^{STOP}	$t_p = 5s$; Evaluation Gut, dass das Kollektiv schiebt.
-	White. Esc.	TCoff	3 Training runs
4	White. Esc.	TCoff	Evaluation
-	White. Esc.	TC ^{STOP}	$t_p = 5s$; 3 Training runs
5	White. Esc.	TC ^{STOP}	$t_p = 5s$; Evaluation "Mit haptic FLI absolut niedrige Workload"

¹ Der Versuch wurde ursprünglich als FHS-Flug geplant und wurde wegen Nicht-Verfügbarkeit kurzfristig im Simulator durchgeführt. Die Erprobung wurde am Vortag begonnen, es fanden aber nur Trainingsläufe statt.

Tabelle B.3.: **Pilot 1B- FHS, 07.12.2012**

Run-Nr.	Manöver	Konf.	Beschreibung, Kommentar
1-5	Settings		Überprüfung des Prädiktors, Gewöhnung an Fkt.
6	Fog Dep.	TCoff	Evaluation
7	Fog Dep.	TC ^{STOP}	$t_p = 5s$, Prädiktor-Offset: 1 %; verworfen: Overtorque, Limitwechsel schon bei 45 kts, Wdh.
8	Fog Dep.	TC ^{STOP}	$t_p = 5s$; Evaluation; Prädiktor-Offset: 0 % auch hier früher Limitwechsel
9	White. Esc.	TCoff	Evaluation
10	White. Esc.	TC ^{STOP}	$t_p = 5s$; Evaluation

¹ Anders als beim Takeoff üblich, wurde hier die High-Nr Funktion nicht aktiviert, da sie im Torque-Prädiktor nicht berücksichtigt worden war.

Tabelle B.4.: **Pilot 1B, 23.01.2013**

Run-Nr.	Manöver	Konf.	Beschreibung, Kommentar
Training runs nicht dokumentiert.			
8	Fog Dep.	TCoff	Evaluation
10	Fog Dep.	TC ^{STOP}	$t_p = 5s$; nur zum Vergleich
11	Fog Dep.	TC ^{STOP}	$t_p = 2.5s$; Evaluation
12	White. Esc.	TCoff	Evaluation
13	White. Esc.	TC ^{STOP}	$t_p = 2.5s$; Evaluation

¹ Nachdem in den Flugversuchen festgestellt wurde, dass ein Vorhersagehorizont von $t_p = 5s$ zu hoch ist, wurde er hier auf 2,5 s reduziert.

Tabelle B.5.: **Pilot 1C, 30.01.2013**

Run-Nr.	Manöver	Konf.	Beschreibung, Kommentar
40	Fog Dep.	TC ^{STOP}	$t_p = 2.5s$; Training
41	Fog Dep.	TCoff	Training
42	Fog Dep.	TCoff	Evaluation
43	Fog Dep.	TC ^{STOP}	$t_p = 2.5s$; Training
44	Fog Dep.	TC ^{STOP}	$t_p = 2.5s$; Training
45	Fog Dep.	TC ^{STOP}	$t_p = 2.5s$
46	White. Esc.	TCoff	Training
47	White. Esc.	TCoff	Evaluation
48	White. Esc.	TC ^{STOP}	$t_p = 2.5s$; Training
49	White. Esc.	TC ^{STOP}	$t_p = 2.5s$

Tabelle B.6.: **Pilot 1D, 21.02.2013**

Run-Nr.	Manöver	Konf.	Beschreibung, Kommentar
11	Fog Dep.	TC ^{STOP}	Training
12	Fog Dep.	TCoff	Training
13	Fog Dep.	TCoff	Training
14	Fog Dep.	TCoff	abgebrochen
15	Fog Dep.	TCoff	Evaluation
16	Fog Dep.	TC ^{STOP}	Training
17	Fog Dep.	TC ^{STOP}	abgebrochen
18	Fog Dep.	TC ^{STOP}	abgebrochen
19	Fog Dep.	TC ^{STOP}	abgebrochen
20	Fog Dep.	TC ^{STOP}	abgebrochen
21	Fog Dep.	TC ^{STOP}	Training, automatische Degradierung nicht genutzt
22	Fog Dep.	TC ^{STOP}	Training
23	Fog Dep.	TC ^{STOP}	Evaluation
24	White. Esc.	TCoff	Training
25	White. Esc.	TCoff	Evaluation
26	White. Esc.	TC ^{STOP}	Evaluation

B.2. Flugmessdaten

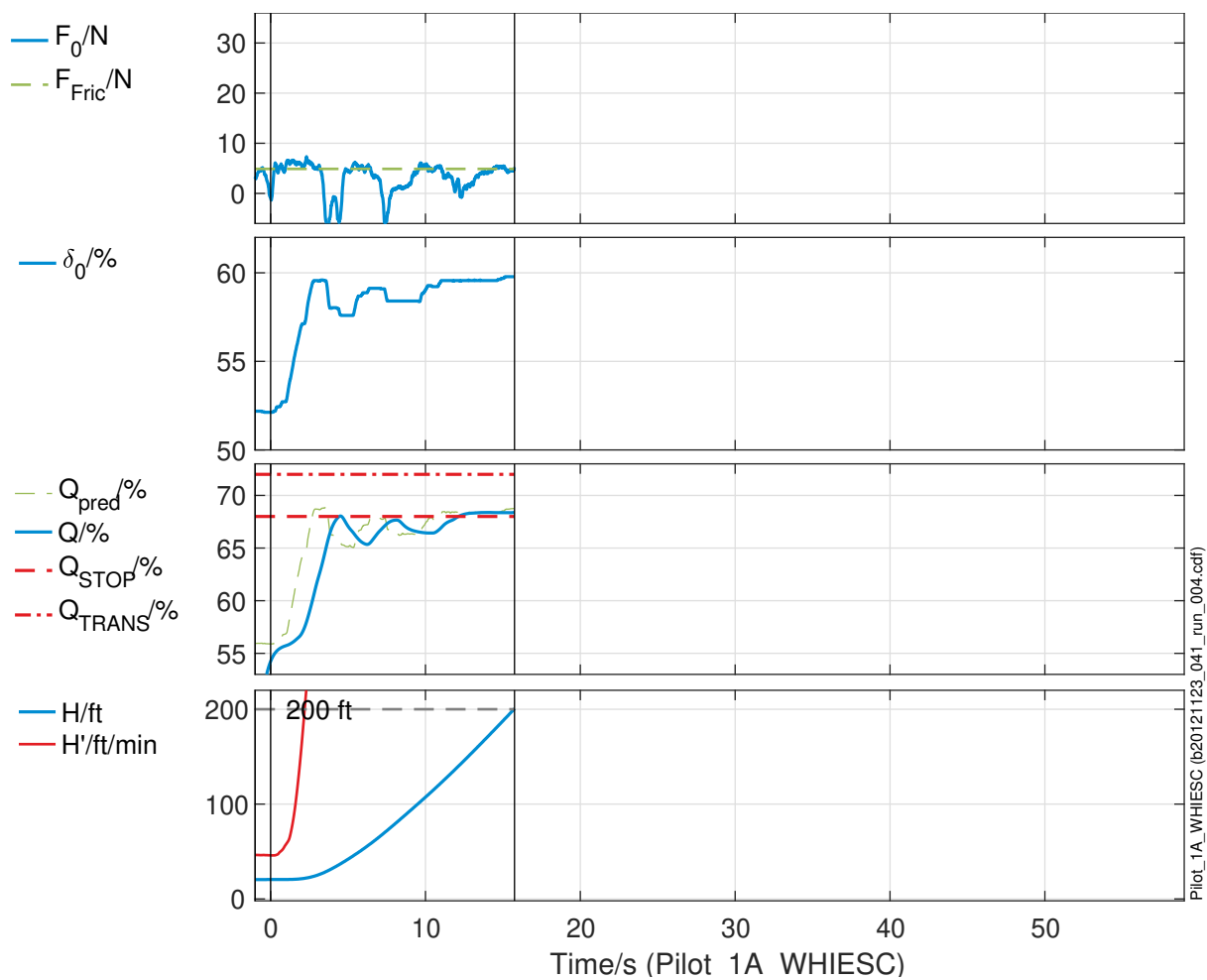


Abbildung B.1.: Pilot 1A, Whiteout-Escape, ohne TC

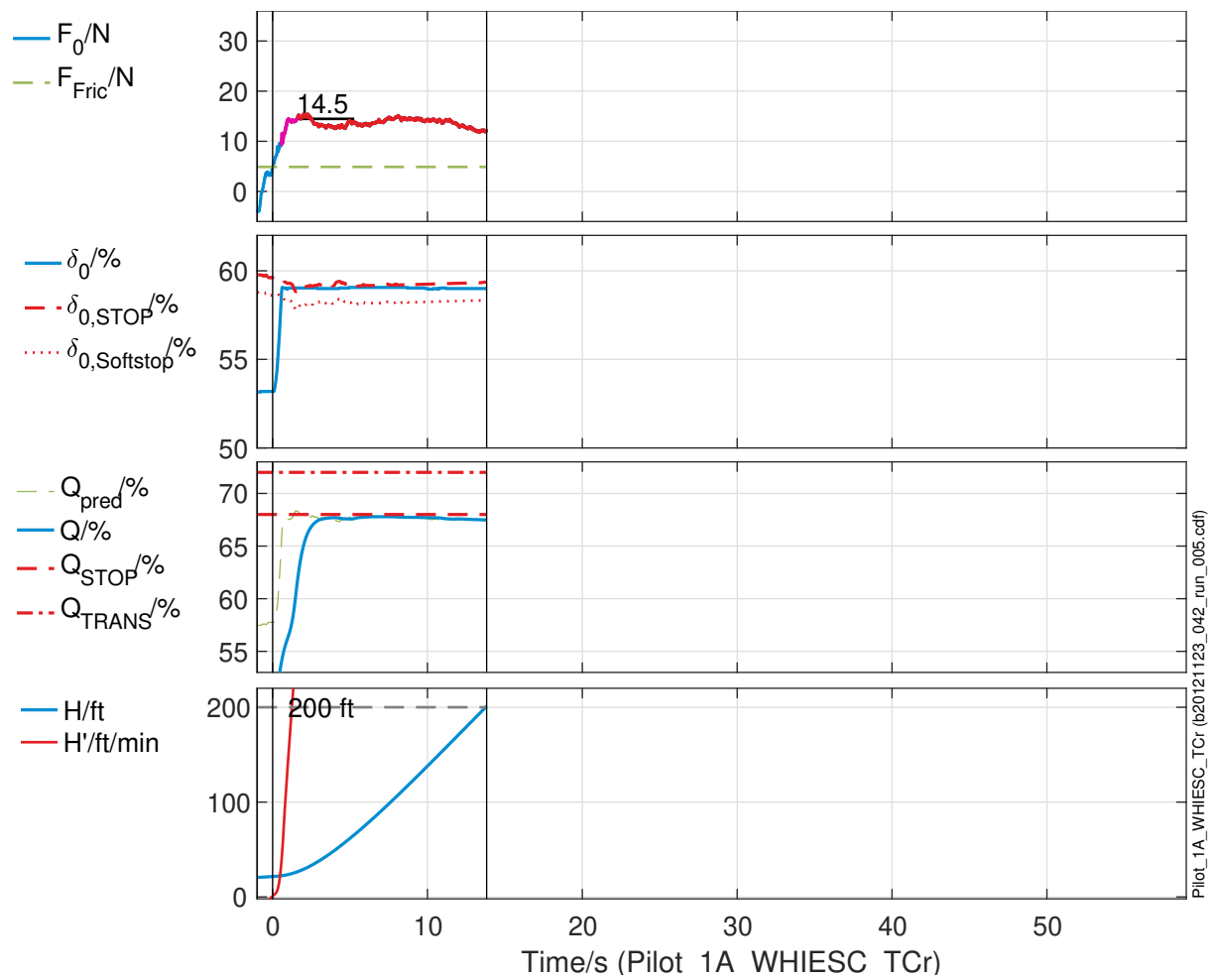


Abbildung B.2.: Pilot 1A, Whiteout Escape, mit TC

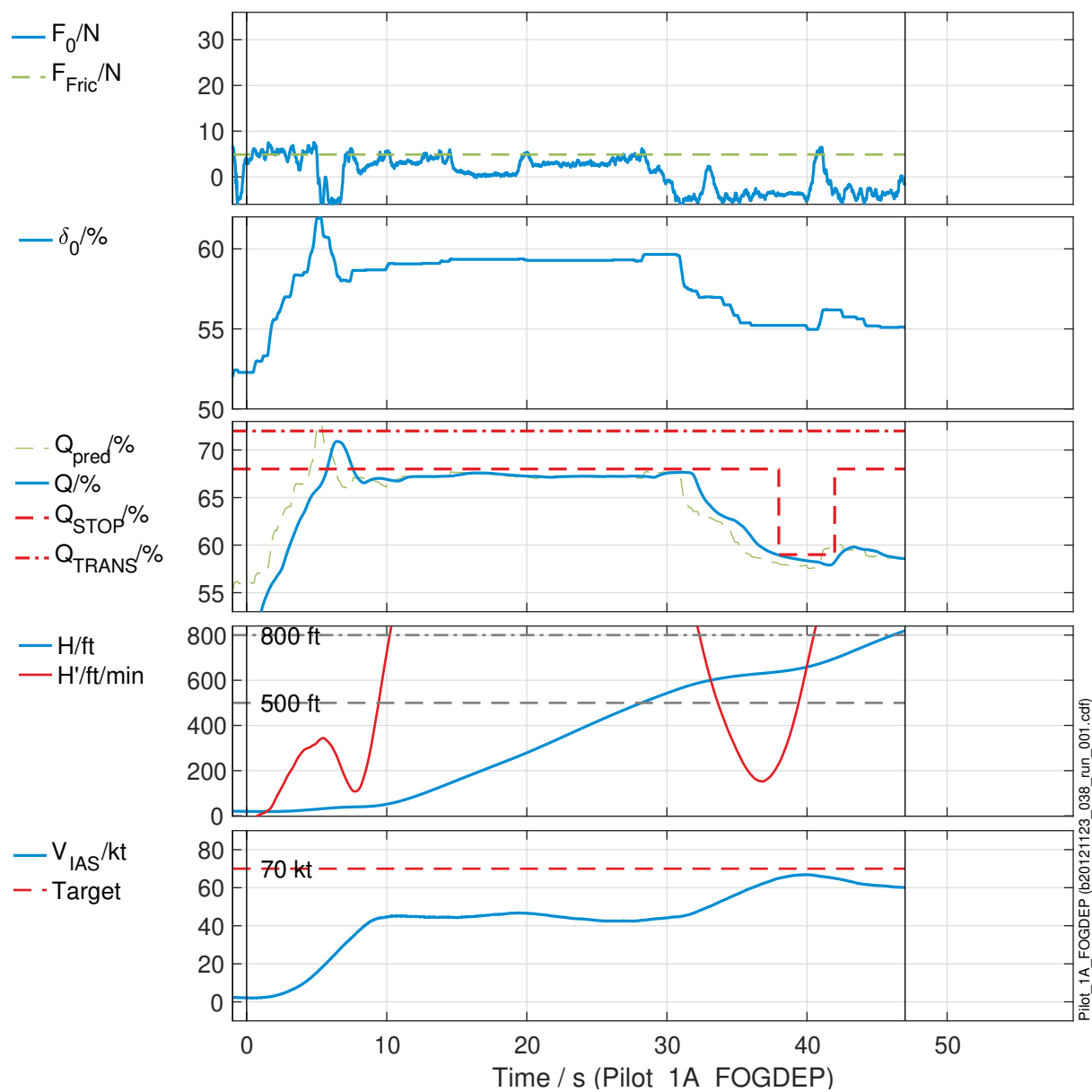


Abbildung B.3.: Pilot 1A, Fog-Departure, ohne TC

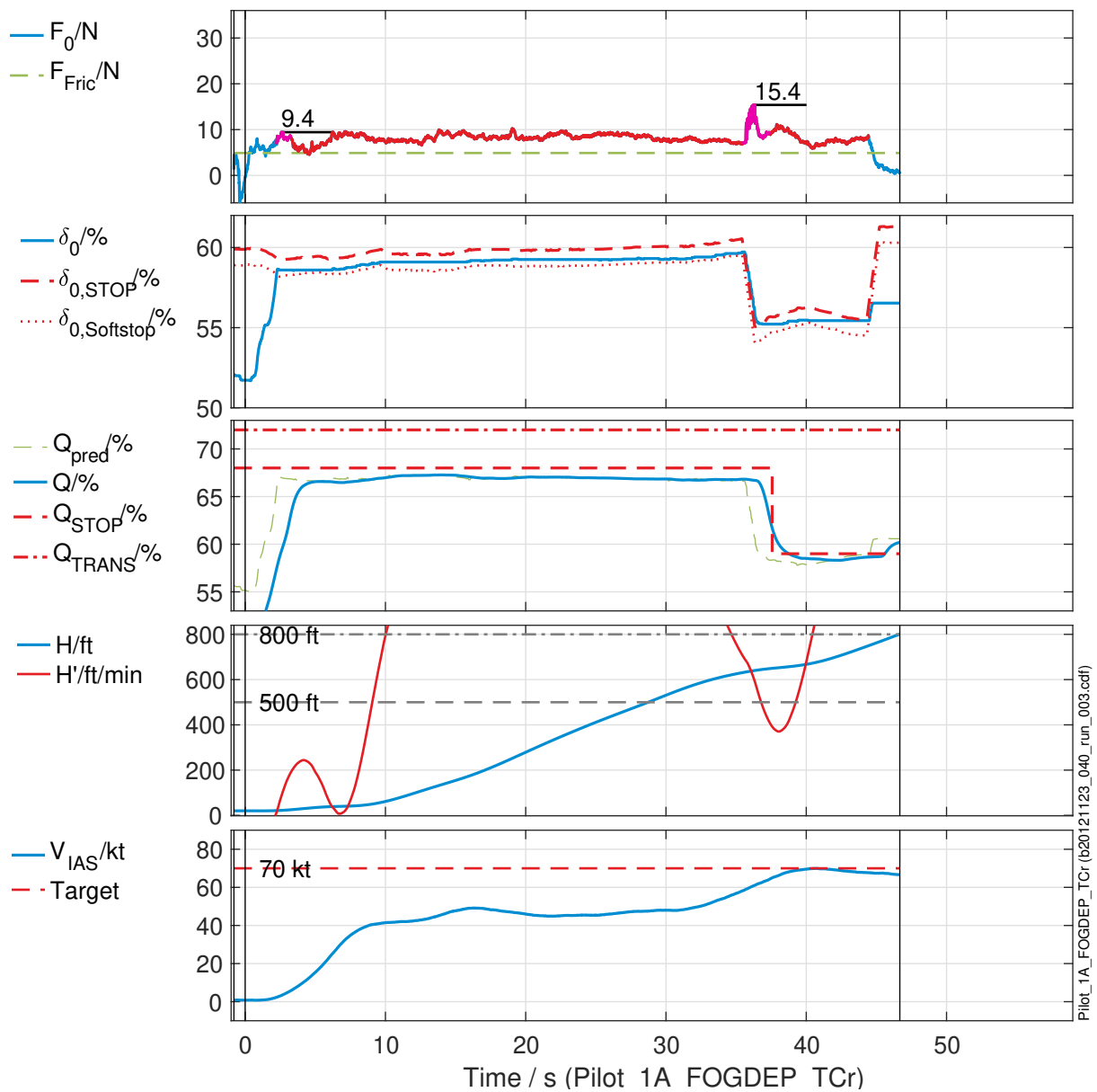


Abbildung B.4.: Pilot 1A, Fog-Departure, mit TC

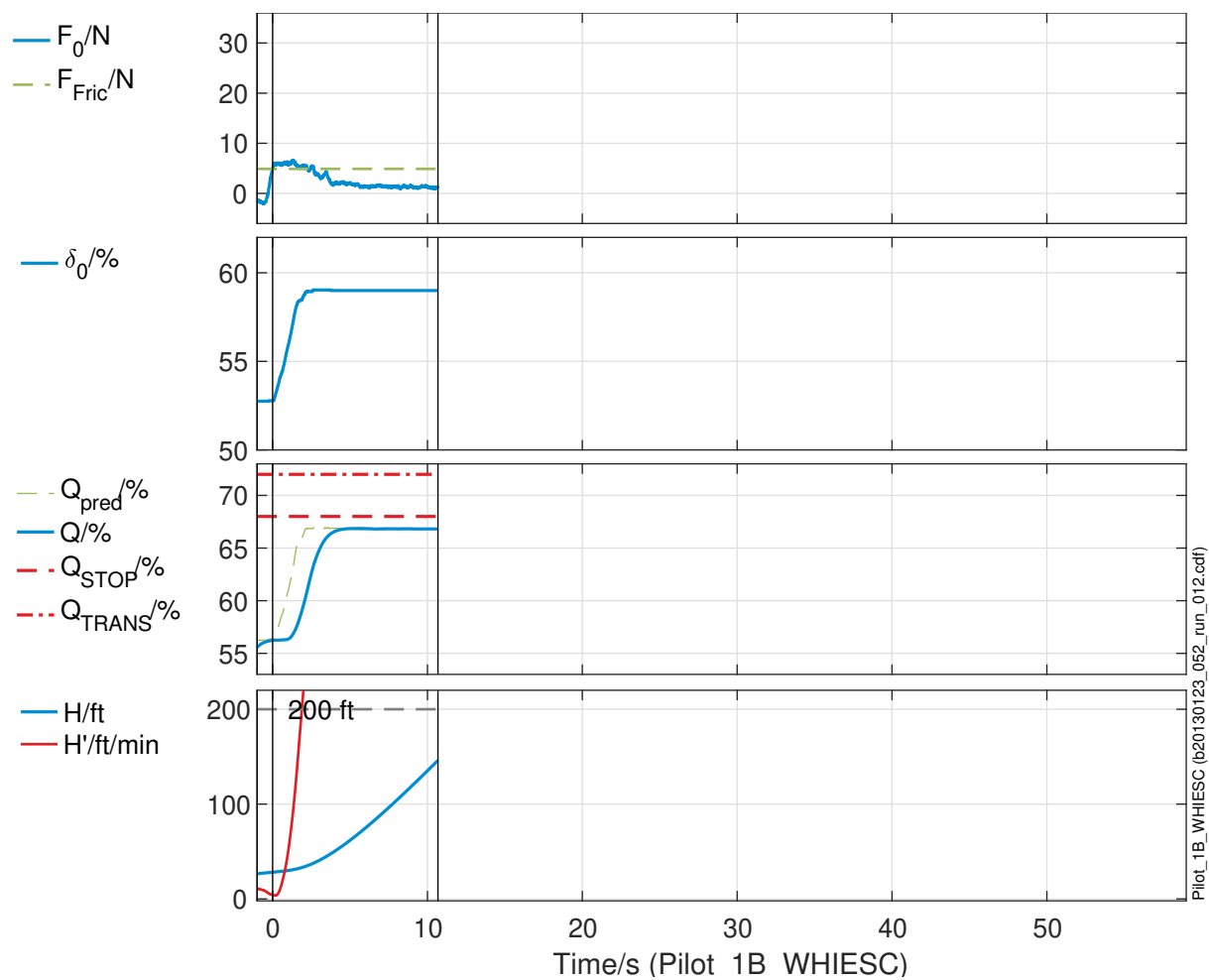


Abbildung B.5.: Pilot 1B, Whiteout-Escape, ohne TC

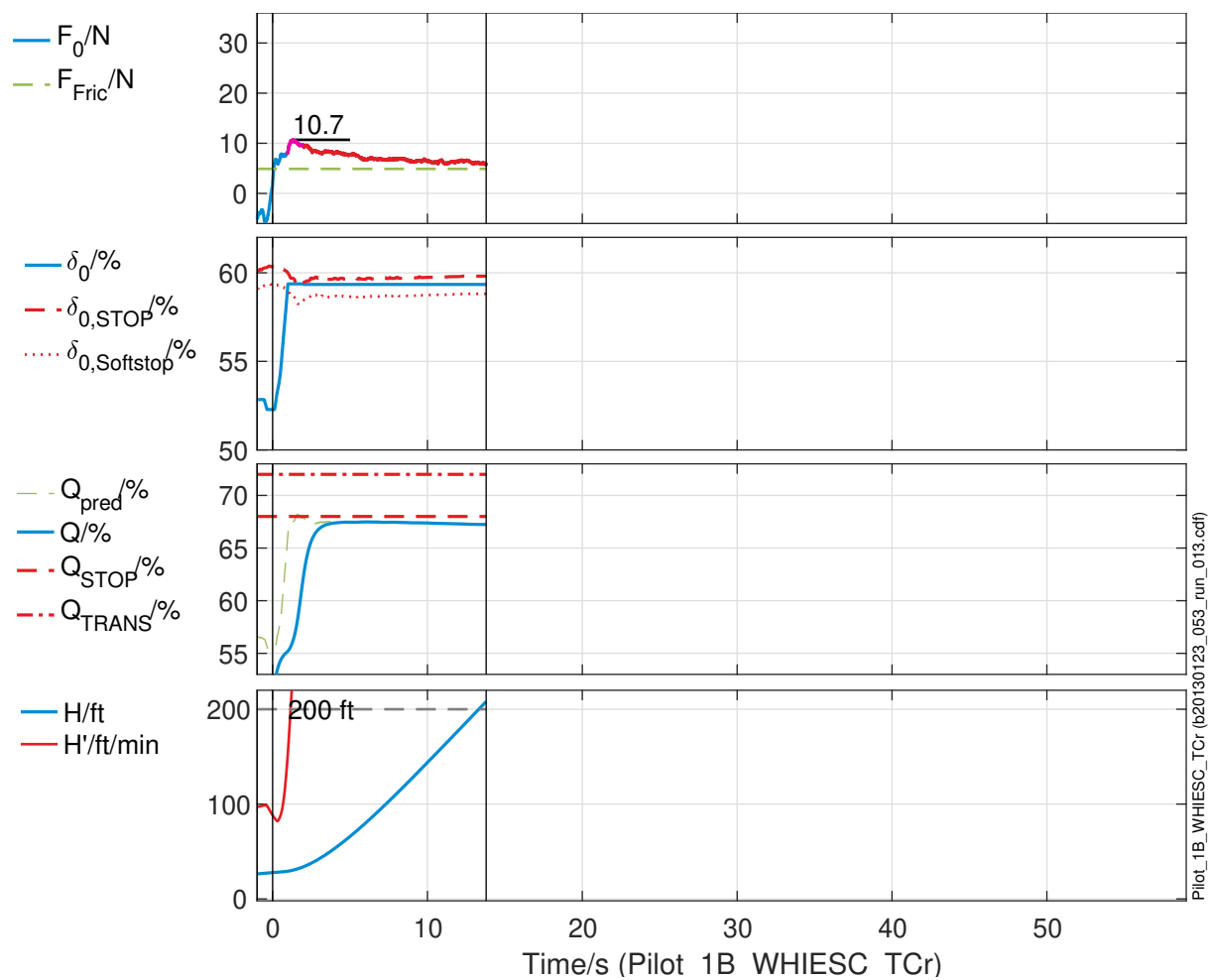


Abbildung B.6.: Pilot 1B, Whiteout-Escape, mit TC

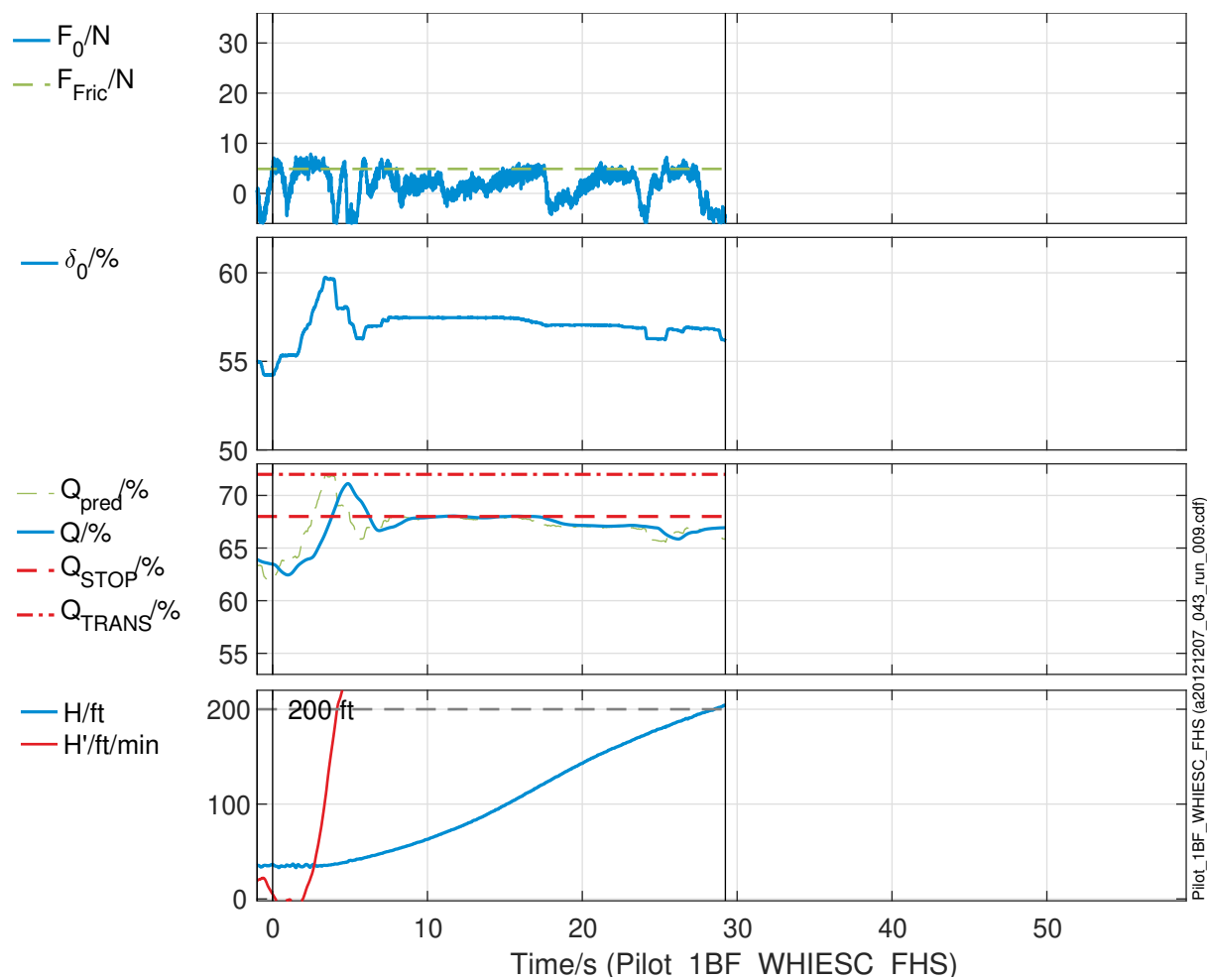


Abbildung B.7.: Pilot 1B, Whiteout-Escape, ohne TC, ACT/FHS

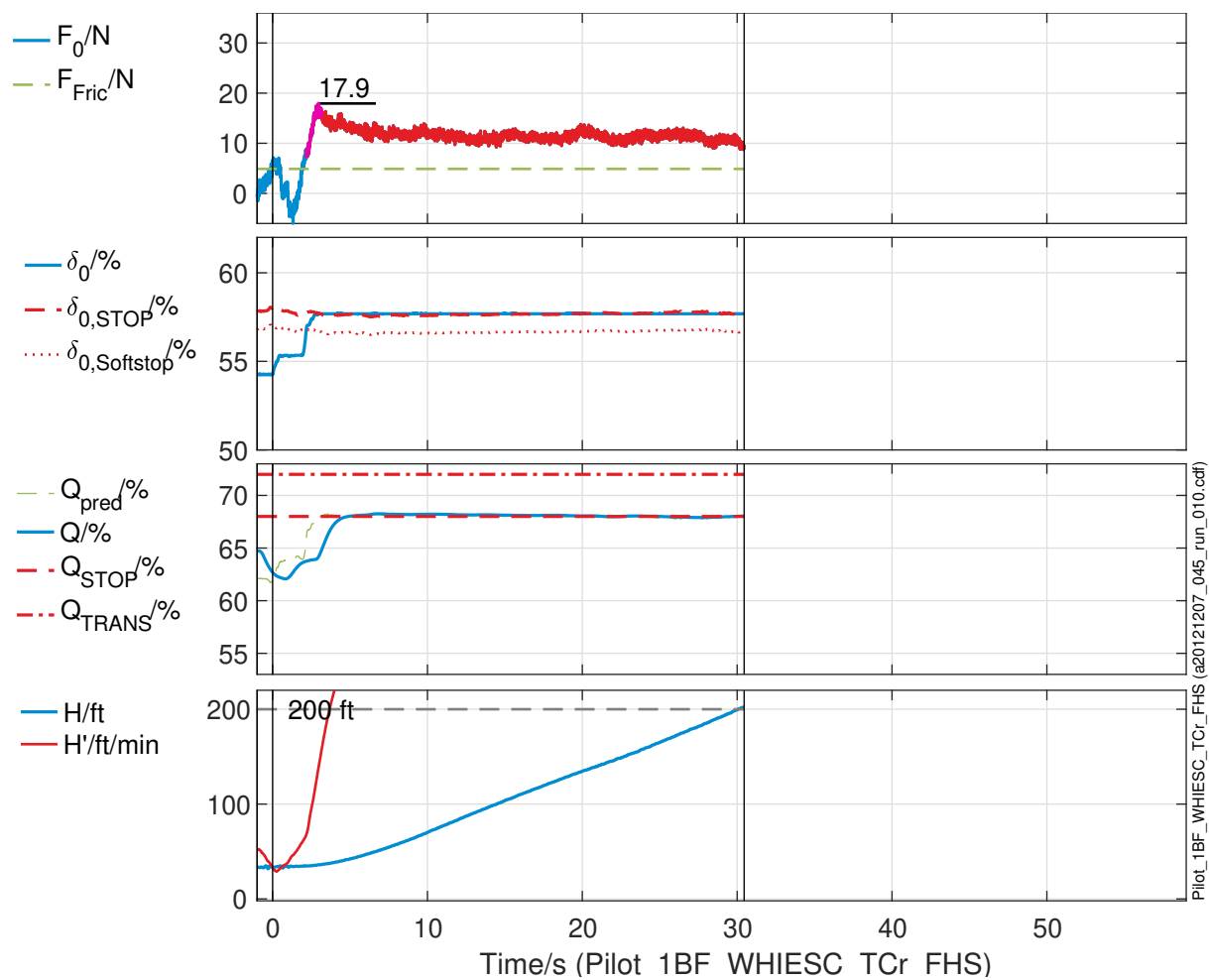


Abbildung B.8.: Pilot 1B, Whiteout-Escape, mit TC, ACT/FHS

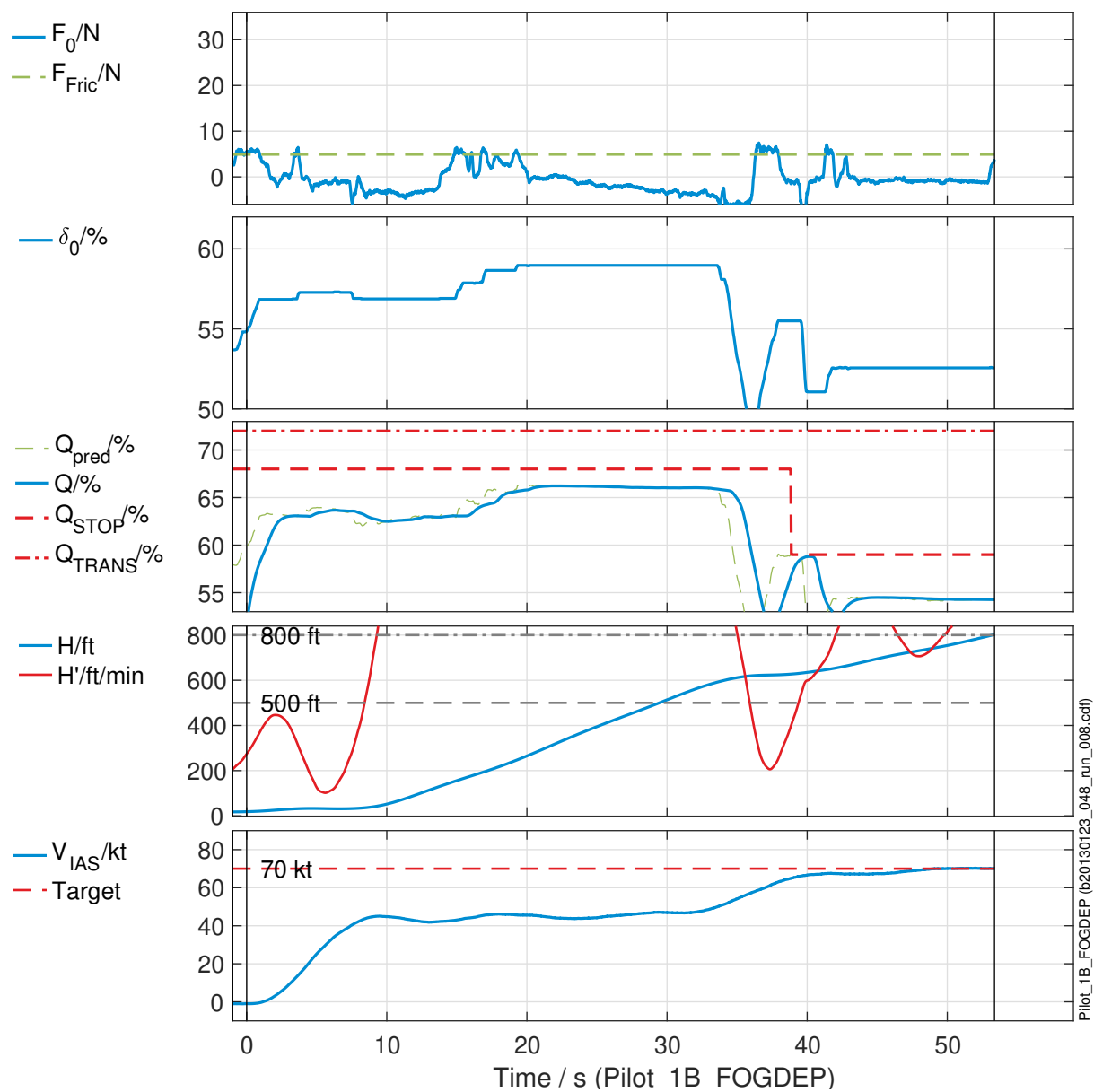


Abbildung B.9.: Pilot 1B, Fog-Departure, ohne TC

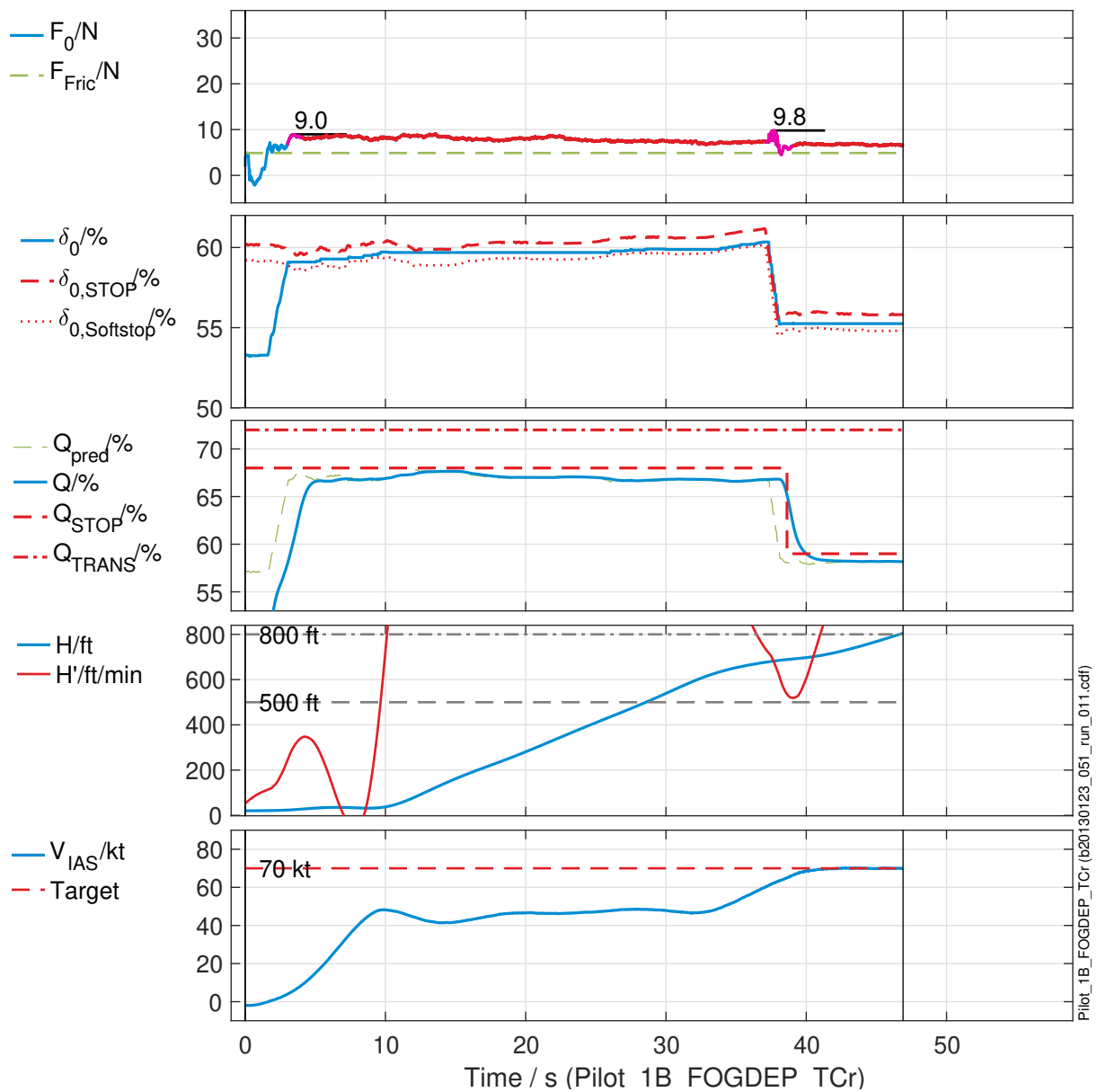


Abbildung B.10.: Pilot 1B, Fog-Departure, mit TC

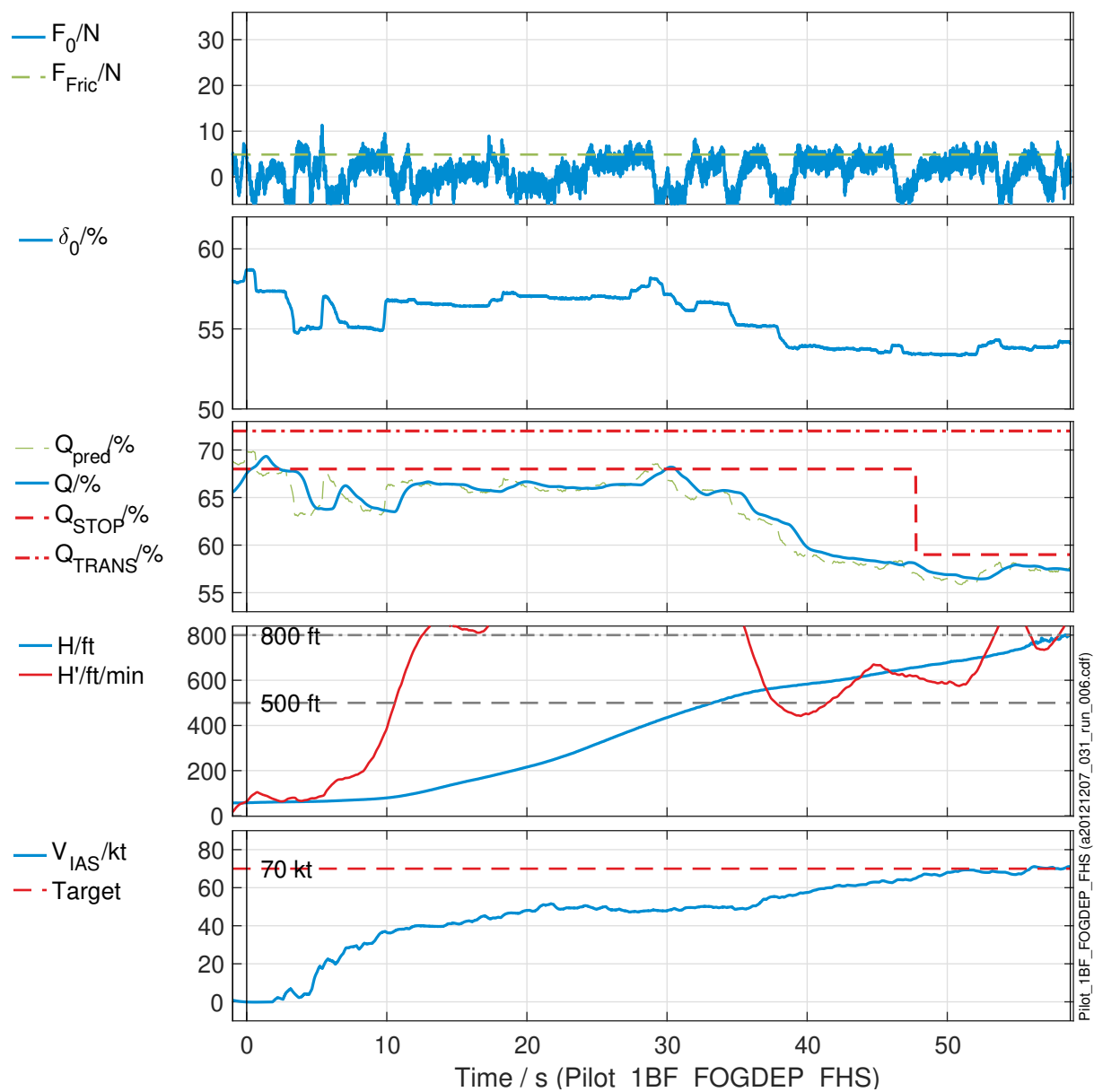


Abbildung B.11.: Pilot 1B, Fog-Departure, ohne TC, ACT/FHS

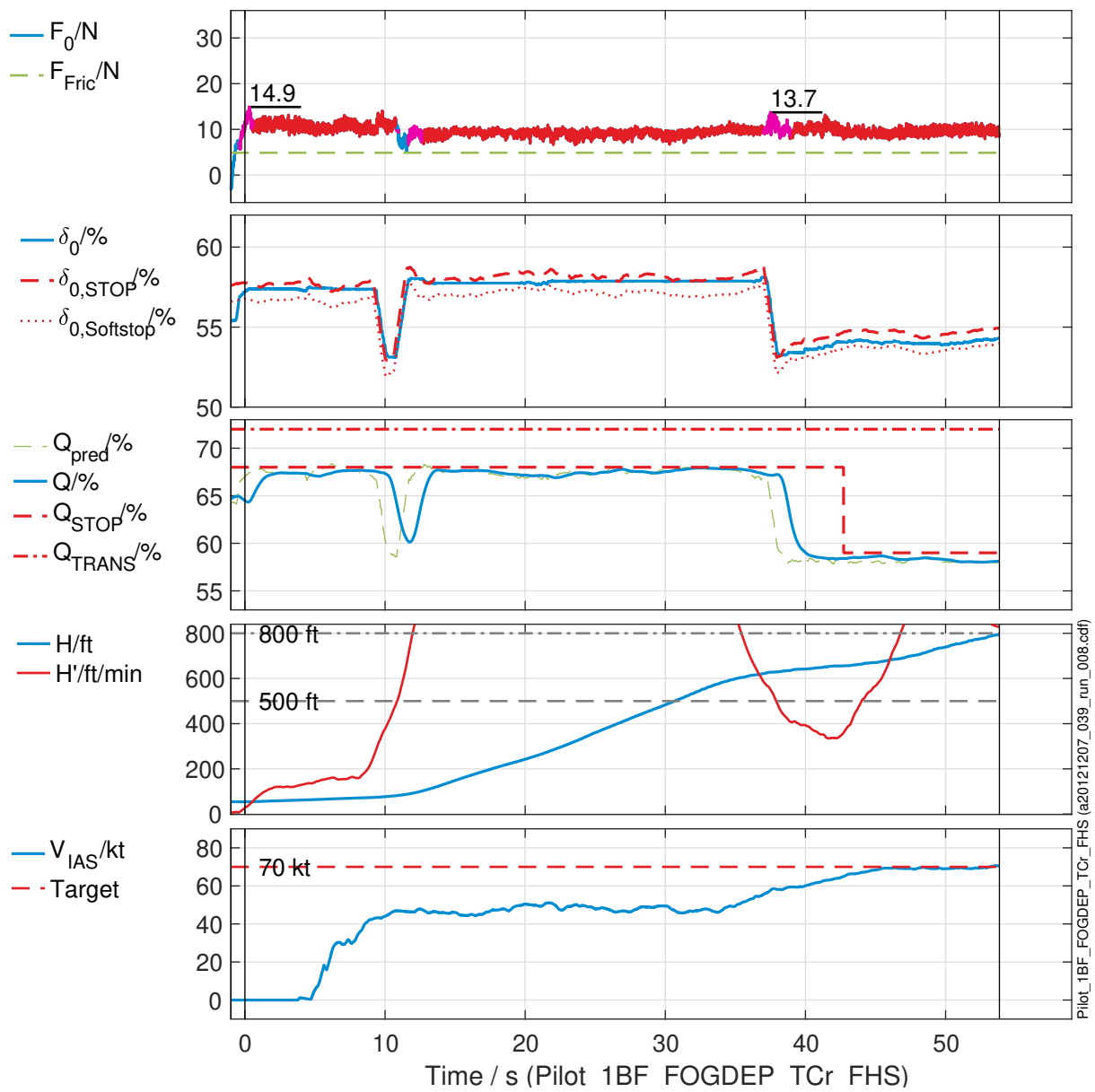


Abbildung B.12.: Pilot 1B, Fog-Departure, mit TC, ACT/FHS

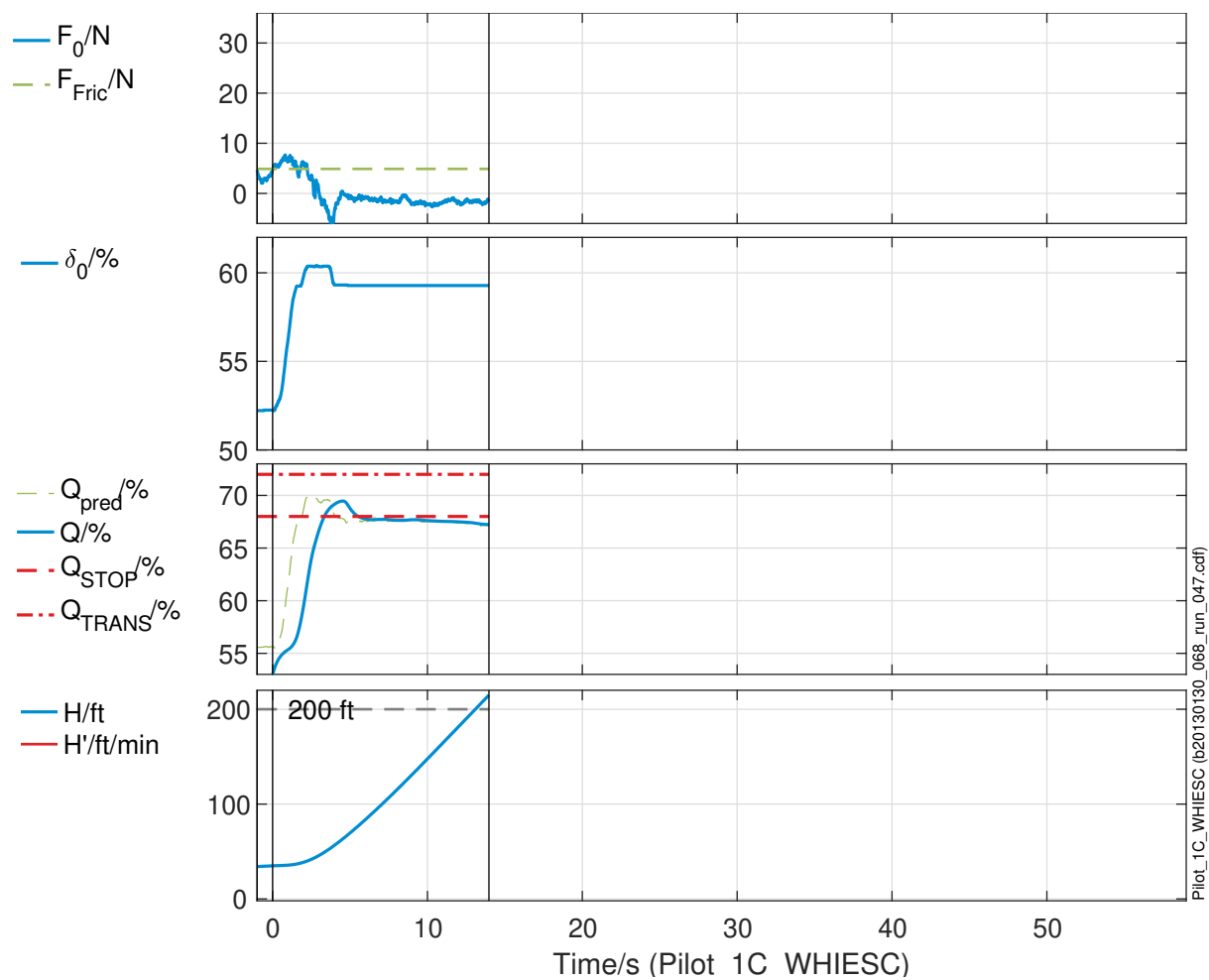


Abbildung B.13.: Pilot 1C, Whiteout-Escape, ohne TC

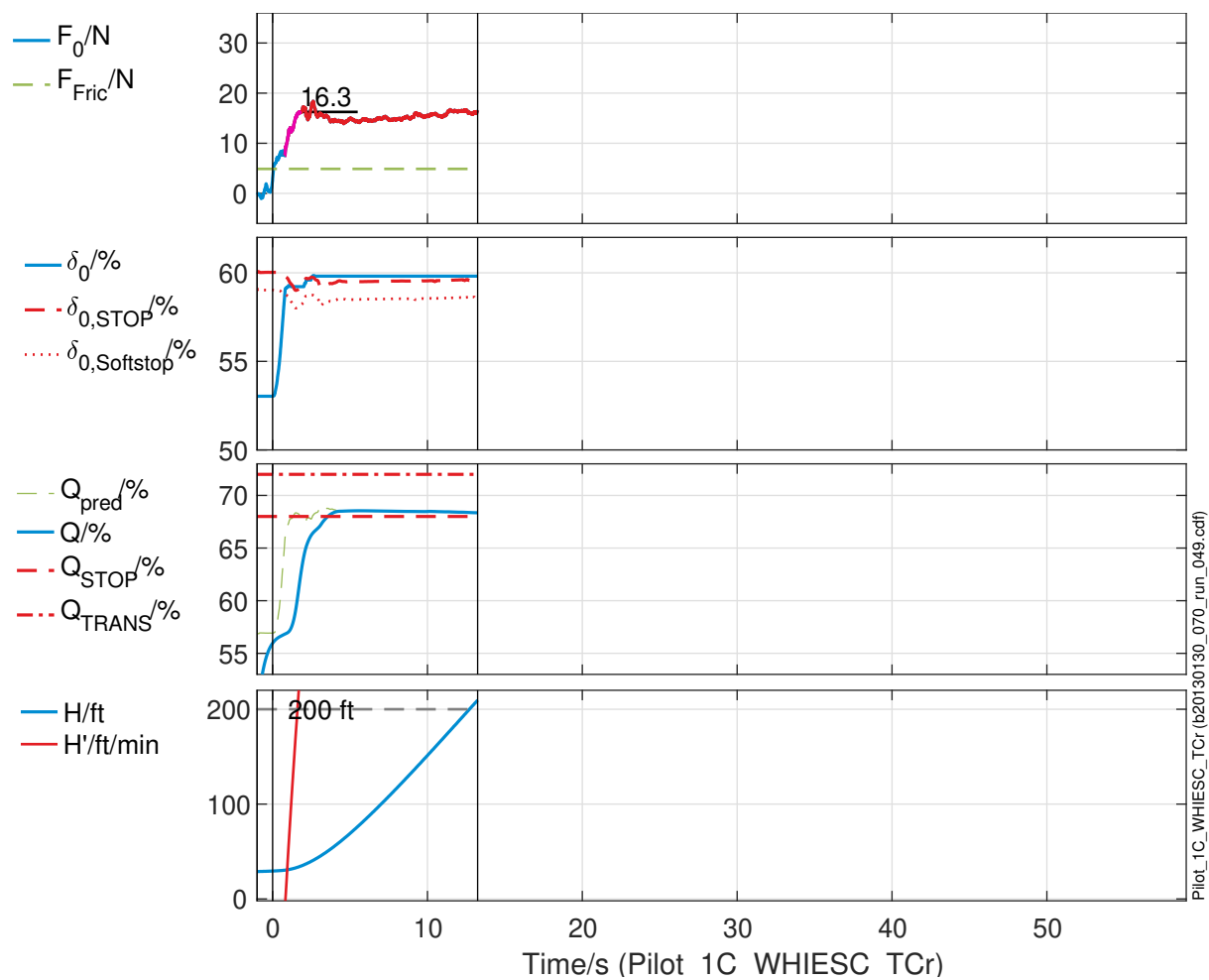


Abbildung B.14.: Pilot 1C, Whiteout-Escape, mit TC

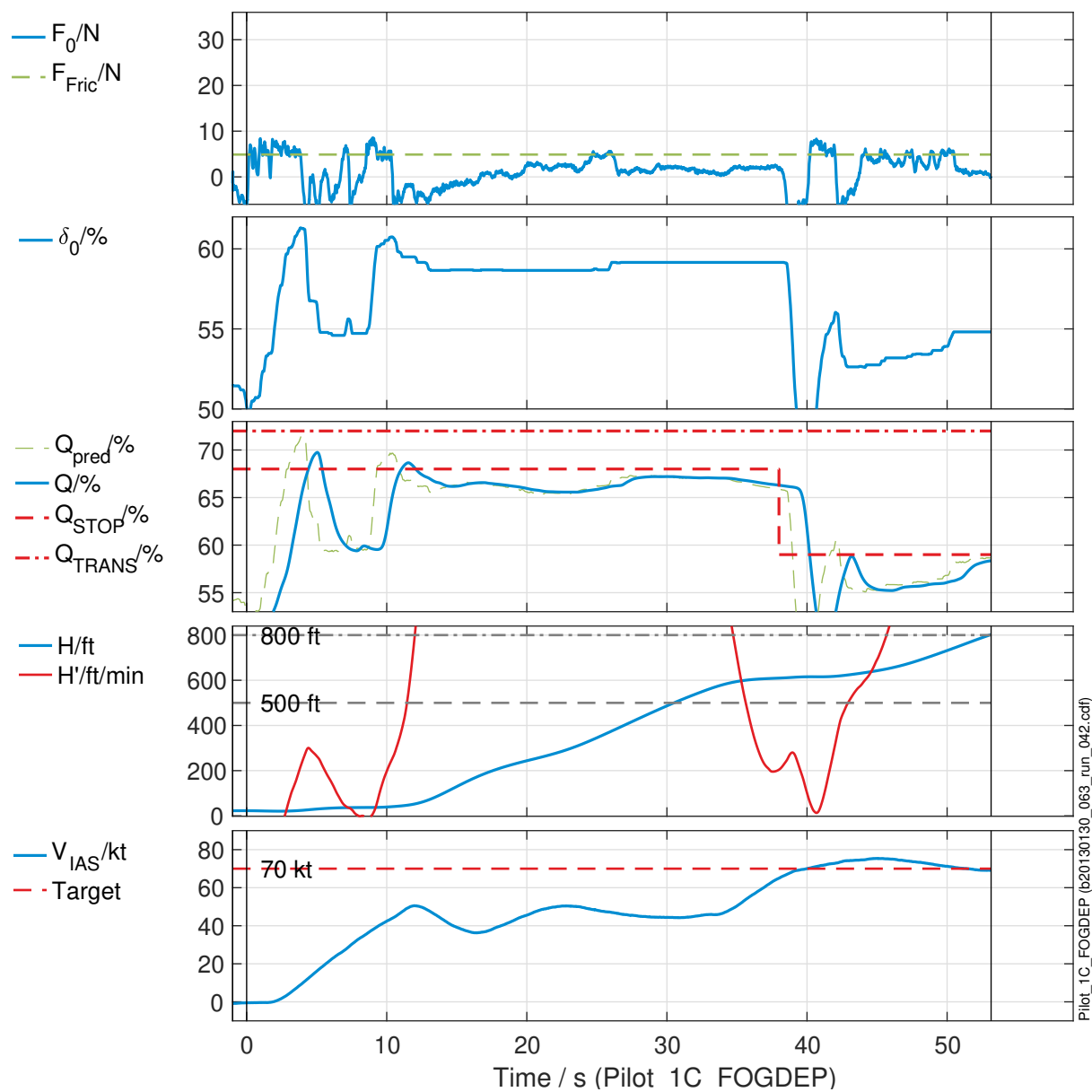


Abbildung B.15.: Pilot 1C, Fog-Departure, ohne TC

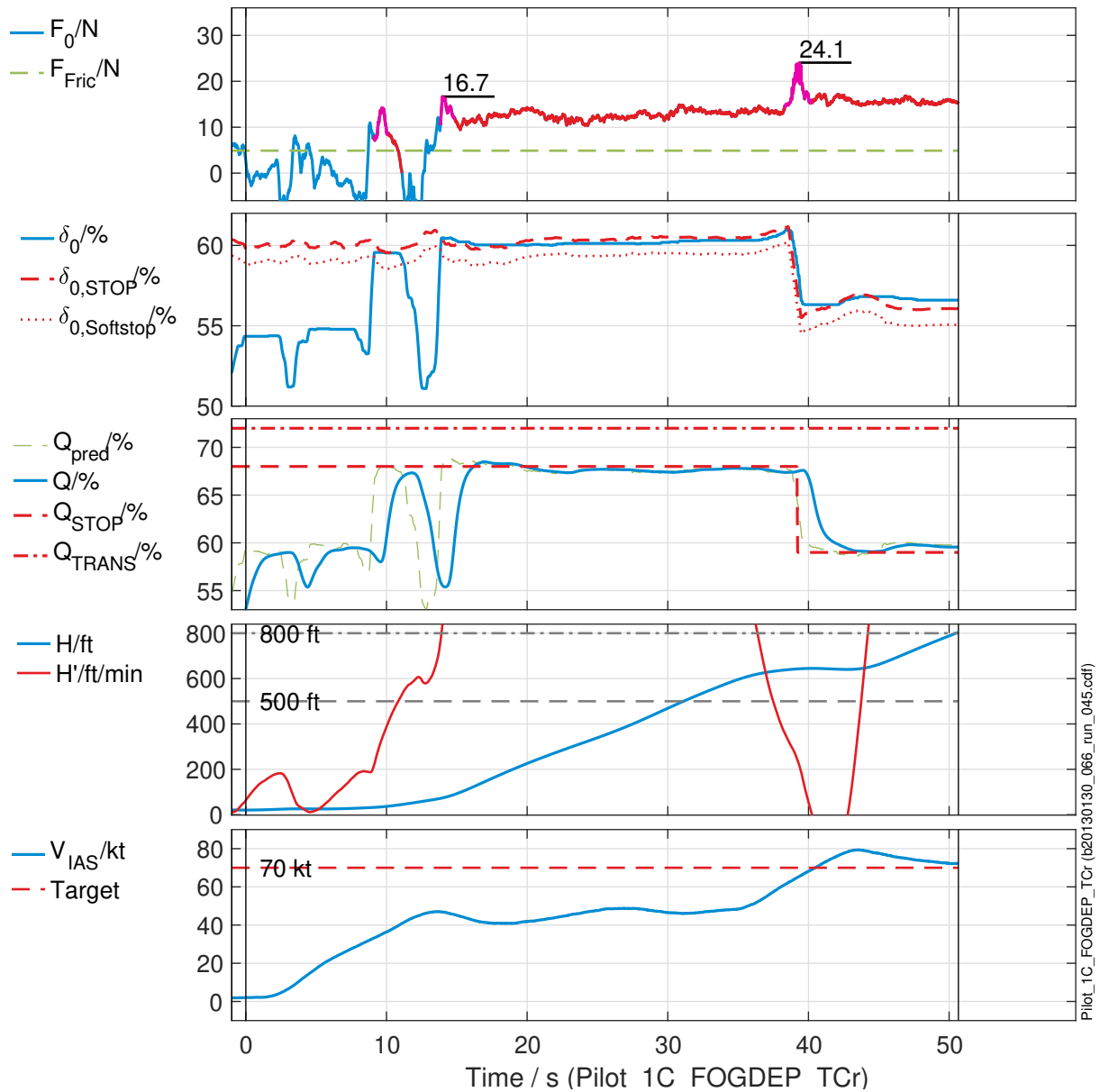


Abbildung B.16.: Pilot 1C, Fog-Departure, mit TC

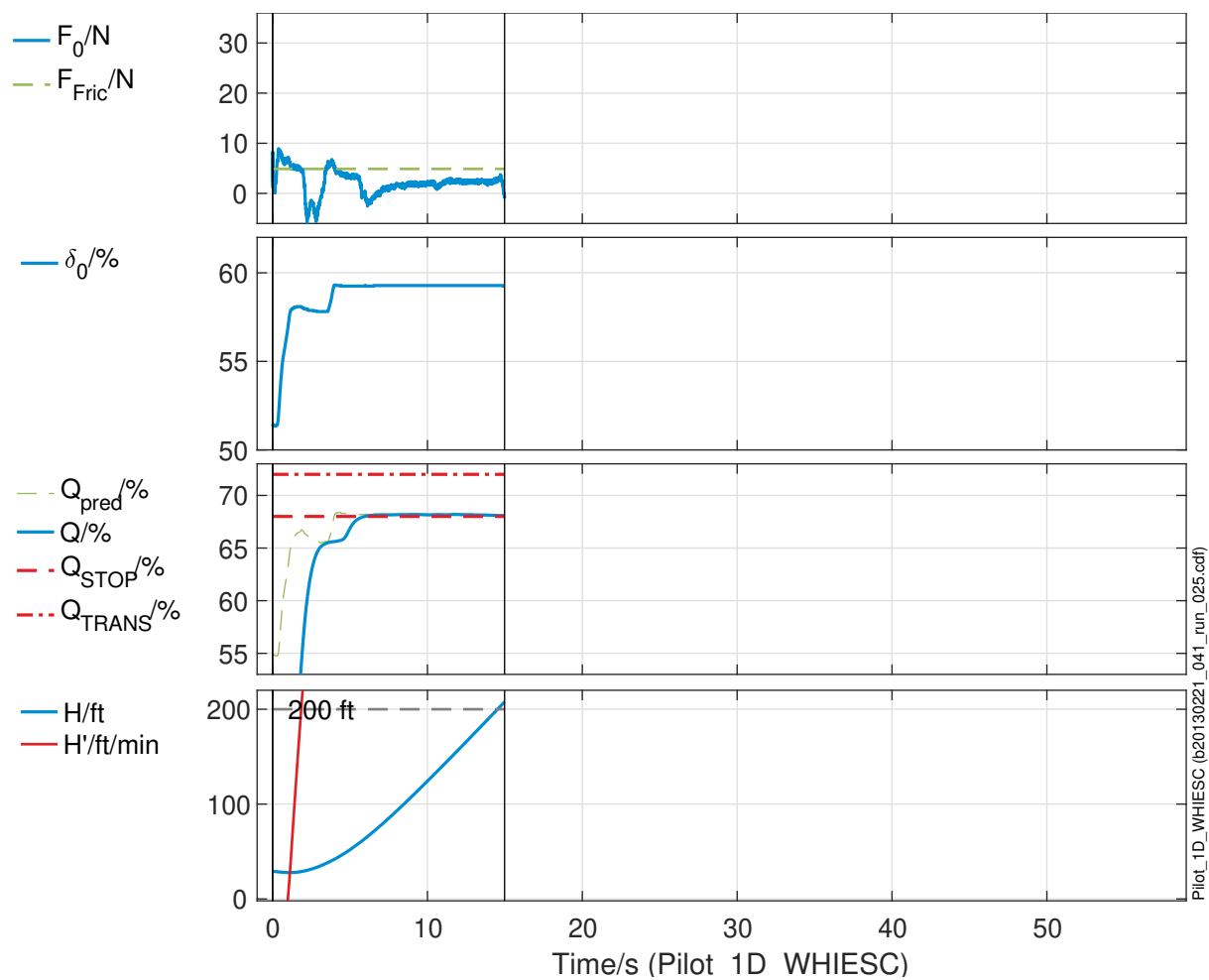


Abbildung B.17.: Pilot 1D, Whiteout-Escape, ohne TC

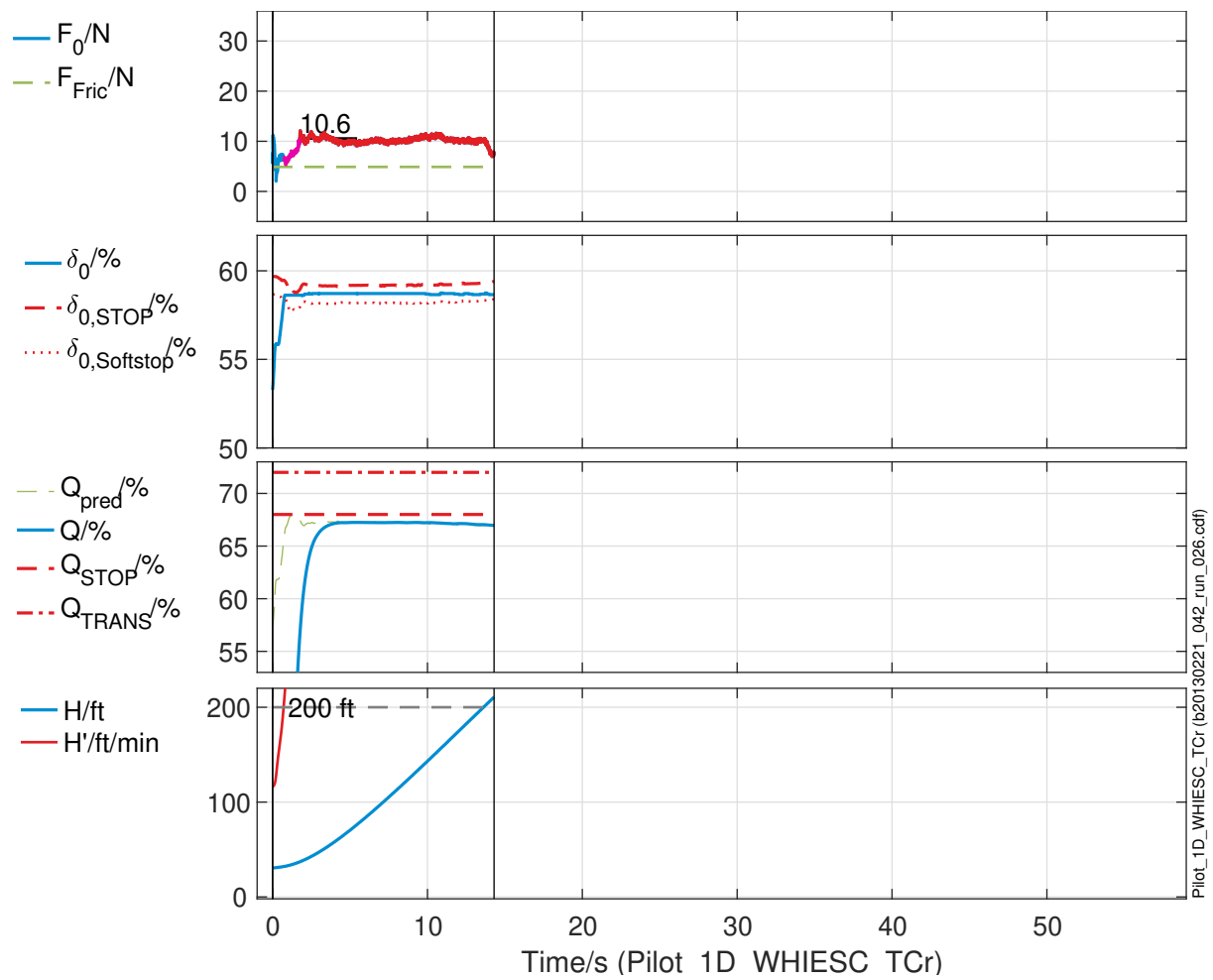


Abbildung B.18.: Pilot 1D, Whiteout-Escape, mit TC

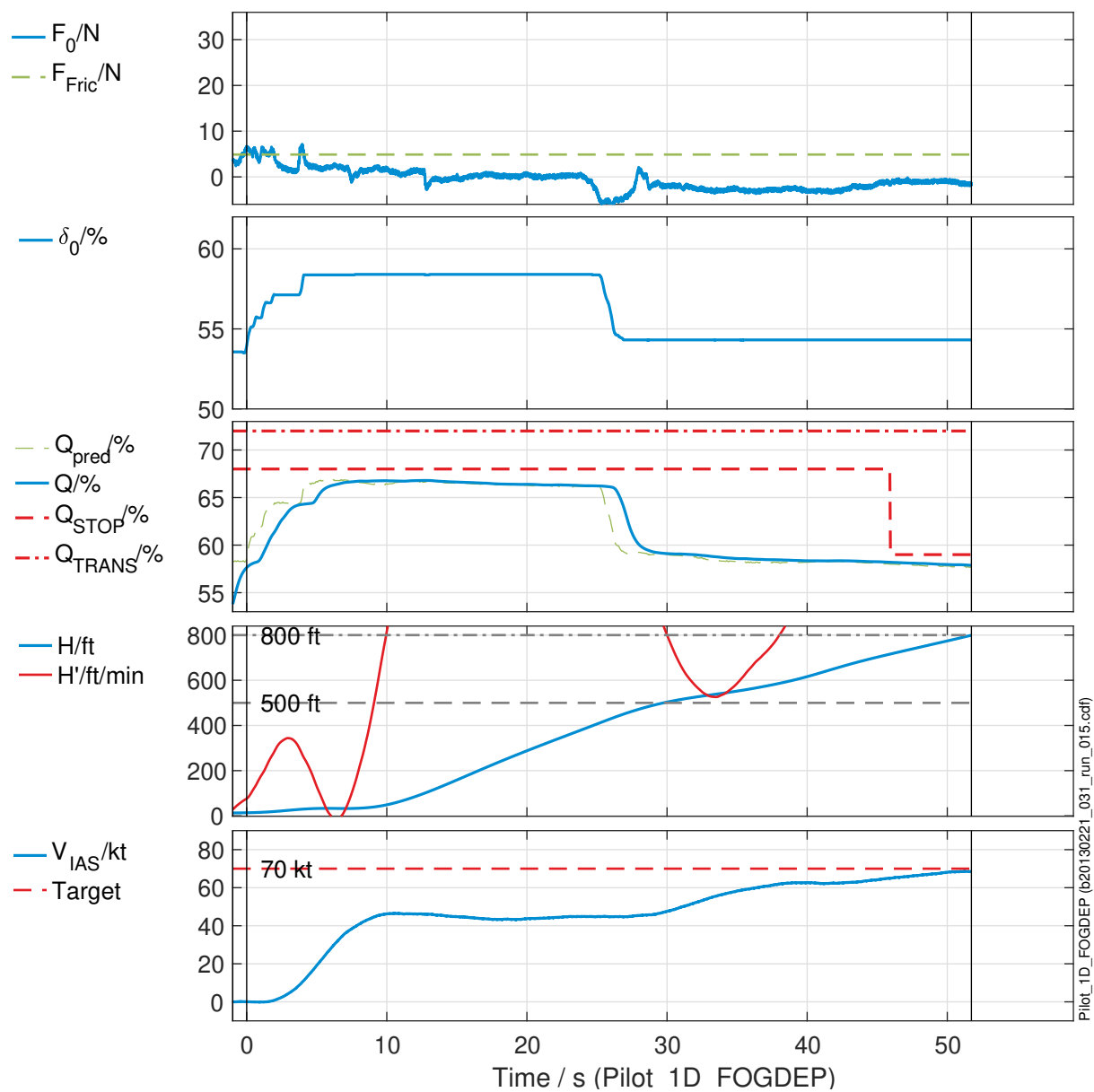


Abbildung B.19.: Pilot 1D, Fog-Departure, ohne TC

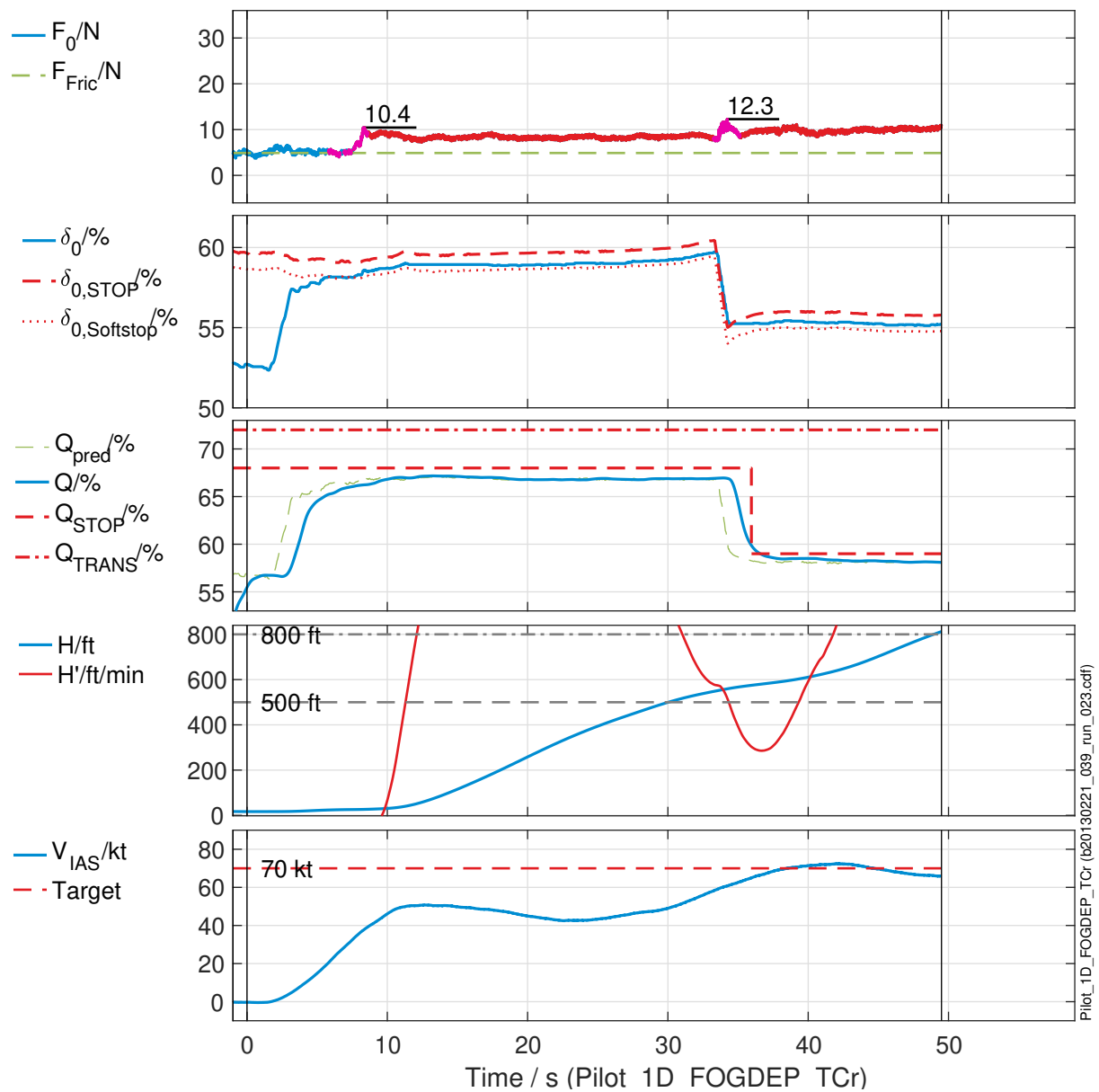


Abbildung B.20.: Pilot 1D, Fog-Departure, mit TC

C. Rohdaten Studie 2

An dieser Stelle stehen die verwendeten Fragebögen im Original-Layout mit den gesammelten Antworten und Kommentaren der Piloten. Die Fragebögen wurden in Papierform ausgefüllt und später abgeschrieben. Die im Hauptteil verwendeten Piloten-Aliase können mit Hilfe der Tabelle Piloten A zugeordnet werden. Dazu wird das Jahr des Versuchs und die im Fragebogen verwendete, in der Reihenfolge der Teilnahme vergebene laufende Nummer benötigt. In derselben Studie wurde neben der *Haptic Torque-Protection* auch ein *Tactile Cue* zur Kollisionsvermeidung erprobt. Die Fragen, welche sich auf die Kollisionsvermeidung beziehen, wurden hier entfernt. Jedoch kann es sein, dass noch Bezüge auf diese Funktion in einigen Pilotenkommentaren vorhanden sind. Die Veröffentlichung der Daten wurden vom Presse- und Informationszentrum Ausrüstung, Informationstechnik und Nutzung der Bundeswehr (PIZ AIN) freigegeben, jedoch mit der Auflage, bestimmte Stellen zu schwärzen. Zudem wurden modellspezifische Informationen entfernt, da diese nicht relevant für die Arbeit sind.¹

C.1. Teil 1

¹Die ungekürzten Fragebögen werden am DLR archiviert: MÜLLHÄUSER, Mario: Haptic Torque-Protection für Hubschrauber - Piloteninterviews (ungekürzt). DLR Interner Bericht. Braunschweig, 2025

Pilot: _____

Datum _____

A-2-03 Erwarten Sie, dass aktive Steuer den Piloten in den folgenden Bereichen unterstützen können...

...Torque
Regelung?

Bin überzeugt

1					
	2				
3					

neutral

Bin skeptisch

...Vermeidung von
Hindernis-
berührungen

Bin überzeugt

1					
	2				
3					

neutral

Bin skeptisch

Bemerkungen:

A-2-04 Wünschen Sie sich Kräfte an den Steuern, die in den folgenden Bereichen warnen können...

...Torque
Regelung?

Wünschenswert

1					
	2				
3					

neutral

Nicht
wünschenswert

...Vermeidung von
Hindernis-
berührungen

Wünschenswert

	1				
	2				
	3				

neutral

Nicht
wünschenswert

Bemerkungen:

1: Die Kräfte dürfen nicht die Feinfühligkeit beeinträchtigen.

A-2-05 Haben Sie Anmerkungen, Assoziationen zum Thema haptische Assistenz und den genannten Anwendungsfeldern?

Freitext:

1: A-2-04 Gerade wenn gewollt an ein Hindernis herangeschwebt werden soll, .z.B. Rettungsdienst oder auch Einsatz mit Spezialeinheiten usw. [bezogen auf Obstacle Avoidance]

Pilot: _____

Datum _____

B-1-04 Ich könnte mich an eine Steuerung mit den Sidesticks gewöhnen.

Trifft voll zu

1					
2					
3					

Trifft gar nicht zu

neutral

Bemerkungen:

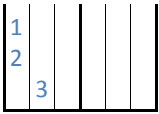
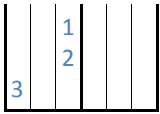
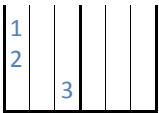
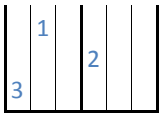
Pilot: _____

Datum _____

4. Teil C Torque Protection

Haptic FLI / Torque Protection – Erster Eindruck

C-1-01 Wie ist Ihr erster Eindruck vom Torque-Assistenten?

Konzept 1 - Reibungsstufe mit Softstop	Konzept 2 - Raste mit Softstop
Sehr angenehm  Sehr störend neutral	Sehr angenehm  Sehr störend neutral
Intuitiv verständlich  Nicht verständlich neutral	Intuitiv verständlich  Nicht verständlich neutral

Bemerkungen:

1: Konzept 1 gefällt mir besser, weil ich zu jeder Zeit merke, in welchem Bereich ich mich befinde. – bei 4 Nm [sic!, es sind aber Newton] im CP [Continuos Power] , bei 20 Nm [sic!] in der TOP [Takeoff Power]

Pilot: _____

Datum _____

Van der Laan – Skala
C-1-02 Wie würden Sie die beiden Konzepte des Torque-Assistenten bewerten?

Konzept 1 - Reibungsstufe mit Softstop		Konzept 2 - Raste mit Softstop		
Nützlich	1 2 3	Nutzlos	1 2 3	Nutzlos
Angenehm	1 2 3	Unangenehm	1 2 3	Unangenehm
Schlecht	1 2 3	Gut	1 2 3	Gut
Nett	1 2 3	Nervig	1 2 3	Nervig
Effizient	1 2 3	Unnötig	1 2 3	Unnötig
Ärgerlich	1 2 3	Erfreulich	1 2 3	Erfreulich
Hilfreich	1 2 3	Wertlos	1 2 3	Wertlos
Nicht wünschenswert	1 2 3	Wünschenswert	1 2 3	Wünschenswert
Aktivierend	1 2 3	Einschläfernd	1 2 3	Einschläfernd

Bemerkungen:

1: s.o. Bemerkung C-1-01

b.w.

Pilot: _____

Datum _____

Torque Protection – Teil 2**C-2-01** Welches Element zur Anzeige der Torque Protection halten Sie für sinnvoll?

- ☐ keine Hilfsmittel an dieser Stelle
☐ Reibungsstufe 1, 2
☐ Raste 3
☐

Bemerkungen: _____

C-2-02 Welches Element zur Anzeige eines drohenden Overtorques halten Sie für sinnvoll?

- ☐ kein Hilfsmittel an dieser Stelle
☐ Softstop 1
☐
☐ Shaker 2

Bemerkungen: _____

C-2-03 Auf Basis der gewonnen Eindrücke: Erwarten Sie, dass aktive Steuer den Piloten bei der Torque-Regelung unterstützen können?

Bin überzeugt

1					
2					
3					

Bin skeptisch

neutral

Bemerkungen: _____

C-2-04 Abschließend: Wünschen Sie sich Kräfte an den Steuern, die vor einem Overtorque warnen könnten?

Wünschenswert

1					
2					
3					

Nicht
wünschenswert

neutral

Bemerkungen: _____

C-2-05 Welche weiteren Anmerkungen haben Sie zur haptischen Torque-Protection nach den hier gemachten Erfahrungen? Was muss verbessert werden?

Freitext:

- 1: Das Konzept 1 ermöglicht es, ständig nach draußen zu schauen und trotzdem immer zu wissen, in welchem Leistungsbereich ich mich befinde. Die Korrektur, wenn der Leistungsbereich überschritten wird, ist sehr hilfreich – immer unter dem Aspekt "Die Augen draußen zu halten" und damit viel Konzentration auf die Hindernissituation lenken zu können.
- 2: Sehr hilfreiche Unterstützung – gibt ein "Gefühl" über den TRQ-Bereich
- Gefahr von Fehlinterpretation bei anderen LfzTypen?
- 3: Sehr hilfreich, sofern die Technik einen "Reifegrad" erreicht, welche einen Fehlinformation bzw. -anzeige nahezu ausschließt (erklärend zu Pkt. C-2-03 und C-2-04)
=> deshalb keine Kreuze beim "Max. Ausschlag" zum Positiven hin.

Pilot: _____

Datum _____

6. Teil E Debriefing/Interview

Debriefing

E-1-01 Wie lautet Ihr Fazit zum Thema?

...Aktive
Steuer

Freitext:

- 1: schnelle Eingewöhnung, lassen sich gut bedienen, gute Alternative.
- 2: Sehr positiver Eindruck
- 3: interessante Weiterentwicklung

...Torque
Protection

Freitext:

- 1: sehr gute Ergänzung, speziell das Konzept 1 ermöglicht hohe Aufmerksamkeit nach "draußen"
- 2: sehr hilfreich, ich kann fühlen, in welchem TRQ-Bereich ich bin
- 3: empfehlenswert

...Obstacle
Avoidance

Freitext:

- 1: Ticker ist tauglich, sollte noch verbessert werden – wie besprochen.
- 3: unbedingt

E-1-02 Welche Funktionen wünschen Sie sich noch?

Freitext:

- 1: -
- 3: evtl. Haptik mit Akustik zu kombinieren

E-1-03 Haben Sie allgemeine Anmerkungen zum Ablauf der Studie?

Freitext:

- 1: Der Ablauf der Studie am heutigen Tag war gut aufgeteilt und von der Belastung her gut zu erledigen.
- 2: sehr entspannte Atmosphäre
- 3: Danke für das sehr angenehme Umfeld vor Ort und der Mitarbeiter

E-1-04 Haben Sie allgemeine Anmerkungen zum Simulator?

Freitext:

- 1: Der Simulator ist realitätsnah und für diese Art der Versuche tauglich.

E-1-05 Würden Sie auch an weiteren Studien teilnehmen?

Freitext:

- 1: ja
- 2: Ja
- 3: Ja, gerne wieder

Vielen Dank für Ihre Teilnahme!

C.2. Teil 2

Bei den in den Fragebögen angegebenen Piloten-Nummern von 1 bis 8 handelt es sich um die laufende Nummerierung der Studie 2015. Mit Hilfe der Alias Tabelle im Anhang A können diese den in dieser Arbeit verwendeten globalen Aliasnamen zugeordnet werden: Pilot 2015-1 ist ein Alias von Pilot 2D. Dies ist der für die *Haptic Torque-Protection* relevante Teil des Fragebogens, der auch Fragen zur Obstacle Avoidance beinhaltet, welche im Anschluss an die *Haptic Torque-Protection* erprobt wurde.

Pilot: _____

Datum _____

A-2-03a

Erwarten Sie, dass aktive Steuer den Piloten bei der Torque-Regelung unterstützen können?

Bin überzeugt

1				
2				
3				
4				
5				
6				
7				
8				

Bin skeptisch

neutral

Bemerkungen:

6: u.U. zu klinisch, Overrule muss jederzeit gewährleistet sein

7: Das würde helfen in brenzlichen (sic) Situationen rausgucken zu können!

A-2-03b

Wünschen Sie sich Kräfte an den Steuern, die vor einem Overtorque warnen könnten?

Wünschenswert

1				
2				
3				
4				
5				
6				
7				
8				

Nicht wünschenswert

neutral

Bemerkungen:

5: Vibrationen und kurzzeitig überdrückbare Stops ok

7: immer mit der Möglichkeit, dennoch zu überziehen (wenn nötig)

A-2-05

Welche weiteren Anwendungsgebiete sehen Sie?

Freitext:

Pilot 5 Mast Moment Warnung, Lastvielfachenwarnung, Hostile Fire, Training Limits OEI, AEO

Pilot 6 Unterstützung in der Flugführung, z.B. im Bereich IMC, Track-Interception (FinalCourse)

Pilot 7 Warnung vor zu großen Steuereingaben (Dämpfung+Feedback) ggf.

Wachmacher (Lange Zeit ohne Eingabe -> opt./haptisch/Vibration)

Pilot 8 Erreichen von Grenzwerten, wie: Winchlimits/Ship Helicopter Operating Limits, Vortex Ring State, Mindesthöhen

A-2-06

Haben Sie Anmerkungen, Assoziationen zum Thema haptische Assistenz und den genannten Anwendungsfeldern?

Freitext:

Pilot 3 Wie sieht es mit den Pedals aus? Bsp. Gierbewegung in enger confined area (bspw. SAR Mission).

Pilot: _____

Datum _____

Pilot 5 Derzeit ist im [...] ein Mechanismus verbaut, der die automatische Folgetrimmung in der Collective-Achse aussetzt, wenn der Bereich der Maximum Continuous Power erreicht wird. Dadurch erhöht sich der Steuerwiderstand im Collective durch die Federpakete der Trimmotoren in Relation zur Steueramplitude. Daraus entsteht jedoch nur ein unzureichendes haptisches Feedback.

Pilot 6 z.Zt. keine

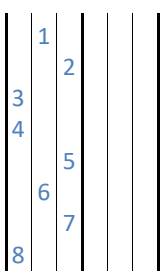
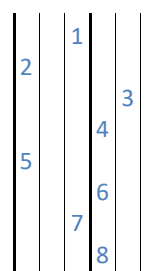
Pilot: _____

Datum _____

4. Teil D Torque Protection

Haptic FLI / Torque Protection – Erster Eindruck

D-1-01 Wie ist Ihr erster Eindruck vom Torque-Assistenten?

Konzept 1 - Reibungsstufe mit Softstop	Konzept 2 - Raste mit Softstop
Intuitiv verständlich  neutral Nicht verständlich	Intuitiv verständlich  neutral Nicht verständlich

Bemerkungen:

Pilot 3 "Zu Konzept 2: Raste hilft dem LFF und erklärt sich von selbst, allerdings beim Senken des COL ist die Raste hinderlich, da Lstg. nicht in vollem Band des gelben Bereichs nutzbar. (Zeichnung) -Softstop (sic!), [es ist ein Detent!, Anm. MM] zieht den COL in das Loch um die Position x.

[Pilot gibt zwei Ratings für B ab, davon wurde hier das schlechtere gewertet, da es sich auf die tatsächlich vorliegende Realisierung bezieht.]

Pilot 5 "Generell sollte ein Detent dort eingesetzt werden, wo ein first limit erreicht wird, welcher allerdings für einen längeren Zeitpunkt überzogen werden darf (z.Bsp. AEO Takeoff Power, 2,5 Minuten OEI Power, 30 Min PWR). In dieser Phase hat der LFF genug Zeit das Limit über den Blick auf die Instrumente oder in seinem HMS zu überwachen. Ein Vibrieren und ein in der Amplitude des Collectives stärker werdendes Cue sollte dann verwendet werden, wenn der LFF keine Zeit hat eine intensive optische Auswertung vorzunehmen und Triebwerkswerte erreicht werden, die nur kurzfristig geflogen werden dürfen (z.Bsp. 00:30 Sekunden Leistung) im Durchstarten oder bei Beschuss oder im Luftkampf.

Das Vibrieren sollte hochfrequenter werden, dafür weniger stark, um von den Vibrationen mit höheren Lastvielfachen unterscheiden zu können. "

Pilot 6 Raste mit Softstop scheint sehr gewöhnungsbedürftig, da Aufwand betrieben werden muss auch für -Tq

Pilot 7 "nach Bestätigung/Stop sollte die Steuerung wieder freigegeben werden (Nutzung des "roten Bereichs" zur Rettung der Besatzung/Mission ggf. unter Inkaufnahme der dauerhaften Beschädigung von Trw oder Kraftübertragungselementen) Die kurze Bremse zu Bereichsbeginn ist sehr gut.

Die Vibration und die starken Rückstellkräfte im gelben Bereich sind problematisch.

[Anmerkung: Im gelben Bereich gibt es keine Rückstellkräfte und Vibration. Diese beginnen erst im roten Bereich. Allerdings läuft die visuelle Anzeige nach. Wenn der Pilot

Pilot: _____

Datum _____

in dem Moment, in dem er den taktilen Cue spürt, auf die Anzeige schaut, kann er also den Eindruck gewinnen, die Cues würden bereits im gelben Bereich wirken. Schaut er lange genug, würde er sehen, dass die Anzeige dann noch bis an den roten Bereich heran weiterläuft und exakt dort stehen bleibt, wenn er am Tactile Cue bleibt.]

Pilot 8 Raste hat gefühlt einen großen Spalt (wirkt grobmotorisch)

Pilot: _____

Datum _____

Van der Laan – Skala
D-1-02 Wie würden Sie die beiden Konzepte des Torque-Assistenten bewerten?

Konzept 1 - Reibungsstufe mit Softstop		Konzept 2 - Raste mit Softstop	
Nützlich	1 2 3 4 5 6 7 8	Nutzlos	1 2 3 4 5 6 7 8
Angenehm	1 2 3 4 5 6 7 8	Unangenehm	1 2 3 4 5 6 7 8
Schlecht	1 2 3 4 5 6 7 8	Gut	1 2 3 4 5 6 7 8
Nett	1 2 3 4 5 6 7 8	Nervig	1 2 3 4 5 6 7 8
Effizient	1 2 3 4 5 6 7 8	Unnötig	1 2 3 4 5 6 7 8

Pilot: _____

Datum: _____

Ärgerlich	1 2 3 4 5 6 7 8	Erfreulich	Ärgerlich	2 3 4 5 6 7 8	Erfreulich
Hilfreich	1 2 3 4 5 6 7 8	Wertlos	Hilfreich	1 2 3 4 5 6 7 8	Wertlos
Nicht wünschenswert	1 2 3 4 5 6 7 8	Wünschenswert	Nicht wünschenswert	1 2 3 4 5 6 7 8	Wünschenswert
Aktivierend	1 2 3 4 5 6 7 8	Einschläfernd	Aktivierend	1 2 3 4 5 6 7 8	Einschläfernd
Ausgereift	1 2 3 4 5 6 7 8	Verbesserungs- würdig	Ausgereift	1 2 3 4 5 6 7 8	Verbesserungs- würdig

Pilot: _____

Datum _____

Einsatztauglich 3 2 4 6 8 1 5 7 Nicht einsatztauglich	Einsatztauglich 7 2 5 6 8 1 3 4 7 Nicht einsatztauglich
Warnend 4 5 6 7 8 nicht warnend	Warnend 6 7 8 4 5 nicht warnend
führend 4 5 7 8 6 nicht führend	führend 5 6 7 8 4 nicht führend
intuitiv 4 6 7 8 5 nicht intuitiv	intuitiv 5 7 8 4 6 nicht intuitiv

Bemerkungen:

Pilot 2 Anticipation required during acceleration - dependent on yellow acceleration cue.

Pilot 3 Siehe Seite 11 (Zu Konzept 2: Raste hilft dem LFF und erklärt sich von selbst, allerdings beim Senken des COL ist die Raste hinderlich, da Lstg. nicht in vollem Band des gelben Bereichs nutzbar. (Zeichnung) -Softstop (sic!), [Detent, Anm. MM] zieht den COL in das Loch um die Position x.)

Pilot 7 [Anmerkung: Pilot gibt je zwei Ratings ab. Eines bezogen auf die Positionierung "Cue bereits im gelben Bereich", siehe auch Kommentar in D-1-01 und eines zur "Anschlagsdarstellung", d.h. zur Art der Kraft. Da diese Frage auf die Art der Kraft abzielte, wurden die (bessere) Bewertung für die "Anschlagsdarstellung" ausgewählt.]

Pilot 8 Spalt der Raste zu groß (ergibt zu großen Rand)

b.w.

Pilot: _____

Datum _____

Torque Protection – Teil 2**D-2-01** Welches Element zur Anzeige der Torque Protection halten Sie für sinnvoll?

- ☐ keine Kräfte an den Steuern
 ☐ Reibungsstufe 4,5,6,7,8
 ☐ Raste 5,7
 ☐ Vibration 5

Bemerkungen:

Pilot 4 Raste könnte den Eindruck eines mechanischen Defekts erwecken.

Pilot 7 Keine Rückführung, die nicht durch Trim Release ausgeschaltet werden kann.

D-2-02 Auf Basis der gewonnen Eindrücke: Erwarten Sie, dass aktive Steuer den Piloten bei der Torque-Regelung unterstützen können?

Bin überzeugt

1				
2				
3				
4				
5				
6				
7				
8				

Bin skeptisch

neutral

Bemerkungen:

Pilot 7 äußerst sinnvoll

D-2-03 Abschließend: Wünschen Sie sich Kräfte an den Steuern, die vor einem Overtorque warnen könnten?

Wünschenswert

1				
2				
3				
4				
5				
6				
7				
8				

Nicht
wünschenswert

neutral

Bemerkungen: _____

D-2-04 Welche weiteren Anmerkungen haben Sie zur haptischen Torque-Protection nach den hier gemachten Erfahrungen? Was muss verbessert werden?

Freitext:

Pilot 1 Ich würde mir schon etwas vor Erreichen der Torquelimits einen haptischen Hinweis wünschen, ein Softstop nur an dem Grenzwert selbst schützt ggf. vor einem Overtorque nicht. Die verschiedenen Torquelimits (z.B. OEI-Betrieb) müssen gesondert betrachtet werden.

Pilot 3 s.S. 11

Pilot: _____

Datum: _____

Pilot 4 Die Reibungsstufe sollte etwas geringer ausfallen. Darüber hinaus sollten die haptischen Unterstützungen abschaltbar sein.
 Pilot 5 Vibrationen müssen hochfrequenter werden, um diese von Rotorvibrationen bei zunehmendem Lastvielfachen deutungssicherer zu haben.
 Pilot 6 Raste noch zu hinderlich, gerade bei -Tq Eingaben. Scheint als Hindernis, leider auch nach unten (-Tq)
 Pilot 7 Trim Release muss die aktive Rückführung beenden.
 Pilot 8 auch für OEI Ops
 Spalt bei Raste kleiner (dämpfen) [Anmerkung: Dämpfung alleine ist nicht der richtige Parameter, könnte aber in Zusammenhang mit einem engeren Detent richtig sein]

D-2-05 In welchen Situationen, bzw. bei welchen Manövern erwarten Sie durch tactile cueing für Torque Protection einen Benefit gegenüber dem State-of-the-Art? Wie ist der State-of-the-Art auf Ihrem Einsatzmuster? Ggf. auf Zusatzblatt weiterschreiben.

Freitext:

Pilot 1 Eigentlich in fast jeder Situation könnte so ein System Vorteile bringen, in der der Pilot hauptsächlich auf Außensicht angewiesen ist bzw. kann das System die Notwendigkeit der Überwachung der Torqueinstruments erleichtern(besonders bei Start und Landung und in kritischen Flugsituationen).
 Pilot 3 "0/0 Takeoff in IMC
 IFR Goaround mit Lfz ohne automatische Go-Around-Fkt."
 Pilot 4 Beim [...] gibt es bereits eine elektrohydraulische Simulation von "Federpaketen" (Force Trim), jedoch lassen sich dabei keine Limits erkennen. Dieses wäre gerade neben der optischen Anzeige wünschenswert.
 Pilot 5 "State of the Art [...]: optische und akustische Warnungen, [...].
 Automatische Folgetrimmung im Collective wird bei Erreichen von der Normalleistungsgrenze deaktiviert, so dass die Crew gegen einen ansteigenden Federpaketwiderstand den Collective ziehen muss."
 Pilot 6 "Hot & High
 Gebirgsflug mit Lasten
 Transfer IMC (VFR-IFR)
 Brownout & Whiteout Go-arounds
 Single Engine Operation
 [...]
 Pilot 7 4-Achsen-AP, der auch aktiv korrigiert, wenn keine Upper Modes aufgeschaltet sind.

D-2-06 Welche Kriterien gelten dabei?

Freitext:

Pilot 4 Neben der "Continuous Power" gibt es ein 30 Minuten Limit, sowie ein 10 sek transient power limit.
 Pilot 6 "haptisches Erkennen des "normal use" limits für Initial Actions
 Hinweise, dass im Bereich "Continuos"/"Maximum" gearbeitet wird

Pilot: _____

Datum _____

"Alarmsignal", wenn Limit (max) überschritten sind."

D-2-07 Bei welchem der gezeigten Prototypen für die Torque Protection ist die Dringlichkeit deutlich geworden?

Freitext:

Pilot 4 Ich fand die Reibungsstufe eingehender.

Pilot 7 beide

Pilot: _____

Datum _____

6. Teil G Debriefing/Interview

Debriefing

G-1-01 Auf der Basis der gewonnenen Eindrücke, welches Potential sehen Sie für haptische Pilotenunterstützung (tactile cueing) im Kontext der militärischen Hubschrauberfliegerei bei der Bundeswehr?

Nennen Sie konkrete Situationen, Missionen, Manöver oder Vorfälle (selbst erlebt oder vom Hörensagen), in denen sich tactile cues positiv auf die Durchführbarkeit, Sicherheit und Reduktion der Arbeitsbelastung auswirken könnte.

- a. Beschreiben Sie diese möglichst genau.
- b. Welche Hilfsmittel haben Sie dazu bisher zur Verfügung (FTO, Anzeige, Gong, Gefühl)
- c. Wie sollte die Unterstützung aussehen? Was soll die haptische Assistenz tun?
- d. Welche anderen Hilfsmittel wünschen Sie sich?

- z.B.
- i) Schiffsdecklandung, bisher mit FTO, jetzt mit haptische Obstacle Avoidance
 - ii) Wüstenlandung mit Brownout
 - iii) Startverfahren
 - iv) Notverfahren, z.B. OEI nach Engine Fire

Freitext:

Pilot 3 Favorisiere das Einfache, z.B. kein Mesh in 500 ft Höhe.
Immer nur das, was nötig ist.
Immer abschalten können.
Militärischer Auftrag steht im Vordergrund: Pilot soll entscheiden können, welche Assistenz an ist.
Torque Protection abschaltbar: sonst störend beim Fliegen im Grenzbereich. --> Missionsabhängig.
Es gibt Leute, die wollen das nicht.
Freie Entscheidung muss da sein.

Torque Protection: Raste nach unten nicht notwendig. Evtl. mit Displaymodifikation: Aufblinken des gelben Bereichs.

Abschaltbar: Warnen und wegschalten.
FLI: auch in Helm, monochrom
Auch bei [...] wechselt der zulässige TRQ geschwindigkeitsabhängig: geht in Overtorque beim Überrollen, weil Heckrotor weniger TRQ/Leistung benötigt.
--> Overtorque an den Inputs der Hauptgetriebe [...]

Pilot: _____

Datum: _____

Überraschend gut fand ich den Sidestick, sowie Cyclic als auch Collective, wobei Collective beim [...] schon sehr ähnlich von der Anordnung, Weg ist [aber] größer.
 Positiv überrascht, Sitzposition angenehmer. Sicht auf Instrumente besser.
 Könnte Sichteinschränkend sein [Seitenfenster?]
 Pilot 6 "Übergang von VFR zu IFR im IMC eine haptische Unterstützung Tq-Protection und Heading Reference, um ein "Wegdrehen" im IMC zu vermeiden.
 Anflugverhalten von einem IP zur LZ mit Unterstützung, um ein Abdriften vom Desired Track zu vermeiden [Landepunkt/Landezone?]"

G-1-02 Welche Funktionen wünschen Sie sich noch (siehe auch G-1-01)? Ggf. separat auf der Rückseite beschreiben. Bewerten Sie das Potential der Funktionen. Nehmen Sie eine relative Priorisierung von 1 (höchste) bis n (niedrigste) Priorität vor

Funktion									Priorität
IFR Turn/Bank angle	relevant				3		4		
					5				
					6				
					7				
		8							
Torque Protection	relevant	3							
		4							
		5							
		6							
		7							
		8							
Sinkrate Protection	relevant	3							
				5					
		7			6				
		8							
Obstacle Avoidance	relevant	4		3					
			6				5		
		7							
							8		
Mastmoment	relevant		5						
					6				
				7					
				8					
CFIT	relevant	3							

Pilot: _____

Datum _____

Hostile Fire		5						
0-Drift-Position Hover			5					
Desired Track		6						
Follow Mode*		8						
		neutral						

Freitext:

* Follow Mode zu externem Object mit coupled Hover

G-1-03 Haben Sie allgemeine Anmerkungen zum Ablauf der Studie?

Freitext:

Pilot 6 Würde mich auf ein Feedback des Verlaufs freuen.

G-1-04 Haben Sie allgemeine Anmerkungen zum Simulator?

Freitext:

Pilot 8 Super Teil !! 😊

G-1-05 Würden Sie auch an weiteren Studien teilnehmen?

Freitext:

Pilot 6 ja, gerne!

Pilot 7 ja

Pilot 8 ja

Vielen Dank für Ihre Teilnahme!

Pilot: _____

Datum _____

Notizen Versuchsleiter

A Notizen Begrüßung/Fliegerischer Hintergrund/Erwartungen

Pilot 4 [...]

Collective in [...] ist teleskopartig verstellbar

Armlehne und Stick unabhängig voneinander verstellbar

Alouette hatte dyn. Torque Begrenzung [Also eine Art tactile cue].

Pilot 6 linker Sidestick aufrecht gestellt. Probleme mit Ausrichtung? -Nein.

B Gewöhnungsfliegen

Pilot 5 Wichtig, dass beide Schultern unten sind. Das funktioniert auch mit dem geneigten linken Sidestick: Kampfmissionen können 10-12 h dauern, schwere Weste.

[...] hat trimfollowup, wurde in Simulation eingestellt

Kein großer Gewöhnungseffekt.

Zügig TRL 6 [erreichen], damit für [...] interessant

C Torque Protection

Pilot 4 [Die] Friction [im] gelben [Bereich ist] kräftig, eher das, was ich für den roten Bereich möchte.

Beim Rausgehen gut. [Aber] man bekommt nicht mit, dass man raus ist.

Sonst Blinkleuchte in [...]

Cues sollten abschaltbar sein.

Rast rippelt leicht, merkt man auch beim Rausgehen.

Immer wenn was rastet, habe ich immer das Gefühl, das ist mechanisch, da hakt was.

Ist da was im Argen (z.B. Abdeckung/Faltenbalg) - unangenehm.

Pilot 5 [...]

Transient oberhalb MTP ist entscheidend; OEI: 30 s Bereich wichtig, geht den Triebwerken nahe (ind/max/sub) [?]

Im 30 s Bereich sind die Augen nicht im Cockpit: darum besonders wichtig

Sollte in AEI am oberen Ende von MCP liegen

Sollte in OEI am oberen Ende des 2 min 30 s Bereich liegen (30 s Limit)

Ohne Vibration, bzw. frei von Missdeutungen

aktuell [ist es] wie im [...] von der Shakerfrequenz [her]

Die Limitanzeige FLI ist im [...] ähnlich, aber [es gibt] Unterschiede

AEO: MCP darüber Transient

Je nach Zustand (Hot and hight) dehnt sich MCP nach unten aus.

Kein Problem über MCP zu gehen für eine bestimmte Zeit, nur über Transient (korrespondiert mit [...]) darf man bewusst nicht gehen.

OEI: 2:30 min / 30 s / 5 min Limit

Signal für Eintritt in 2:30 min Bereich, keine Rückführung [erwünscht]

Rückführung/Softstop aus 30 s Limit heraus [erwünscht]- 35 -

Pilot:	Datum
Pilot 6	Raste stört beim zügigen Einsetzen, z.B. im Brownout Limits bei [...] anders als [...]: vorher Limits berechnen Fast roping, Fast Takeoff-Einteilung in Achtel: 1/8 aus Rädern heben, 4/8 kompl. entlastet, Takeoff [Leistungsreserve] Es kann passieren, daß man am mechanischen Anschlag ist und die Maschine noch nicht am Limit [!]
Pilot 7	Dämpfung auf 1,5 Pi/Ro Besser mit Sidesticks zurechtgekommen als erwartet Anschlagsdarstellung gut, sollte dann verschwinden: Acknowledge oder automatisch ist egal: Raste dauert zu lange. Verschwinden nach Acknowledge. Aborted landing at intersection Diskrepanz zwischen Cue und Anzeige: erläutert, bitte ignorieren Will keine Rückstellkraft.
...	
F	
Pilot 5	Debriefing Gewünschte Funktion: Level-Off- Funktion: so oft gewünscht: level-off-Fluglage Assistent bei plötzlichem Eintritt in IMC Vibration am Cyclic: nicht perfekt machen
Pilot 6	Steuer von Rotorebene entkoppeln Staublandung Hohe Sinkrate Operieren jenseits Softstops überdenken System bewusst ein und abschalten: eher immer eingeschaltet, wenn stört dann abschalten, zumindest im Notfall alles unterhalb des Maximum Bereiches [abschalten] OEI: kommt vor, durch Chips [Span-Detektion], Birdstrike [...] AEO: unintended IMC: Brille komplett grün, max climb. MSA, wings level Spatial disorientation + vertigo: kommt vor Level-off Fkt. - so oft gewünscht, bei Eintritt in IMC Vibration an Cyclic [reicht] - nicht so perfekt machen Steuer von Rotorebene entkoppeln [Anmerkung: ist realisiert, z.B. in TRC]

C.3. Teil 3

Bei den in den Fragebögen angegebenen Piloten-Nummern 9 bis 12 handelt es sich um die Fortsetzung der laufenden Nummerierung der Studie 2015. Mit Hilfe der Alias Tabelle im Anhang A können diese den in dieser Arbeit verwendeten globalen Aliasnamen zugeordnet werden: Pilot 2015-09 ist ein Alias von 2016-01 und Pilot 2L.

Pilot: _____

Datum _____

Erwartungen bezüglich aktiver Sidesticks

A-2-01 Wie würden Sie Ihre Grundhaltung beschreiben bezüglich...

...Sidesticks statt Centersticks	Sehr aufgeschlossen	<table border="1"> <tr><td></td><td>1</td><td></td><td></td><td></td><td></td></tr> <tr><td></td><td></td><td>2</td><td></td><td></td><td></td></tr> <tr><td></td><td>3</td><td></td><td></td><td></td><td></td></tr> <tr><td></td><td></td><td>4</td><td></td><td></td><td></td></tr> </table>		1							2					3							4				Sehr skeptisch
	1																										
		2																									
	3																										
		4																									
neutral																											

...aktiver (<i>force-feedback</i>) statt passiver Steuer	Sehr aufgeschlossen	<table border="1"> <tr><td></td><td>1</td><td></td><td></td><td></td><td></td></tr> <tr><td></td><td>2</td><td></td><td></td><td></td><td></td></tr> <tr><td>3</td><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td></tr> <tr><td>4</td><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td></tr> </table>		1						2					3						4						Sehr skeptisch
	1																										
	2																										
3																											
4																											
neutral																											

Bemerkungen: _____

A-2-02 Wie schätzen Sie bisher das Potenzial haptischer Assistenz im Allgemeinen für zukünftige Hubschrauber ein?

Sehr hoch	<table border="1"> <tr><td></td><td></td><td>1</td><td></td><td></td><td></td></tr> <tr><td></td><td>2</td><td></td><td></td><td></td><td></td></tr> <tr><td></td><td></td><td>3</td><td></td><td></td><td></td></tr> <tr><td>4</td><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td></tr> </table>			1					2							3				4						Sehr gering
		1																								
	2																									
		3																								
4																										
neutral																										

Bemerkungen: _____

A-2-03a Erwarten Sie, dass aktive Steuer den Piloten bei der Torque-Regelung unterstützen können?

Bin überzeugt	<table border="1"> <tr><td></td><td></td><td></td><td>1</td><td></td><td></td></tr> <tr><td></td><td>2</td><td></td><td></td><td></td><td></td></tr> <tr><td>3</td><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td></tr> <tr><td>4</td><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td></tr> </table>				1				2					3						4						Bin skeptisch
			1																							
	2																									
3																										
4																										
neutral																										

Bemerkungen: _____

A-2-03b Wünschen Sie sich Kräfte an den Steuern, die vor einem Overtorque warnen könnten?

Wünschenswert	<table border="1"> <tr><td></td><td></td><td></td><td>1</td><td></td><td></td></tr> <tr><td></td><td>2</td><td></td><td></td><td></td><td></td></tr> <tr><td>3</td><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td></tr> <tr><td></td><td></td><td>4</td><td></td><td></td><td></td></tr> </table>				1				2					3								4				Nicht wünschenswert
			1																							
	2																									
3																										
		4																								
neutral																										

Bemerkungen: _____

Pilot: _____

Datum _____

4. Teil D Torque Protection

Torque Protection

D-2-02 Auf Basis der gewonnen Eindrücke: Erwarten Sie, dass aktive Steuer den Piloten bei der Torque-Regelung unterstützen können?

Bin überzeugt

1					
2					
3					
4					

Bin skeptisch

neutral

Bemerkungen:

1. besonders bei leistungsschwachen Hubschraubern

D-2-03 Abschließend: Wünschen Sie sich Kräfte an den Steuern, die vor einem Overtorque warnen könnten?

Wünschenswert

1					
2					
3					
4					

Nicht
wünschenswert

neutral

Bemerkungen:

1. Es muss trotzdem ein Overtorque ziehbar sein.

D-2-04 Welche weiteren Anmerkungen haben Sie zur haptischen Torque-Protection nach den hier gemachten Erfahrungen? Was muss verbessert werden?

Freitext:

3: Kräfte in derzeitigem Modell zu stark und mit zu großen "Kraftsprüngen" behaftet

Pilot: _____

Datum _____

7. Debriefing/Interview

Debriefing

G-1-03 Haben Sie allgemeine Anmerkungen zum Ablauf der Studie?

Freitext:

Pilot 1: Sehr gute Ansätze!

Pilot 2: Sidestickerprobung macht auf jeden Fall Sinn

Pilot 3: Die weitere Evaluierung "Sidestick" scheint mir absolut sinnvoll

Ich wünsche mir eine Implementierung "Force Feedback" in die Steuerung bei [...]

G-1-05 Würden Sie auch an weiteren Studien teilnehmen?

Freitext:

1. Definitiv!

2. Ja, gerne

3. Ja!

4. nicht gefragt

Vielen Dank für Ihre Teilnahme!

Pilot: _____

Datum _____

8. Simflugnotizen

Briefing

[...]

- Das Small Arms Evasive Manöver wird geflogen [...].
- Für willentliche Torqueüberschreitung eignen sich "Hot and Heavy" Konfigurationen oder Medevac-Szenarien. Dabei würde man bis ans Leistungslimit des Triebwerks gehen, d.h. bis die Drehzahl einbricht

Allgemein während Gewöhnungsfliegen

Der Rotor dreht zu langsam! [Das irritiert, da ich dadurch das Gefühl habe, dass es ein Triebwerksproblem gibt]
 Radarhöhenanzeige ist schwer zu lesen

Torque Protection

1.

FLI hängt nach

Pedalausschlag zu heftig, workload ok, normaler Start (run006, run007)

Rechter Stick macht Druck, habe das als Hilfe interpretiert [Anmerkung: keine Funktion auf rechtem Stick]

Takeoff Szenarien wo man über MCP gehen muss [sind sinnvoll]

Ich will beide Limits spüren: TOP und MTP

Gut, dass er einen raus schiebt [gültiges Limit wechselt von MTP zum niedrigeren MCP, dabei verschiebt sich der Softstop am Kollektiv nach unten]

[Das Cue] muss überdrückbar sein, [denn] da geht man in der confined area auch drüber [Erschweren der Situation durch]

Masse hochsetzen, hot and high, auf 100 ft over ground steigen, 30 °C, FLI 9 im Hover, OEI ... [?]

2.

Kraftniveau zu hoch, zu schwer

Rechter Stick ist zu schwer, Ich trimme nicht, damit er nicht springt

Pilot: _____

Datum _____

Bin bewusst über [das Torque-Limit] gegangen
Ich hatte mir vorgestellt, da ist ein Wald und es ist zu spät zum Bremsen, falls ich mich vertan habe (bei der Startplanung)
[...]
[...] kein Gefühl wo der Stick ist, wenn man nicht hinschaut
[...] hat das nicht, kein Feedback [am Kollektiv]. Das wäre aber schön.
Die Degradierung [= Herabsetzung des Limits] ist sehr sinnhaft.
[...]
Automatisch [zum] kontinuierlichen [Limit]

3.
Cool! Rüttelt, schimpft mit mir wie bei Autolenkrad
[...]: Fehlt dort
sinnvoll, gut dass der gelbe ?
Übergang am gelben [Limit] zu hoch

4.
Cannot get anything out of the TOP cue, but it does not hurt (runs 012-016)
It depends also on the strategy, when the technique is to go to the stop or to go to the shaker and then go back a bit
Also interesting to look into dynamic maneuvers involving other axis, pedals, left turn

D. Rohdaten Studie 3

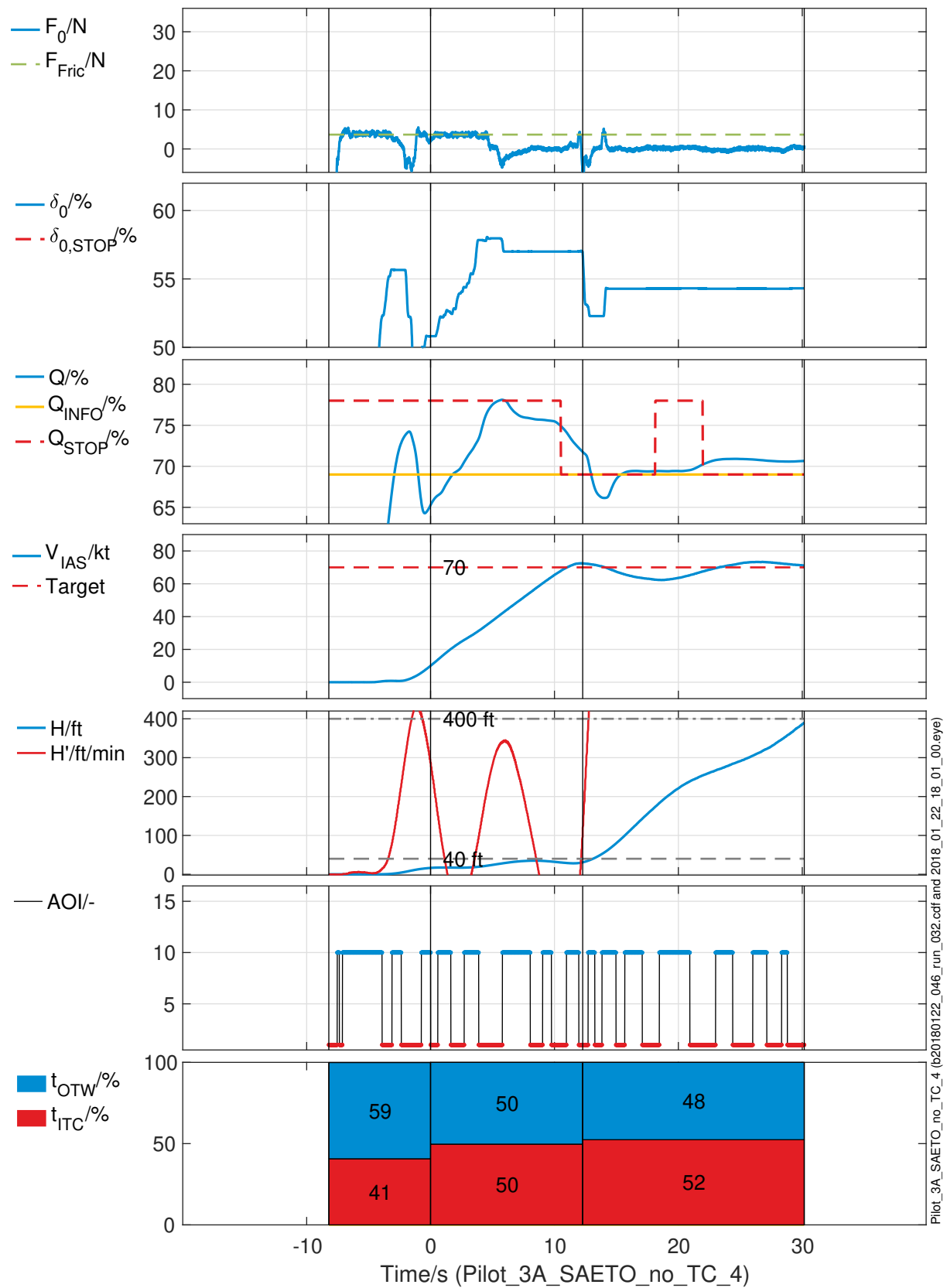


Abbildung D.1.: Pilot 3A, Small Arms Takeoff, ohne TC

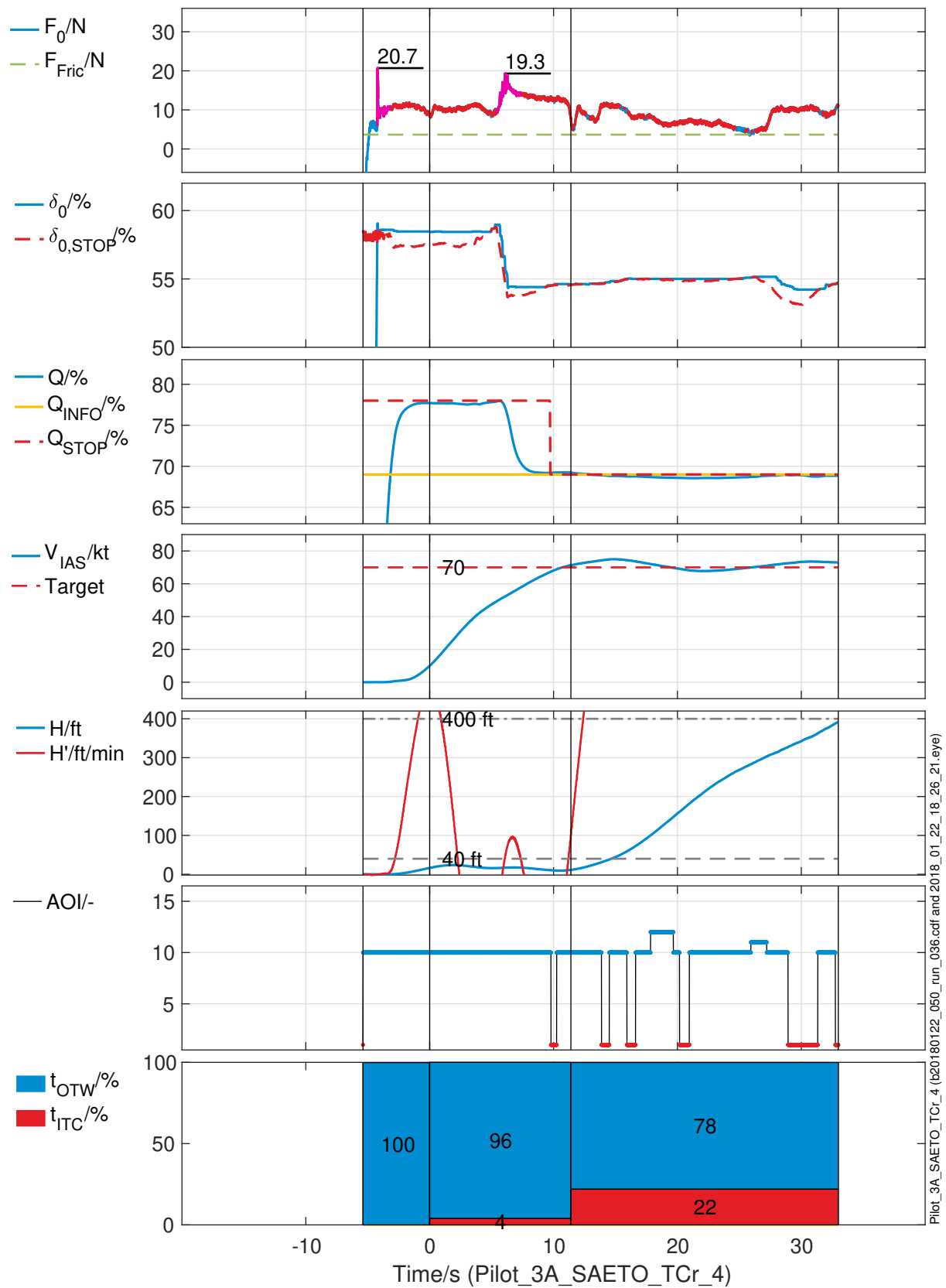
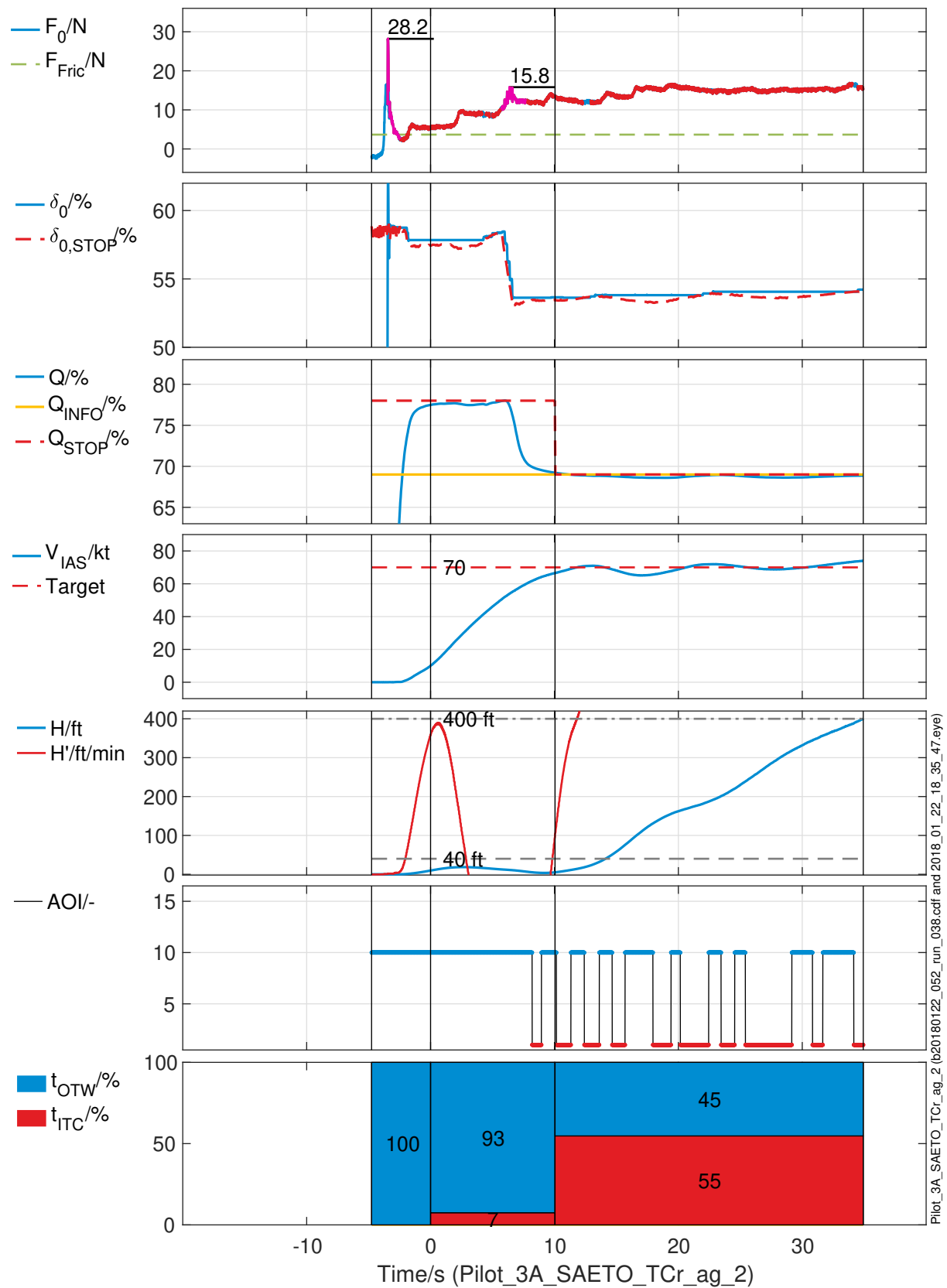


Abbildung D.2.: Pilot 3A, Small Arms Takeoff, mit TC^{STOP}



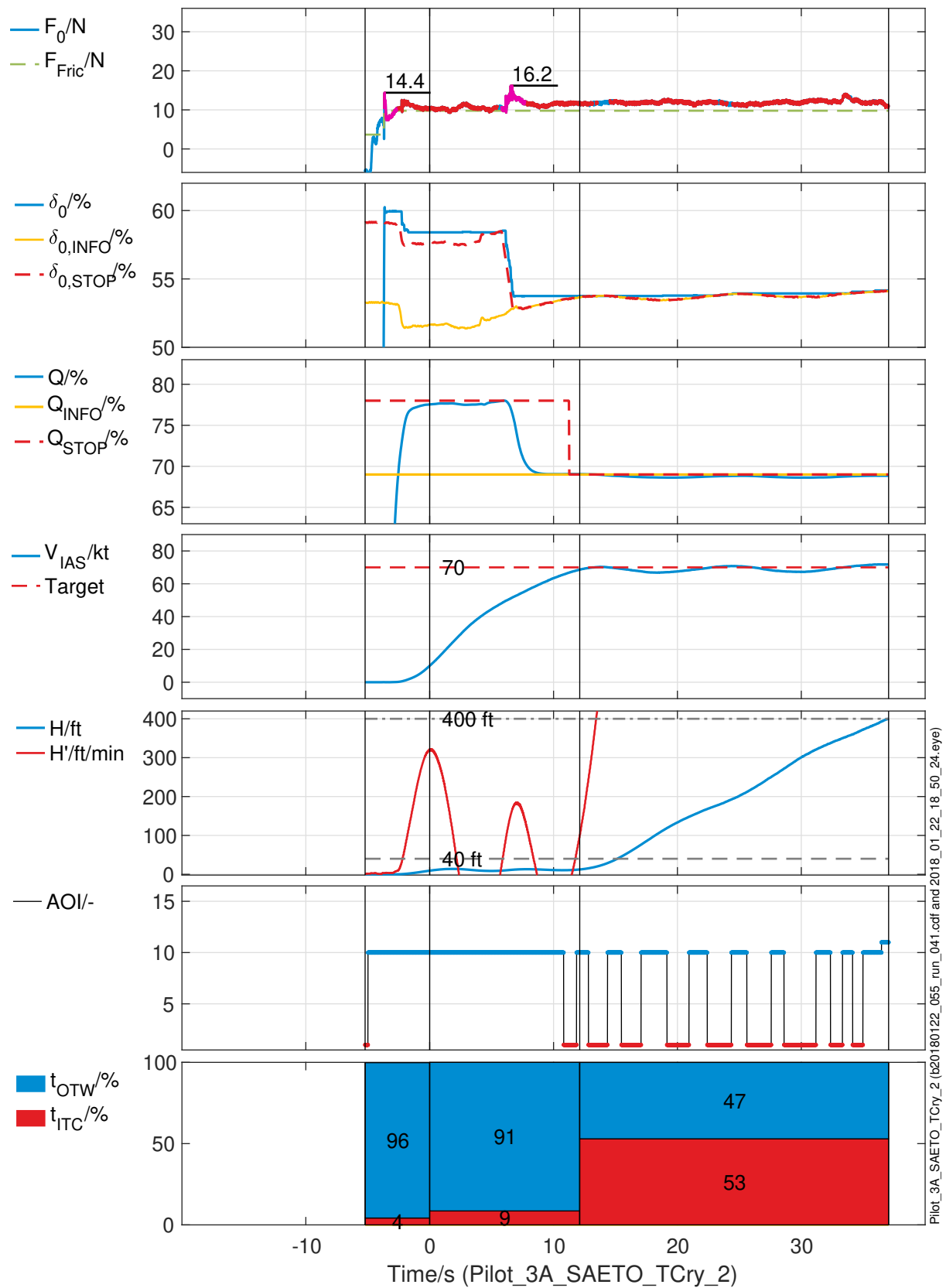


Abbildung D.4.: Pilot 3A, Small Arms Takeoff mit TC_{INFO}^{STOP}

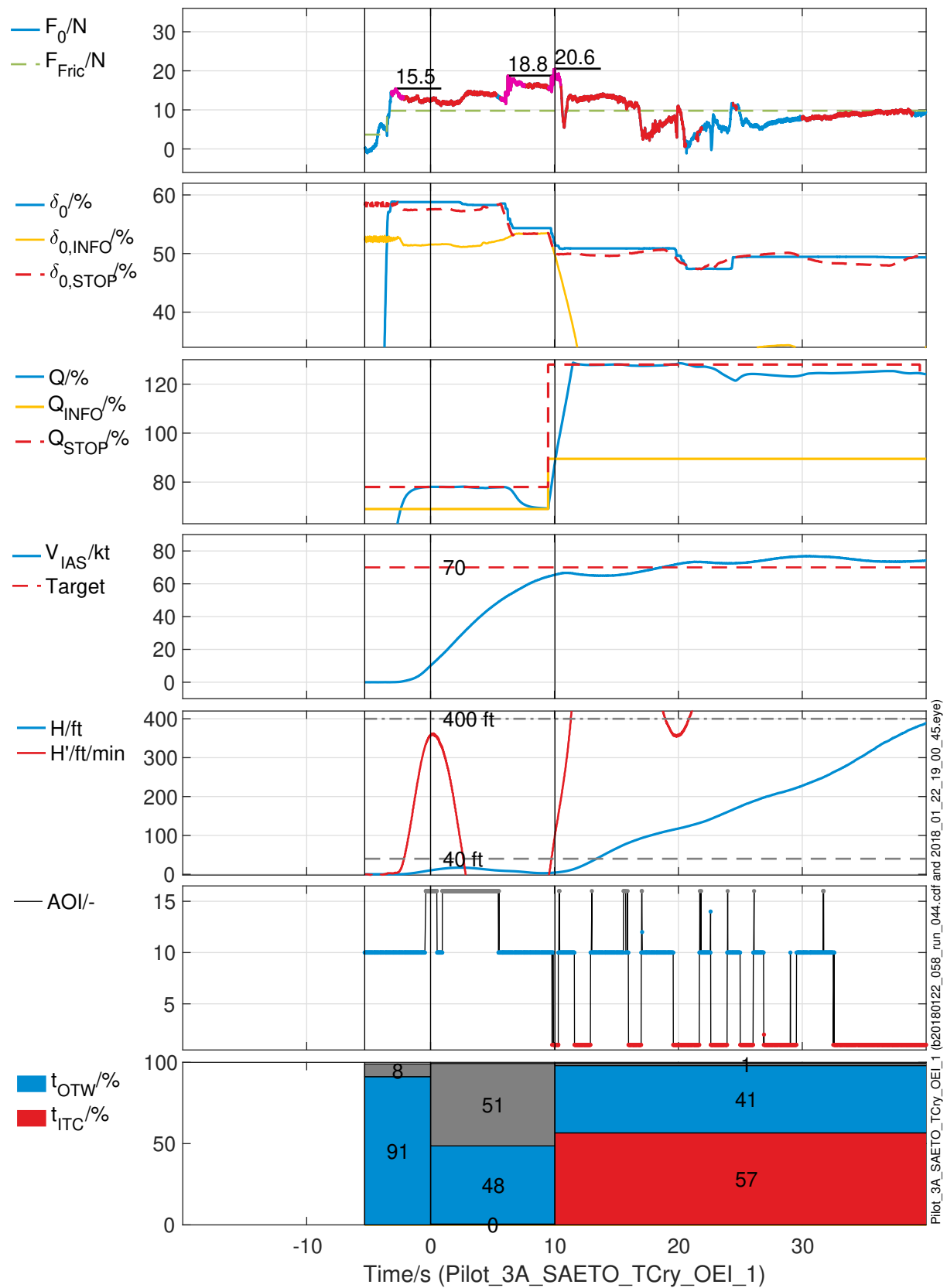


Abbildung D.5.: Pilot 3A, Small Arms Takeoff mit Pilot TC_{INFO, OEI}^{STOP}

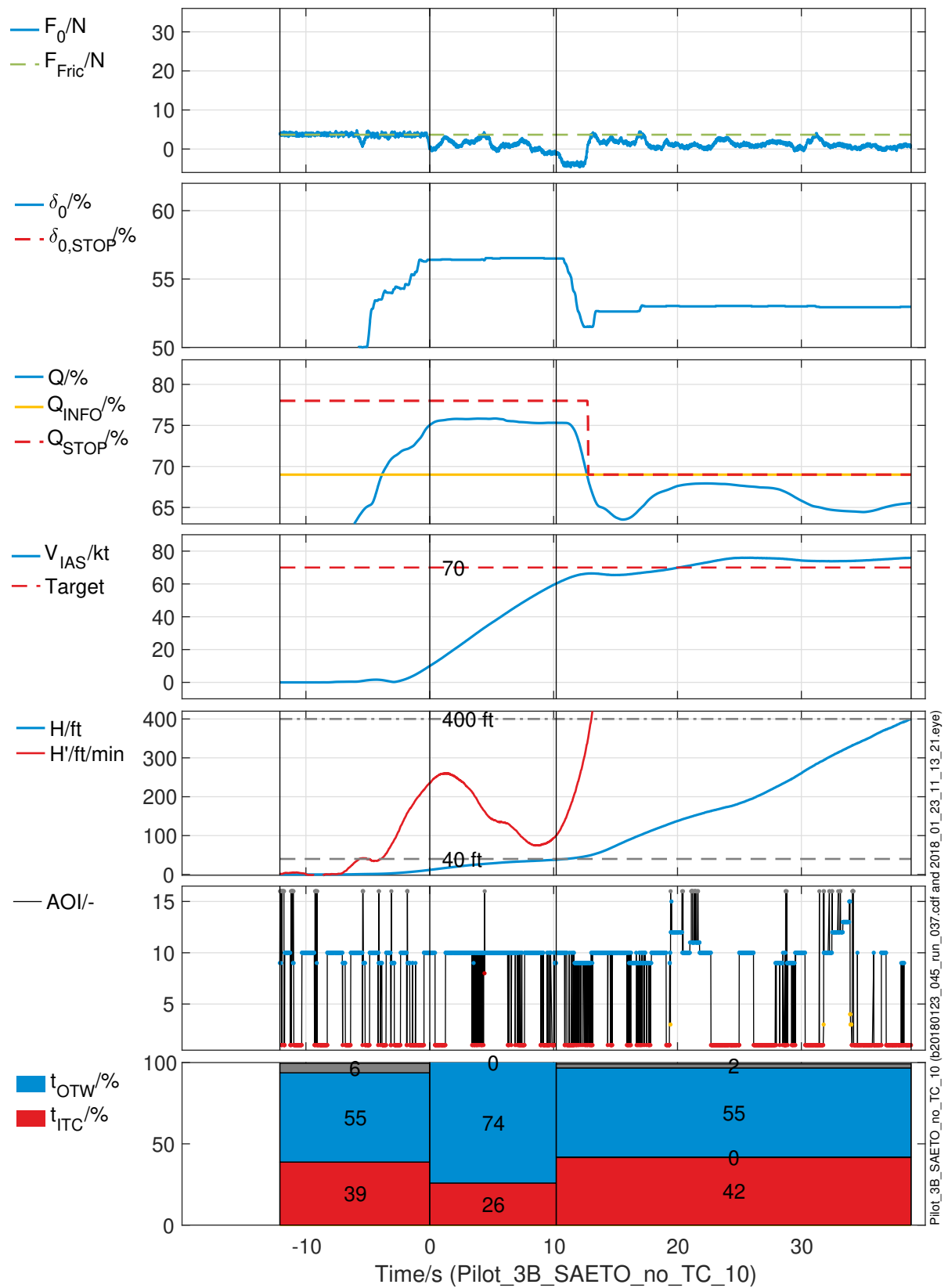
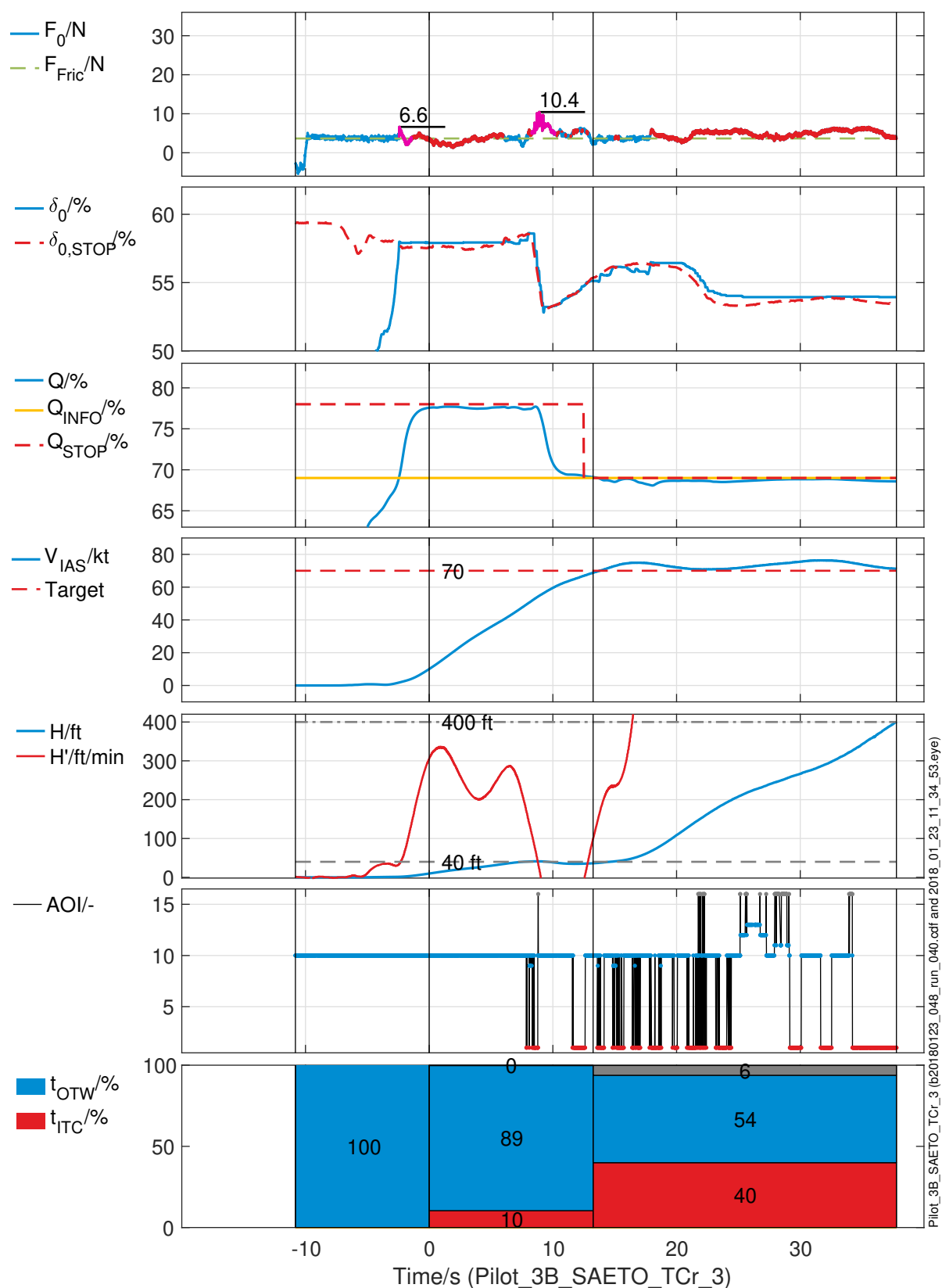


Abbildung D.6.: Pilot 3B, Small Arms Takeoff ohne TC


Abbildung D.7.: Pilot 3B, Small Arms Takeoff mit TC^{STOP}

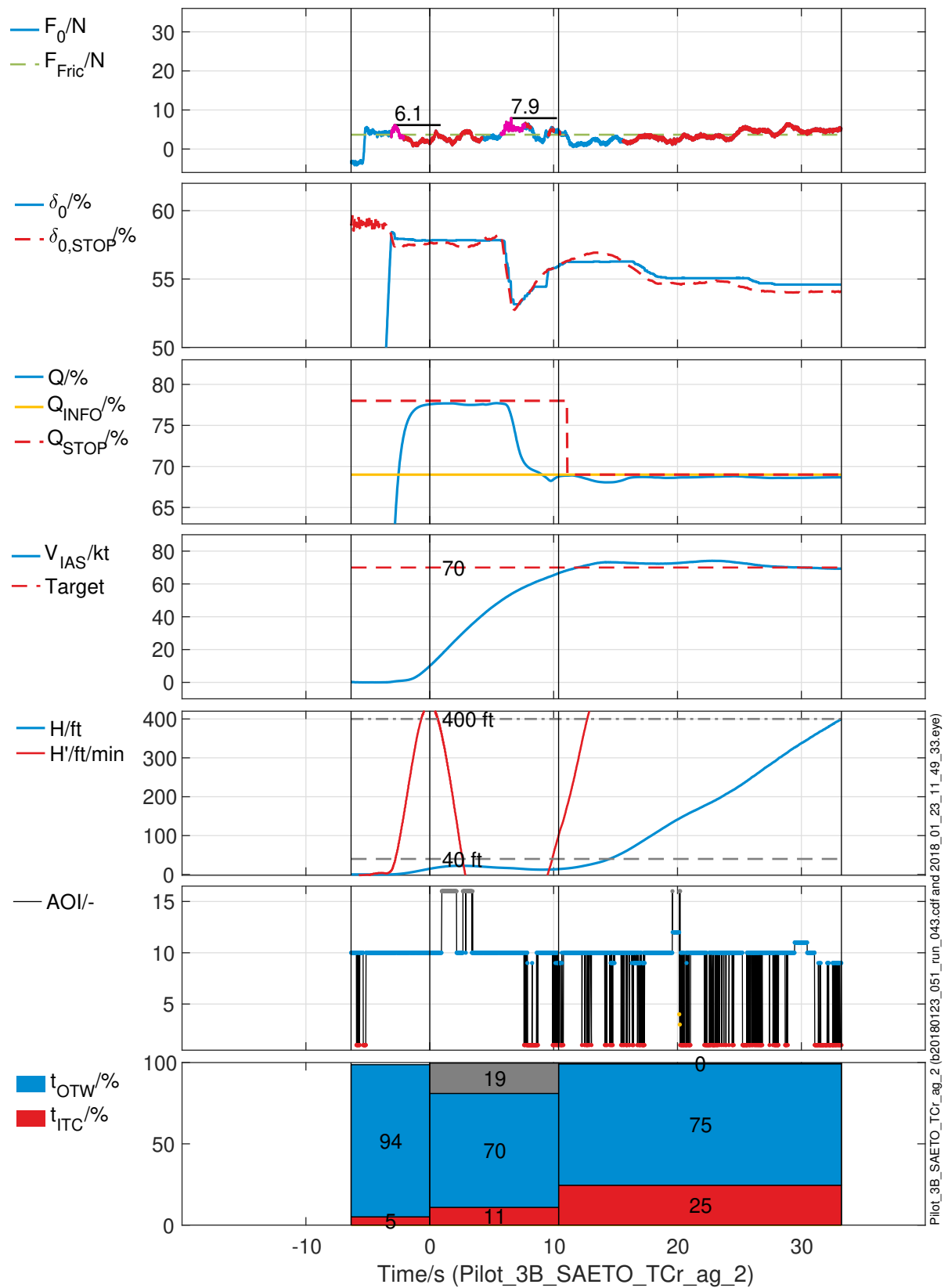
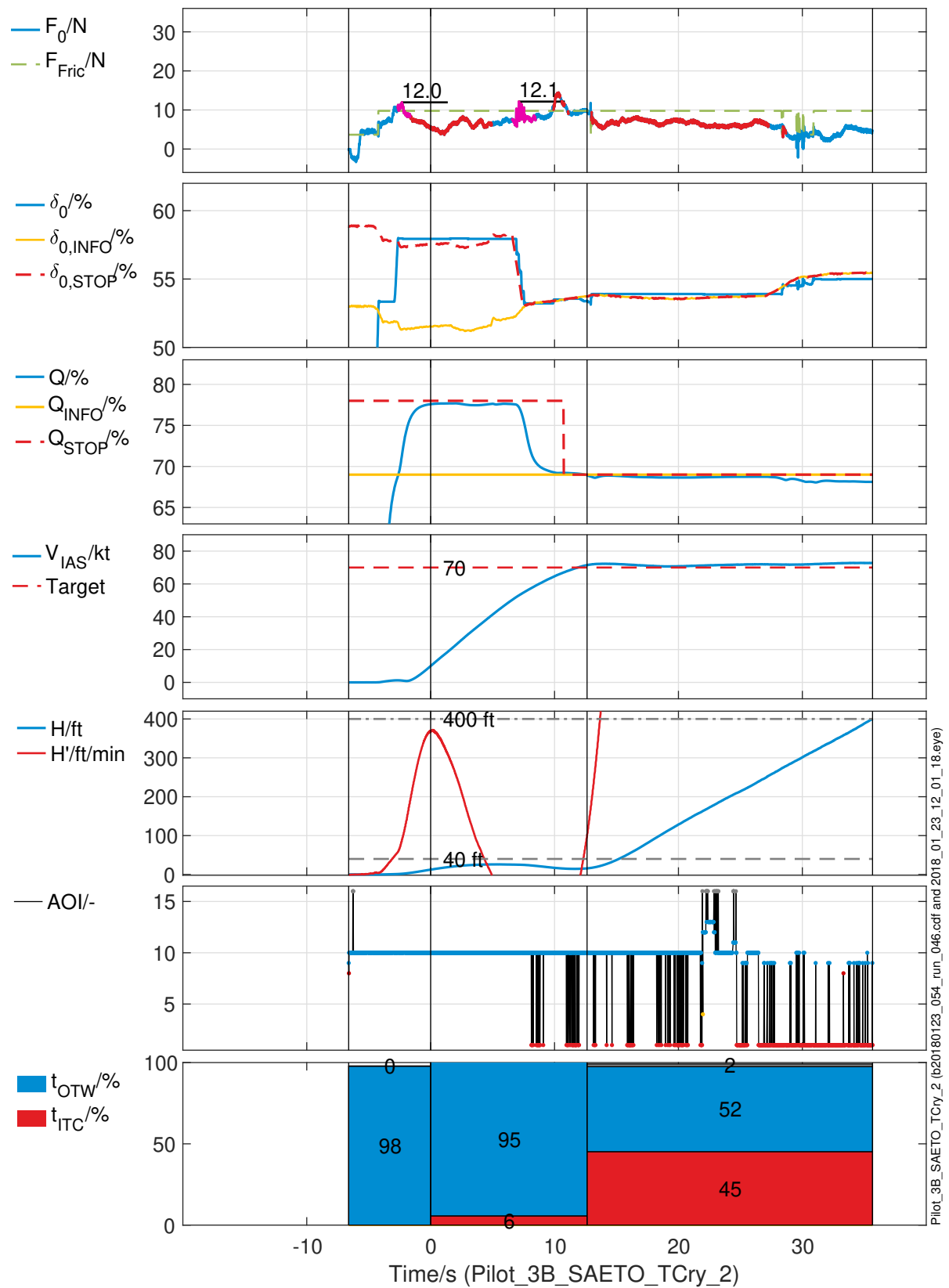


Abbildung D.8.: Pilot 3B, Small Arms Takeoff mit mit TC_{agg}^{STOP}



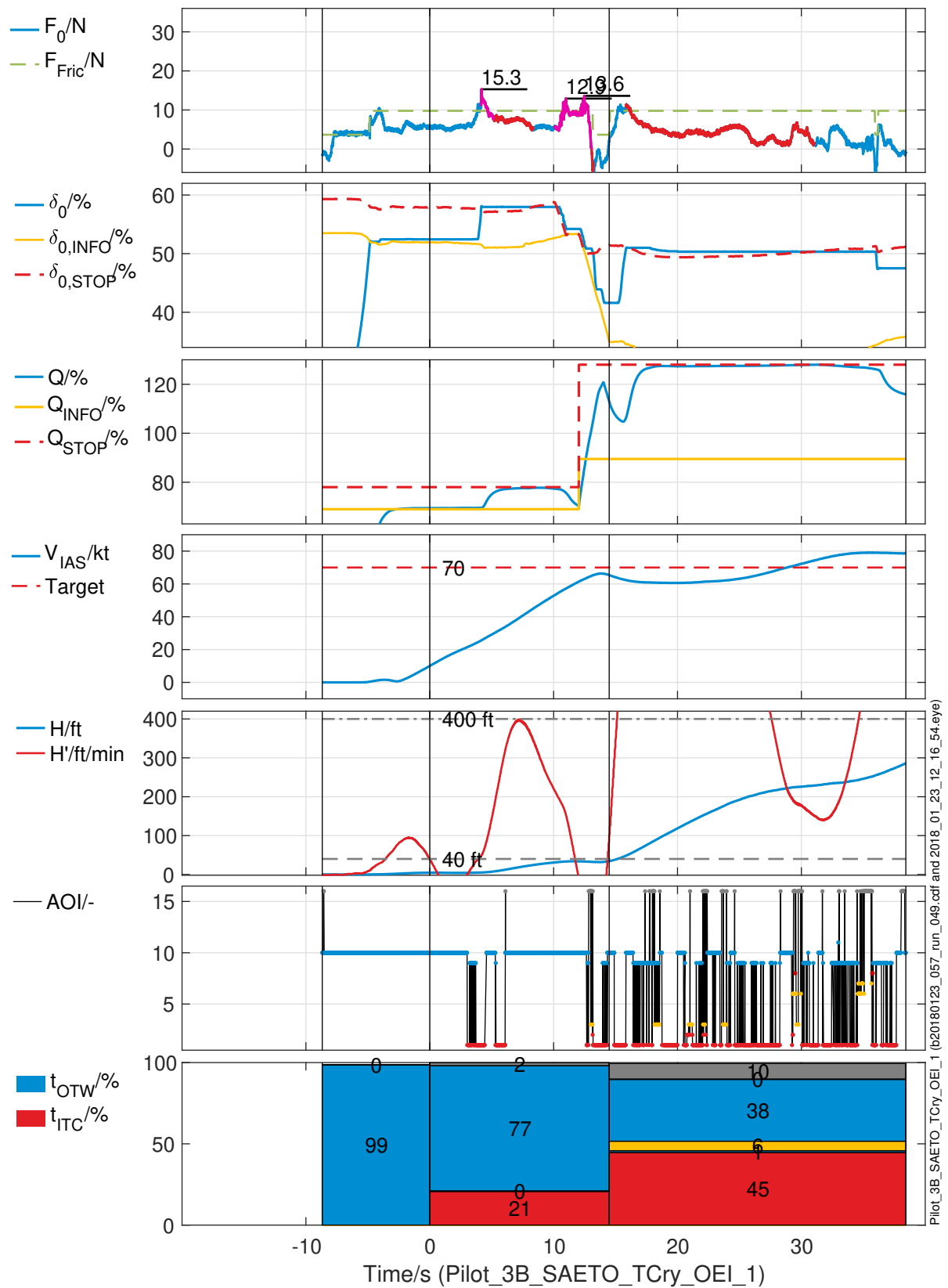


Abbildung D.10.: Pilot 3B, Small Arms Takeoff mit $TC_{INFO, OEI}^{STOP}$

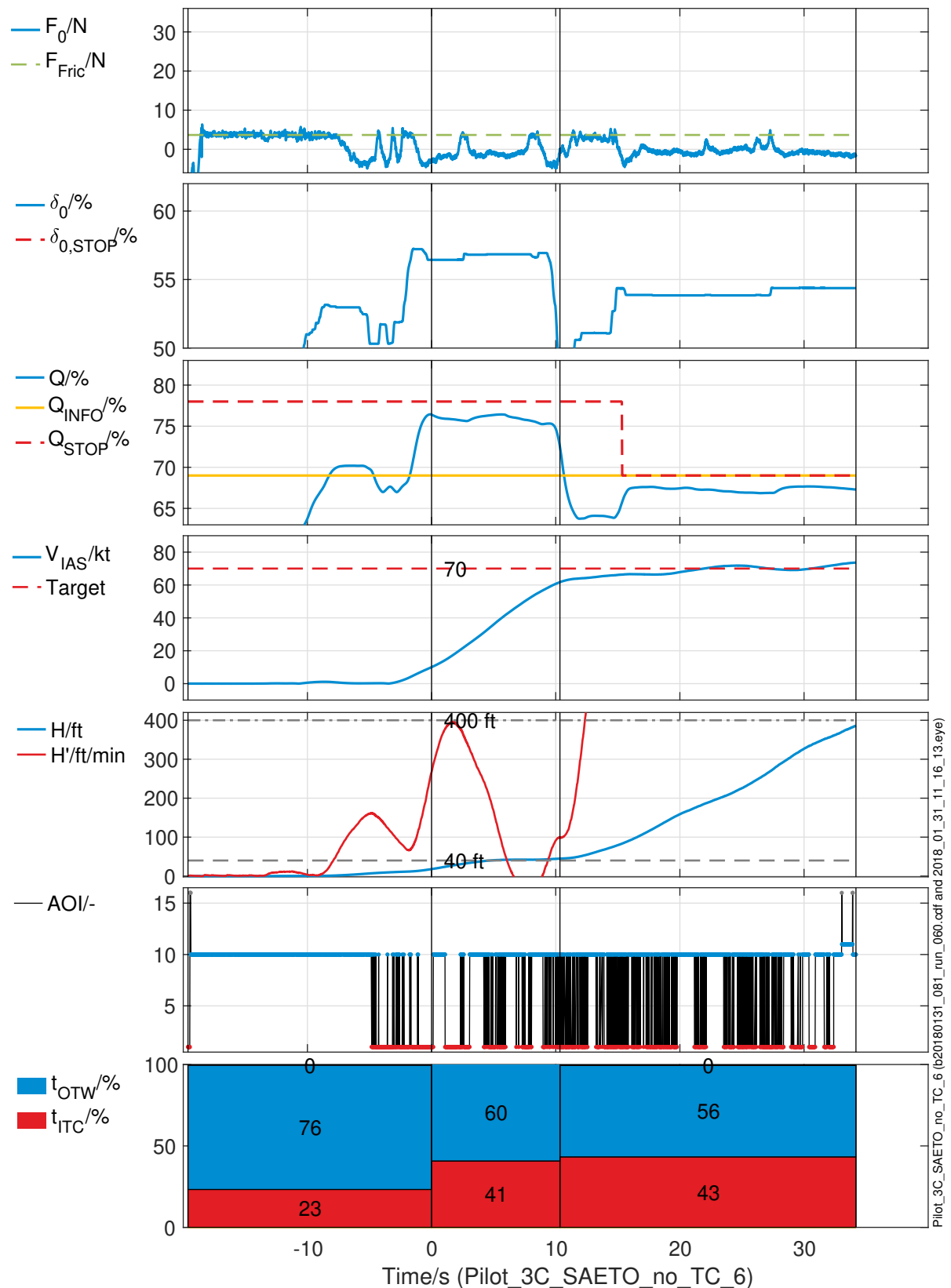


Abbildung D.11.: Pilot 3C, Small Arms Takeoff ohne TC

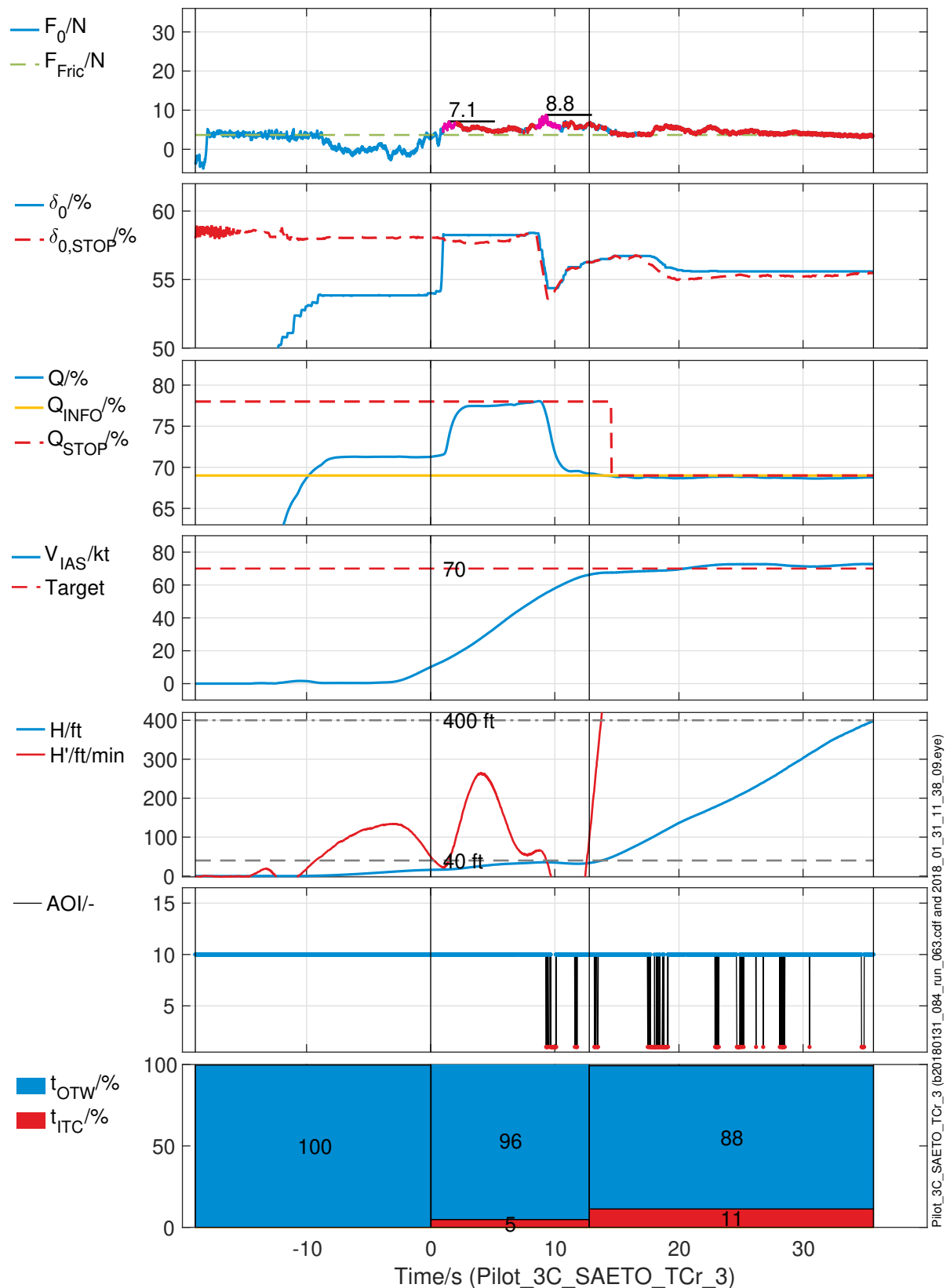
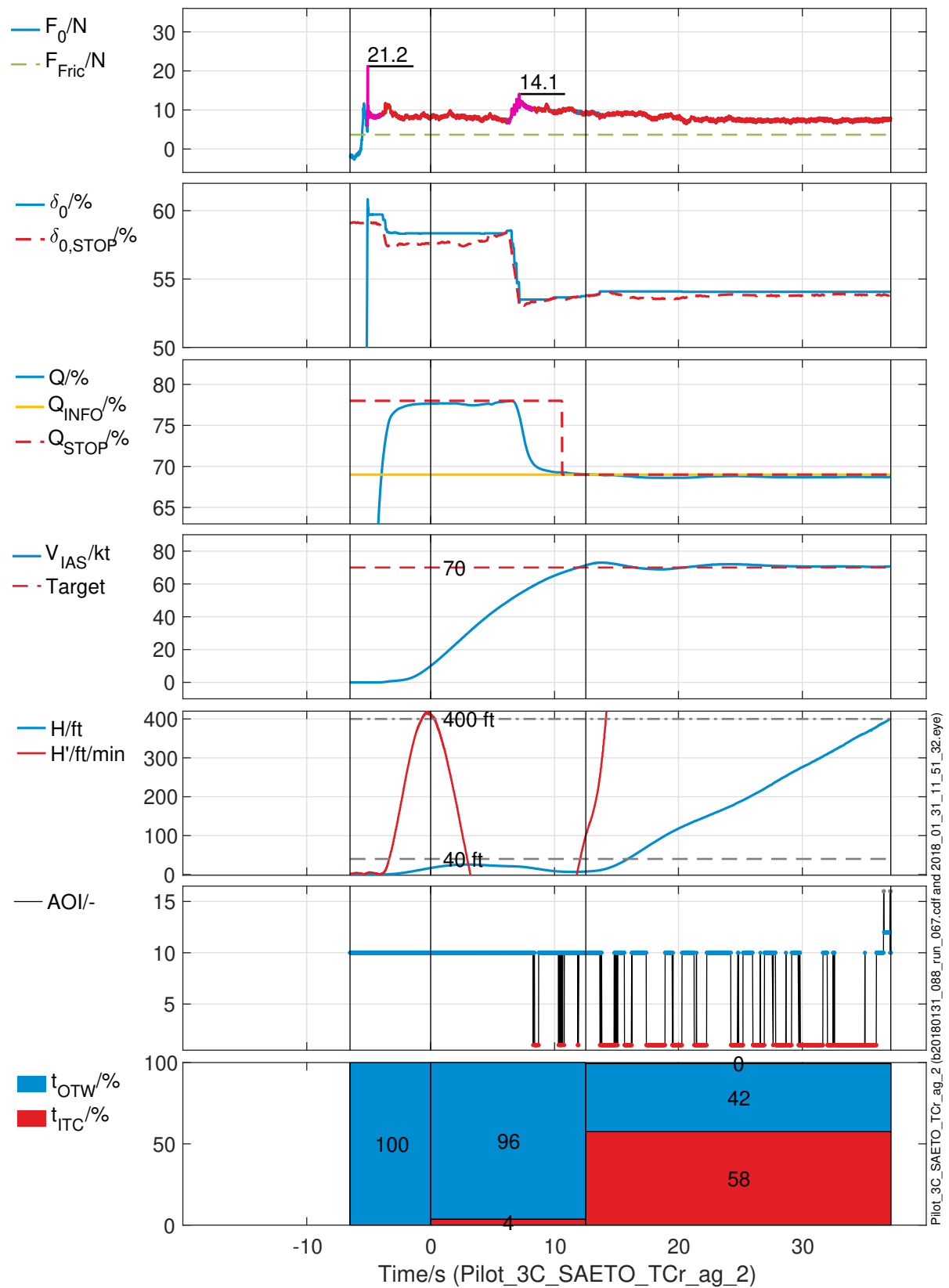


Abbildung D.12.: Pilot 3C, Small Arms Takeoff mit TC^{STOP}



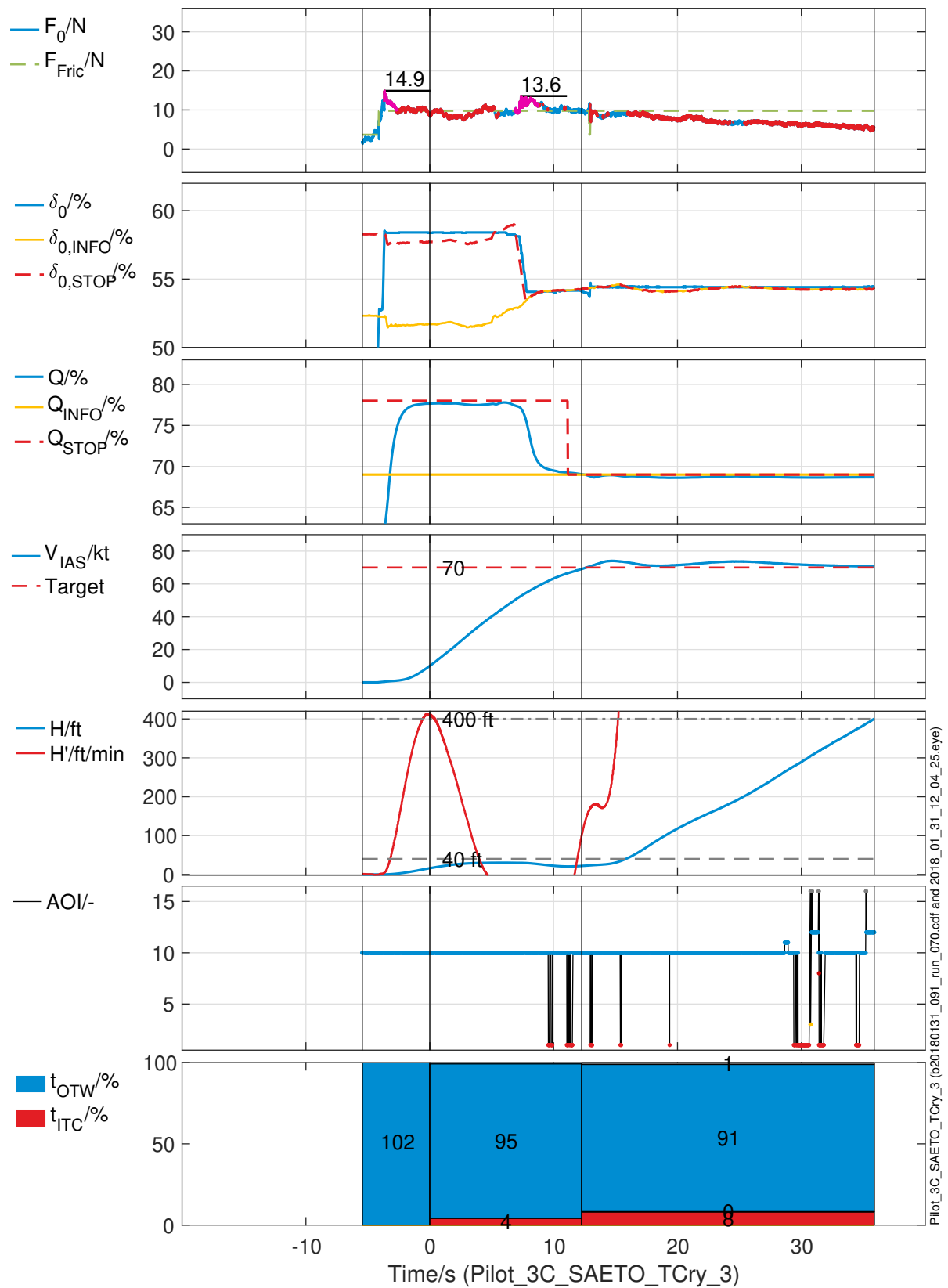


Abbildung D.14.: Pilot 3C, Small Arms Takeoff mit TC_{INFO}^{STOP}

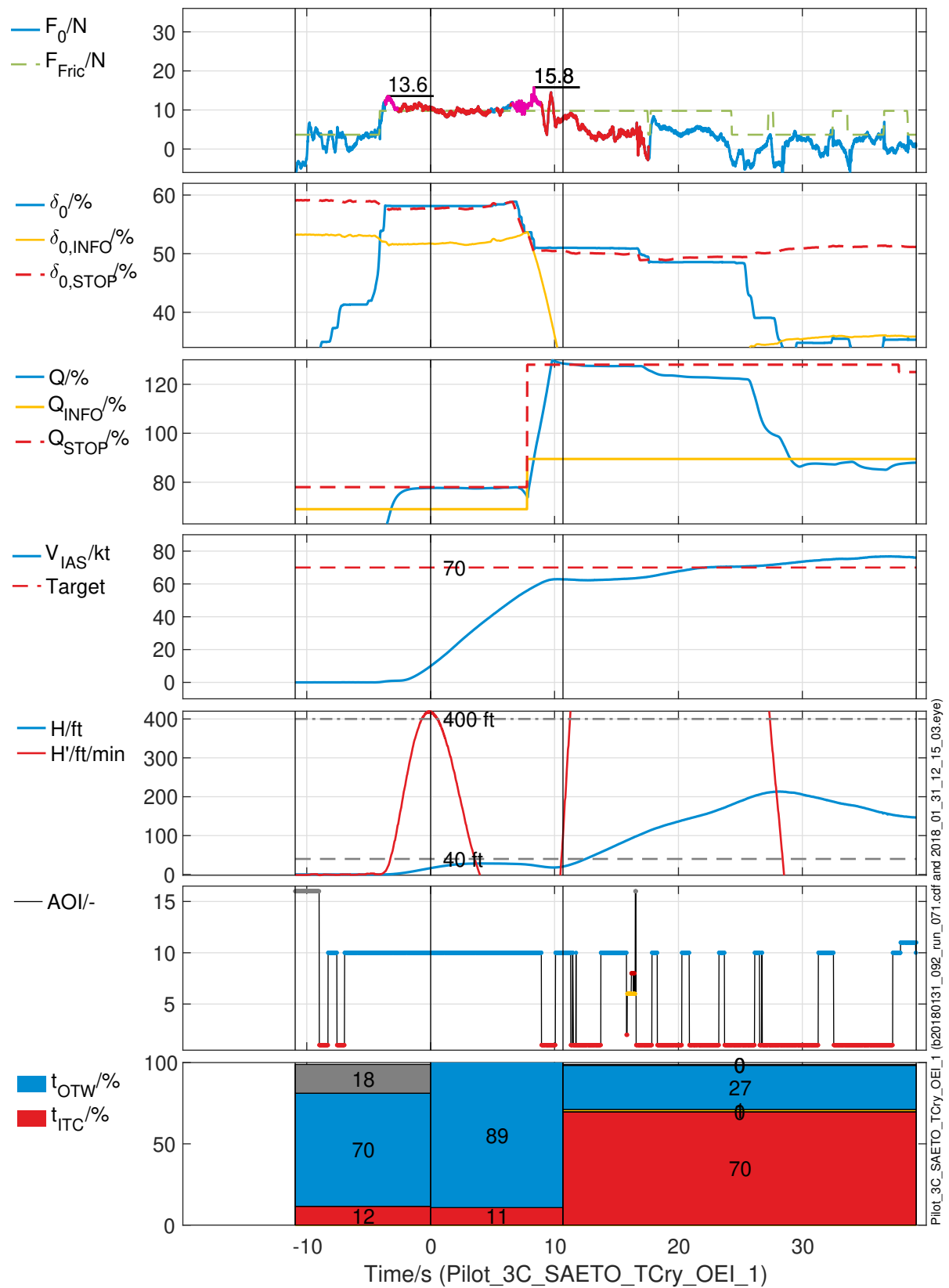


Abbildung D.15.: Pilot 3C, Small Arms Takeoff mit $TC_{INFO,OEI}^{STOP}$

D.1. Fragebögen

An dieser Stelle stehen die verwendeten Fragebögen im Original-Layout mit den gesammelten Antworten und Kommentaren der Piloten. Die Fragebögen wurden in Papierform ausgefüllt und später abgeschrieben. Die im Hauptteil verwendeten Piloten-Aliase können mit Hilfe der Tabelle Piloten A zugeordnet werden. Dazu wird das Jahr des Versuchs und die im Fragebogen verwendete, in der Reihenfolge der Teilnahme vergebene laufende Nummer benötigt. Die Veröffentlichung der Daten wurden vom Presse- und Informationszentrum Ausrüstung, Informationstechnik und Nutzung der Bundeswehr (PIZ AIN) freigegeben, jedoch mit der Auflage, bestimmte Stellen zu schwärzen. Zudem wurden modellspezifische Informationen entfernt, da diese nicht relevant für die Arbeit sind.¹

¹Die ungekürzten Fragebögen werden am DLR archiviert: MÜLLHÄUSER, Mario: Haptic Torque-Protection für Hubschrauber - Piloteninterviews (ungekürzt). DLR Interner Bericht. Braunschweig, 2025

Pilot: PA-2018 -1 bis 3

Datum: Januar 2018

2. Teil C Torque Protection Intermediate

After SAETO without TC

C 1. Bedford Workload Rating nach Phasen

Abheben und Schweben	2, 5, 3
Beschleunigen	3, 4, 5
Steigen	3, 4, 4

Pilot: PA-2018 -1 bis 3

Datum: Januar 2018

After SAETO with TC; red STOP**C 2. Bedford Workload Rating nach Phasen**

Abheben und Schweben 1, 2, 3

Beschleunigen 1, 2, 3

Steigen 2, 2, 2

Pilot 2: Yaw lassen wir draussen, Cues separat [Die Steuerung um die Hochachse bereitete Probleme]

Pilot 3: nicht schwieriger als Abheben [zu Beschleunigen]

C 3. Die automatische Verschiebung des Tactile Cues von MTP nach MCP bei Erreichen von vy fand ich

a)

Hilfreich

1					
2					
3					

Nicht hilfreich

neutral

Bemerkungen: _____

b)

Wünschenswert

1					
2					
3					

Nicht
wünschenswert

neutral

Bemerkungen: _____

c)

zu schnell

		1	1		
		2	2		
		3	3		

zu langsam

neutral

Bemerkungen:

[Alle Piloten haben genau auf der Mitte angekreuzt]

Pilot 3: genau richtig

Pilot: PA-2018 -1 bis 3

Datum: Januar 2018

- C 4. Wünschen Sie sich Kräfte an den Steuern, welche das Steuer direkt an der mit dem roten Limit korrespondierenden Steuerposition halten und führen, wenn sich die Position ändert, so wie in dem demonstrierten System? -Im Unterschied zum reinen Signalisieren, etwa durch eine Vibration.

Wünschenswert			1				Nicht wünschenswert
	2						
	3						
neutral							

Bemerkungen: Pilot 2: Ziemlich nah an perfekt, genial; Workload bei diesem Manöver in der der Transition Beschleunigung auf Steigen -> wenn man da hoch an Power steuert, dann [schnell?] zu viel

Pilot: PA-2018 -1 bis 3

Datum: Januar 2018

After SAETO with TC; red STOP, aggressive

C 5. Bedford Workload Rating nach Phasen

Abheben und Schweben	-, 2, 3
Beschleunigen	-, 1, 3
Steigen	-, 2, 2

Pilot 2: most demanding, Trainingseffekt

C 6. Die **automatische Verschiebung des Tactile Cues von MTP nach MCP** bei Erreichen von vy fand ich

a)

Hilfreich	2							Nicht hilfreich
	3							
	neutral							

Bemerkungen: _____

b)

Wünschenswert	2							Nicht wünschenswert
	3							
	neutral							

Bemerkungen: _____

c)

zu schnell	2							zu langsam
		3	3					
	neutral							

Bemerkungen:

Pilot 2: Zeitpunkt gut; TLX wie vorher [nicht nochmal ausgefüllt]; Anmerkung: kreuzt zu schnell an, äußert sich aber nicht dazu. Eventuell falsch angekreuzt?

Pilot 3: ok; [hat genau auf der Mitte angekreuzt]

Pilot: PA-2018 -1 bis 3

Datum: Januar 2018

After SAETO with TC for red STOP and yellow INFO/TOP-range

C 7. Bedford Workload Rating nach Phasen

Abheben und Schweben	1, 1, 3
Beschleunigen	1, 1, 3
Steigen	2, 2, 2

Pilot 2: [bei Abheben und Schweben] WL [Workload] 0; nur noch auf Bewegungspfad und Höhe achten; bei Steigen: taskbedingt 2

C 8. Das hier gezeigte Tactile Cue zur Signalisierung der **Schwelle zum gelben Bereich** war ...
(Eintreten in, sowie Austreten aus dem gelben Bereich)

a)

immer spürbar	<table border="1"> <tr> <td>2</td> <td></td> <td>1</td> <td></td> <td></td> <td></td> </tr> <tr> <td>3</td> <td></td> <td></td> <td></td> <td></td> <td></td> </tr> </table>	2		1				3						nicht immer spürbar
2		1												
3														
	neutral													

Bemerkungen: Pilot 3: vor allem durch den Detent

b)

hilfreich	<table border="1"> <tr> <td>2</td> <td></td> <td></td> <td></td> <td></td> <td>1</td> </tr> <tr> <td>3</td> <td></td> <td></td> <td></td> <td></td> <td></td> </tr> </table>	2					1	3						nicht hilfreich
2					1									
3														
	neutral													

Bemerkungen:

Pilot 1: bei dieser Aufgabe des schnellen Abflugs

Pilot 3: generell hilfreich, bei [dieser] Task [aber] nicht notwendig

c)

manchmal störend	<table border="1"> <tr> <td></td> <td></td> <td></td> <td></td> <td></td> <td>1</td> </tr> <tr> <td></td> <td></td> <td></td> <td></td> <td></td> <td>2</td> </tr> <tr> <td></td> <td></td> <td></td> <td></td> <td></td> <td>3</td> </tr> </table>						1						2						3	nie störend
					1															
					2															
					3															
	neutral																			

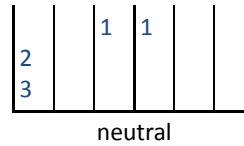
Bemerkungen: _____

Pilot: PA-2018 -1 bis 3

Datum: Januar 2018

d)

wünschenswert



nicht

wünschenswert

Bemerkungen: [Pilot 1 hat genau auf der Mitte angekreuzt]

- e) ☐ zu kräftig ☐ ok, aber ein bisschen zu kräftig ☐ genau richtig: 1, 2, 3 ☐ ok, aber ein bisschen zu schwach ☐ zu schwach

Bemerkungen:

Pilot 2: für dieses Szenario, ohne Vibrationen

→ bitte wenden

- C 9. **Gelber Bereich:** Wünsche Sie sich ein Tactile Cue für den gelben Bereich in allen Flugsituationen (z. B. Flug in der Hinderniskulisse, HIGE, Anflug und Landung) gleich? Wenn nicht, in welchen Bereichen mehr und welchen weniger?

Pilot 1: Abhängig von der "Mission"! Windenarbeit, Aussenlast benötigt mehr Sensitivität in Bezug wo bin ich genau. Hierbei möchte ich sehr wohl wissen, wann/wo der gelbe Bereich anfängt, bzw. an den max. roten Bereich "anschlage".
In "Missionen" in denen ich nur die max. Leistung benötige, kann der erste "Soft-Stop" vernachlässigt werden.

Pilot 2: immer gleich; würde es so lassen, wie es ist; Unterschiedliche Konfigurationen können gefährlich sein unter Stress, siehe MMI-Problem mit Osprey, [diese nimmt eine] Philosophieänderung in unterschiedlichen Phasen vor.

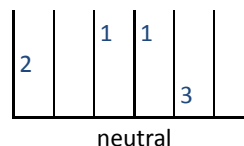
Pilot 3: immer gleich

→ bitte wenden

- C 10. Das hier gezeigte Tactile Cue zur Signalisierung, dass sich der Torque **innerhalb des gelben Bereich** befindet, war ...

a)

immer spürbar



nicht immer

spürbar

Bemerkungen:

Pilot 1: siehe C.17 [alte Nummerierung, jetzt C.9] -> abhängig von der

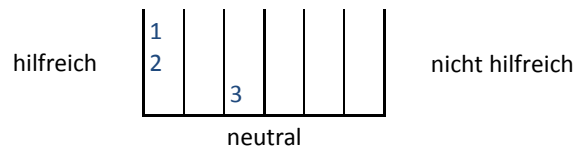
Pilot: PA-2018 -1 bis 3

Datum: Januar 2018

Bewegungsschnelligkeit des Collectives

Pilot 3: [Dazu wäre ein] größerer Unterschied zu Normbereich [erforderlich].

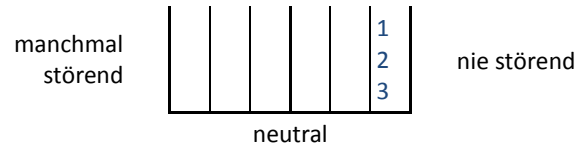
b)



Bemerkungen:

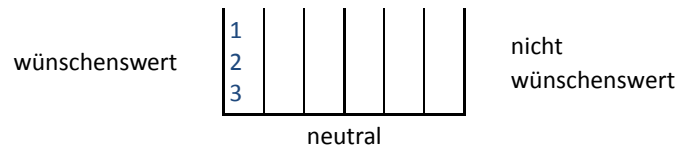
Pilot 3: Friction gibt kein Feedback über Position im gelben Bereich.

c)



Bemerkungen: _____

d)



Bemerkungen: _____

e) ☐ zu kräftig ☐ ok, aber ein bisschen zu kräftig ☐ genau richtig ☐ ok, aber ein bisschen zu schwach ☐ zu schwach

1, 2 3

Bemerkungen: _____

Pilot: PA-2018 -1 bis 3

Datum: Januar 2018

After SAETO with TC for red STOP and yellow INFO/TOP-range, OEI

C 11. Bedford Workload Rating nach Phasen

Abheben und Schweben	1, -, 3
Beschleunigen	1, -, 3
Steigen	2, -, 2

C 12. Die **automatische Verschiebung des Tactile Cues von den AEO Limits zu den OEI Limits** fand ich

a)

Hilfreich

1					
2					
2					

neutral

Nicht hilfreich

Bemerkungen: _____

b)

Wünschenswert

1					
2					
2					

neutral

Nicht
wünschenswert

Bemerkungen: _____

Pilot: PA-2018 -1 bis 3

Datum: Januar 2018

3. Notizen

Notizen des Versuchsleiters: Beobachtungen und mündliche Pilotenkommentare

Pilot 1: "Rahmen der Brille liegt auf FLI"
 SAETO without TC:
 Konfiguration ohne tactile Cue: Würden Sie das Manöver sonst auch so fliegen? [ja]
 Hier liegt viel Workload/Aufmerksamkeit auf dem Display.
 with TC, only red:
 "Sensitivität reicht", "Toll, sowas mag ich!"
 "Deutlich angenehmer", "Kann viel mehr rausschauen", "Easy", "Macht Spaß"
 with TC, red and yellow:
 "Ticker kommt zu früh" [Während des Ausprobierens bei deaktivierter Simulation, danach Erläuterung über Prädiktor]
 "Vorstopper gut zum sensitiv Fliegen"

Pilot 2: Fliegt mit Handschuhen
 SAETO without TC:
 Nutzt während der ersten Runs bewusst den Gong als Indikator. Nach Erläuterung, dass dieser zu vermeiden ist, nicht mehr.
 with TC, only red:
 "Das ist intuitiv, sehr schön!"
 with TC, red and yellow, explanation:
 "ah perfekt"; "super toll", "wenig Weg" [im gelben Bereich]
 "Für normalen Takeoff brauche ich das nicht, aber hilft"
 "Hilft bei Einschätzung, ob OEI-Fähigkeit gegeben"
 with TC, red and yellow:
 "War einfacher, [das] Abheben und Schweben, weil Hover Power bei gelb" [Das ist Zufall und kann je nach Gewicht auch anders sein]
 "Gut für safe Takeoff: Nur bis MCP, dann weiß ich, dass ich safe bin"
 "Sehr intuitiv, Riesen Hilfe, weil man raus schauen kann"
 "Hat gerüttelt, dann auf Anzeige geschaut" [Beim automatischen Reduzieren des Limit. Kein Shaker, sondern leichte Diskontinuität beim Nach-Unten-Fahren des Softstops]

Pilot 3:
 SAETO without TC:
 Auf die Frage, nach der Selbsteinschätzung, ob das Verhalten realistisch ist:
 "schon realistisch, würde so viel reinschauen, die Weltwahrnehmung erfolgt dann peripher" "Alle Overtorques bisher nur wegen Divided Attention"; "Daher bin ich ein Freund vom Helm, ich lese die FLI-Werte [dann] vom Helm ab, so [hier] muss ich Kopf und Augen bewegen"; "Die Übungskünstlichkeit durch die Brille ist akzeptabel"
 with TC, only red:
 "Zwei Mal gemerkt, weil kurz wieder auf 60 kts, fand ich super gut"; "Gar nicht mehr drauf geschaut"; "Kann nach draussen schauen, bessere SA"; "tip-top super"
 with TC, only red, aggressive:

Pilot: PA-2018 -1 bis 3

Datum: Januar 2018

"Da kann man nicht mehr viel rausholen" [an Zeit]
with TC, red and yellow:
explanation:
"Oh, der Bereich ist klein"; "Detent ist gut"; "Friction sollte gefühlsmäßig ein bisschen höher sein"; "Der gelbe Bereich spielt hier keine Rolle"
run:
Frage an den Piloten: Bis an MTP, rot gegangen oder nur bis MCP, gelb?
"Hier ist die Friction vielleicht ausreichend gegenüber der Alternative des Softstops, weil der Bereich so kurz ist"; "Der Softstop erinnert an die Alouette"; "Bei anderen Maschinen ist der gelbe Bereich länger, da wäre eine Federkonstante, bzw. ein Softstop hilfreich, [...]"; "Mit Friction allein, weiß ich nicht wo ich innerhalb des Bereiches bin, [aber] wenn der Bereich kurz ist, dann merkt man eh keinen Unterschied"

Pilot: PA 2018-1 bis 3

Datum: Januar 2018

2. Teil B Sidestick Konfiguration

Sidestick Konfiguration

B-1-03 Wie sind Sie mit den aktiven Steuern im Vergleich zur herkömmlichen Steuerung zurecht gekommen?

Viel besser

1							
	3	2					

Viel schlechter

Kein Unterschied

Bemerkungen: _____

B-1-04 Die Ergonomie im Cockpit mit jeweils einem Sidestick links und einem rechts war im Vergleich zu der mir gewohnten Anordnung mit einem Centerstick und einem Kollektivhebel...

Viel besser

		1					
	2						
	3						

Viel schlechter

Kein Unterschied

Bemerkungen: _____

B-1-05 Ich könnte mich an eine Steuerung mit den Sidesticks gewöhnen.

für Cyclic:	Trifft voll zu	<table border="1"> <tr> <td>1</td> <td></td> <td></td> <td></td> <td></td> <td></td> </tr> <tr> <td></td> <td>2</td> <td></td> <td></td> <td></td> <td></td> </tr> <tr> <td>3</td> <td></td> <td></td> <td></td> <td></td> <td></td> </tr> </table>	1							2					3						Trifft gar nicht zu
1																					
	2																				
3																					
		neutral																			
für Collective:	Trifft voll zu	<table border="1"> <tr> <td>1</td> <td></td> <td></td> <td></td> <td></td> <td></td> </tr> <tr> <td></td> <td>2</td> <td></td> <td></td> <td></td> <td></td> </tr> <tr> <td>3</td> <td></td> <td></td> <td></td> <td></td> <td></td> </tr> </table>	1							2					3						Trifft gar nicht zu
1																					
	2																				
3																					
		neutral																			

Bemerkungen: _____

Pilot: PA 2018-1 bis 3

Datum: Januar 2018

3. Teil D Torque Protection Postflight

- D 1. Das hier gezeigte Tactile Cue zur Signalisierung, dass sich der Torque **innerhalb des gelben Bereich** befindet, einer erhöhte Reibkraft beim Ziehen, erforderte eine aktive Piloteneingabe, um es zu spüren. Das fand ich...

☐ wünschenswert, genau richtig ☐ nicht optimal, aber besser als ohne (siehe nächste Frage) ☐ überhaupt nicht wünschenswert (ggf. Bemerkung)

1, 2, 3

Bemerkungen: _____

Pilot 2: Evtl. muss die Reibung angepasst werden, Vibrationen etc. Auftreten (real life)

- D 2. Ein ideales Tactile Cue zur Signalisierung, dass sich der Torque **innerhalb des gelben Bereich** befindet,...

☐ ist ausreichend, wenn es nur beim Bewegen des Steuers spürbar wird
☐ sollte immer spürbar sein

1, 2, 3

☐ ...z.B. dadurch, dass der Pilot eine moderate Gegenkraft (z.B. Softstop) aufbringen muss. Auch wenn man dann den Stick nicht loslassen kann, ohne dass er durch diese Kraft unter die Schwelle zum gelben Bereich zurückkehrt.

1, 2, 3

☐ z.B. durch eine stetige Vibration
☐ keine der genannten Optionen, aber ich habe keine Idee wie.
☐ keine der genannten Optionen, sondern

Pilot: 1 oder einer Art ganz lokaler "Raste" beim "Reinziehen" und "Nachlassen"

☐ sollte sich in unterschiedlichen Flugphasen unterschiedlich verhalten. Nämlich:

Bemerkungen: _____

Pilot 2: Wann nicht unumgänglich, sollte sich die Kontrollstrategie **nicht** verändern!

- D 3. **Gelber Bereich:** Was sollte so bleiben und was sollte geändert werden?

Pilot 2: Für die demonstrierten Szenarien sollten die gewählten Parameter beibehalten werden. Bei Übertragung auf reale LFZ müssten diese nochmal modifiziert werden.

Pilot 3: Unterschied der Friction größer zum Normbereich (nice to have); Force Gradient im Gelben Bereich

Pilot: PA 2018-1 bis 3

Datum: Januar 2018

Van der Laan – Skala zur Gebrauchstauglichkeit

D 4. Wie würden Sie das eben gezeigte Konzept des haptischen First-Limit-Indicators (haptische Torque Protection) bewerten?

Nützlich	1 2 3						Nutzlos
Angenehm	1 2 3						Unangenehm
Schlecht					1 2 3		Gut
Nett	1 2 3	2					Nervig
Effizient	1 2 3	2					Unnötig
Ärgerlich					1 2 3		Erfreulich
Hilfreich	1 2 3					*	Wertlos
Nicht wünschenswert					1 2 3		Wünschenswert
Aktivierend	1 3	2					Einschläfernd

Pilot: PA 2018-1 bis 3

Datum: Januar 2018

Ausgereift	<table border="1"> <tr><td></td><td></td><td>1</td><td></td><td></td><td></td></tr> <tr><td>2</td><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td></tr> <tr><td></td><td></td><td>3</td><td></td><td></td><td></td></tr> </table>			1				2								3				Verbesserungs- würdig
		1																		
2																				
		3																		
Einsatztauglich	<table border="1"> <tr><td></td><td></td><td>1</td><td></td><td></td><td></td></tr> <tr><td>2</td><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td></tr> <tr><td></td><td></td><td>3</td><td></td><td></td><td></td></tr> </table>			1				2								3				Nicht einsatztauglich
		1																		
2																				
		3																		

Bemerkungen:

Pilot 1: zu "Ausgereift" und "Einsatztauglich": Steckt in den Kinderschuhen und sollte über den Collective hinaus betrachtet werden

[*Kreuzt "Wertlos" an. Das ist wahrscheinlich ein Fehler, wegen der alternierenden Skala, da es komplett den anderen Antworten auf die anderen Fragen widerspricht. Daher wird nachfolgend mit der Antwort "Hilfreich" weitergearbeitet] b.w.

Pilot: PA 2018-1 bis 3

Datum: Januar 2018

D 5. Welche weiteren Anmerkungen haben Sie zur haptischen Torque-Protection nach den hier gemachten Erfahrungen? Was muss verbessert werden?

Freitext:

Pilot 1: siehe D4.

Pilot: PA 2018-1 bis 3

Datum: Januar 2018

4. Debriefing/Interview

Debriefing

G-1-03 Haben Sie allgemeine Anmerkungen zum Ablauf der Studie?

Freitext:

Pilot 2: Seher hilfreich! Die Idee der haptischen Torque-Protection war [...] gefordert worden, wurde damals allerdings von [...] verworfen da angeblich technisch nicht realisierbar. Ihre Studie hat mir gezeigt, daß man technisch sehr wohl in der Lage ist, solche Features zu implementiere

Pilot 3: Gefällt mir

G-1-05 Würden Sie auch an weiteren Studien teilnehmen?

Freitext:

Pilot 1: Ja, auf alle Fälle!!!

Pilot 2: Jederzeit wieder.

Pilot 3: ja

Vielen Dank für Ihre Teilnahme!

E. Technische Daten

Tabelle E.1.: Technische Daten und Umrechnungsfaktoren des linker Sidestick [133]

Parameter	Einh.	Wert
Griff Referenz Punkt (GRP)	mm	203.00
Gesamtauslenkung	deg	32 (+/- 16)
	mm	113 (+/- 57)
Umrechnung	deg / %	0.32
	% / deg	3.13
	mm / %	1.14
	% / mm	0.88
	mm / deg	3.53
	deg / mm	0.28
Kalibrierfaktoren ¹		
Kraft: interner → kalibrierter Wert	-	1.22
Kraft: kalibrierter → interner Wert	-	0.82
Weg: interner → kalibrierter Wert	-	1.01
Weg: kalibrierter → interner Wert	-	0.99

¹ jeweils bezogen auf die Umrechnung des vom Sidestick ausgegebenen, d.h. „internen“ Wertes in den am FRP gemessenen.

Tabelle E.2.: Technische Daten der verwendeten Sidesticks

		
Manufacturer:	Liebherr Aerospace GmbH (LLI)	Stirling Dynamics Ltd.
Type:	Active Side Stick 3 rd Generation	Goldstick
Position:	left hand	right-hand
Deflection: longitudinal lateral:	+/- 16 deg +/- 14 deg	+/- 25 deg +/- 25 deg
Force at FRP: longitudinal: lateral:	+/- 140 N @ 203 mm +/- 60 N @ 203 mm (measured)	+/- 170 N @ 161 mm +/- 170 N @ 161 mm (calculated from manufacturer data)
Functionality:	2 nd order dynamics fully configurable: force-deflection, nonlinear damping, exception: model-mass is fixed and cannot be changed; tactile cues: Softstop, Hardstop, Breakout, Detent, Detent-Position, Shaker	2 nd order dynamics fully configurable: force-deflection, linear damping, Eigen frequency; excellent dry Friction. tactile cues: Softstop, Hardstop, Breakout, Detent, Shaker

F. Flugmodell und -Eigenschaften

F.1. Datensätze für Torquemodell Identifizierung

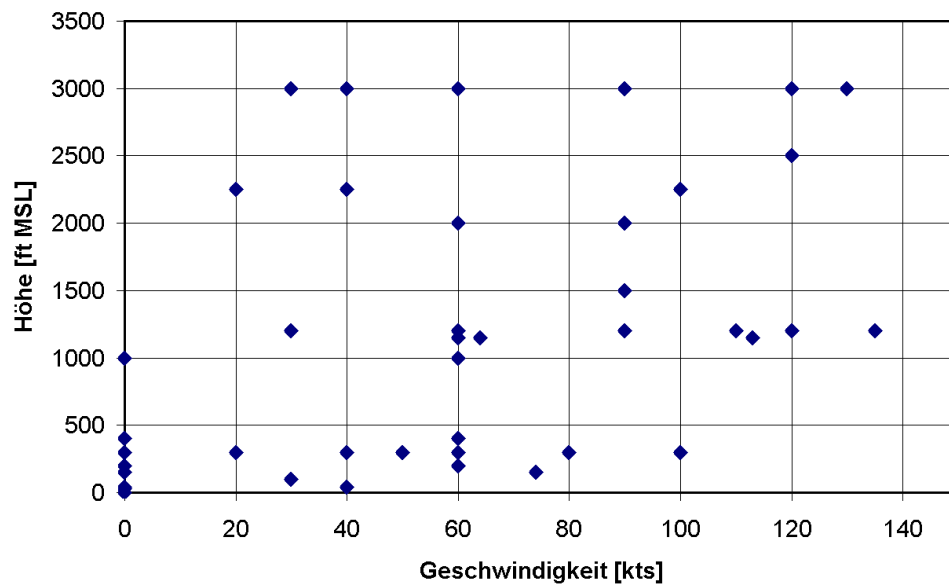


Abbildung F.1.: **Ausgewählte Datenpunkte für Systemidentifizierung Torquemodell**

F.2. Torquemodell Dynamikerweiterung

Die folgenden Ersatzmodelle wurden als Näherung für die verzögerte Wirkung, bzw. dynamische Antwort nach Pedal- und Kollektiveingaben aus ACT/FHS-Flugdaten identifiziert.

$$\frac{Q(s)}{\delta_0(s)} = e^{-\tau_c s} \frac{1}{c_4 s^4 + c_3 s^3 + c_2 s^2 + c_1 s + 1} \quad (\text{F.1})$$

$$\frac{Q(s)}{\delta_p(s)} = e^{-\tau_p s} \frac{1}{p_1 s + 1} \quad (\text{F.2})$$

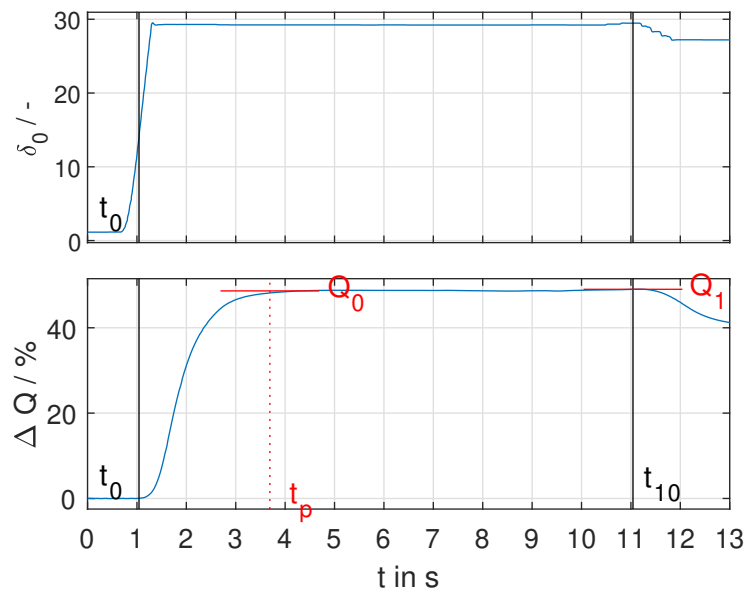
Das Dynamikmodell erfüllt die qualitativen Anforderungen gemäß ADS-33 [106, S. 82], siehe Abbildung F.2.

Tabelle F.1.: **Identifizierte Parameter Dynamik-Erweiterung (Gl. F.1 und F.2)**

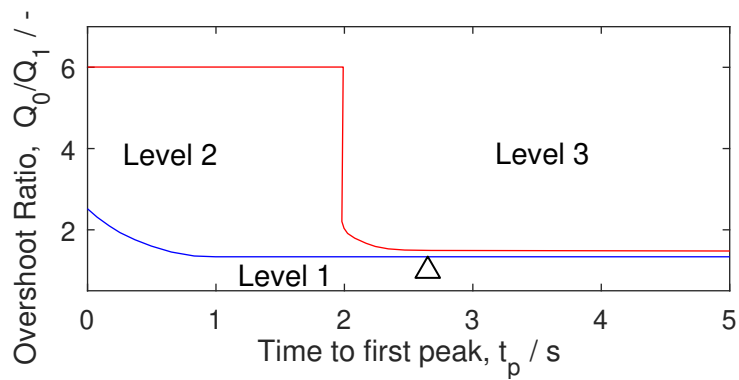
Parameter	Wert
c_1	$7,173 \cdot 10^0$
c_2	$1,243 \cdot 10^{-1}$
c_3	$8,185 \cdot 10^{-3}$
c_4	$1,680 \cdot 10^{-4}$
p_1	$8,000 \cdot 10^{-1}$
τ_c	$6,500 \cdot 10^{-1}$
	$(1,000 \cdot 10^{-1})^1$
τ_p	$1,000 \cdot 10^{-1}$

¹ Identifiziert wurde eine Totzeit von $\tau_c = 0.65$ s. Sie wurde später auf $\tau_c = 0.10$ s reduziert.

F.3. Flugeigenschaftskriterien



(a) Sprungantwort



(b) Level Plot

Abbildung F.2.: **Torque Response Kriterium: Level 1**

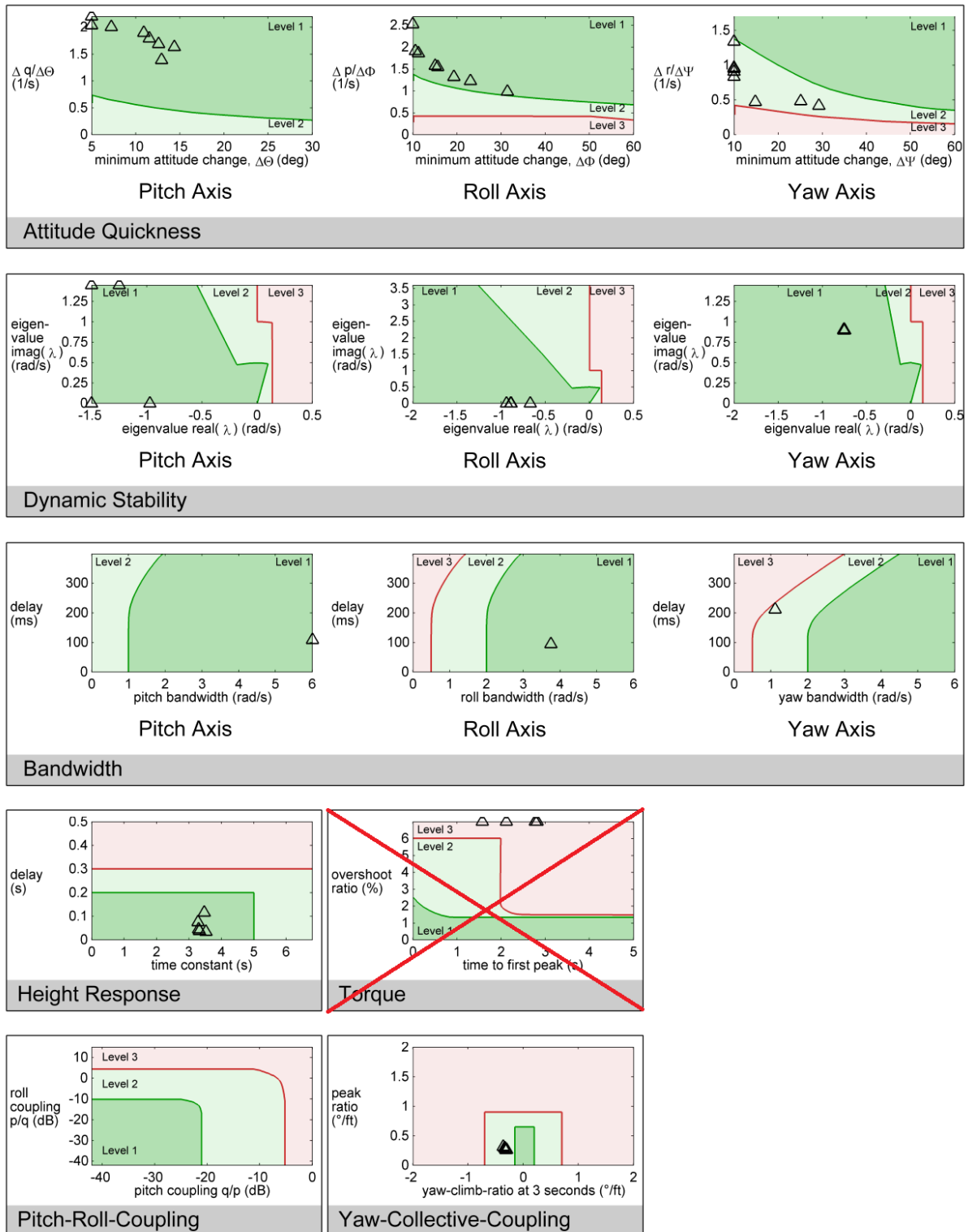


Abbildung F.3.: Flugeigenschaften Hover (Torque separat, s.o.)

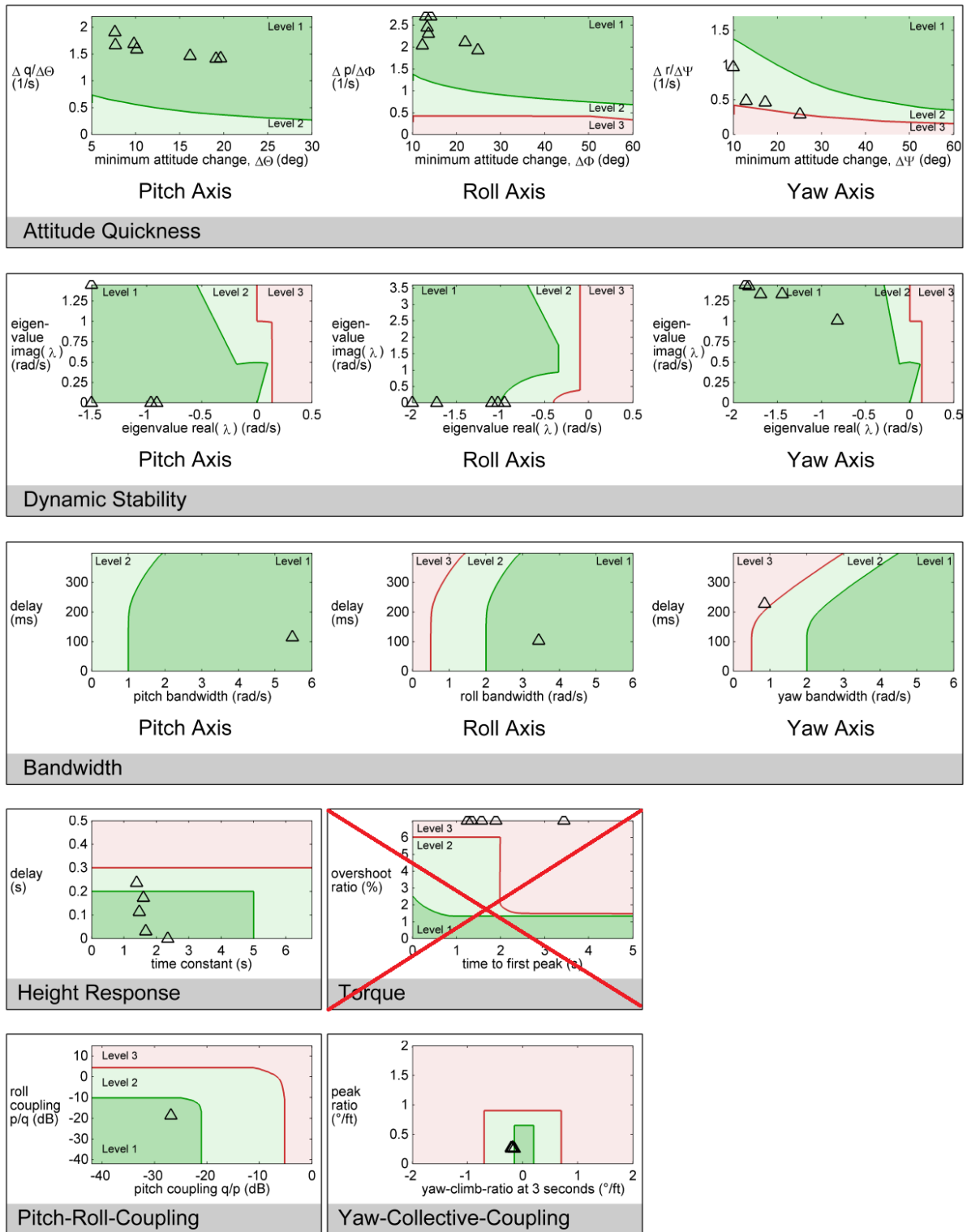


Abbildung F.4.: Flugeigenschaften 60 kts (Torque separat, s.o.)