

# VERBESSERUNG VON FLUGPRÄZISION UND ARBEITSBEANSPRUCHUNG BEI MANUELLEN RNP-ANFLÜGEN DURCH VORGABEREGLER UND ANZEIGEN FÜR DEN ENERGIEWINKEL (nxControl)

K. Schreiter\*, S. Müller<sup>+</sup>, R. Luckner\*, D. Manzey<sup>+</sup>, Technische Universität Berlin  
\*Institut für Luft- und Raumfahrt, <sup>+</sup>Institut für Psychologie und Arbeitswissenschaft

## Zusammenfassung

Mit steigenden Präzisionsanforderungen bei immer komplexeren Flugtrajektorien erhöht sich die Arbeitsbeanspruchung der Piloten im manuellen Flug besonders bei der Ansteuerung von Triebwerken und Bremsklappen. Die konventionelle Steuerung über Hilfsparameter wie Triebwerksdrehzahl bzw. Hebelstellung erlaubt keine exakte Vorhersage der Zustandsänderung. Stattdessen muss abgewartet und die Eingaben gegebenenfalls angepasst werden. Ergänzend zu bestehenden Vorgaberegeln im Cockpit (z. B. am Sidestick bzw. Steuerhorn) wurde deshalb im DFG-Vorhaben nxControl für die Steuerung von Triebwerken und Bremsklappen ein Vorgaberegler entwickelt, der das Lastvielfache in Flugbahnrichtung  $n_x$  als Kommandowert verwendet (nxController). Das x-Lastvielfache ist synonym zum Gesamtenergiewinkel und wird direkt durch Schub- und Widerstandskraft aber auch durch Wind beeinflusst. Dieser Parameter gibt Auskunft über die Stärke der Zustands- bzw. der Gesamtenergieänderung, weshalb ein direkter Zusammenhang zwischen erwarteter Reaktion und Eingabe hergestellt wird. Der nxController soll somit ermöglichen, im manuellen Flug hohe Präzisionsanforderungen mit geringer Arbeitsbeanspruchung zu erfüllen. Eine Mensch-Maschine-Schnittstelle, bestehend aus Eingabehebel und Anzeigeelementen in den primären und sekundären Anzeigen des Cockpits, zur Ansteuerung und Überwachung soll zudem das Energiebewusstsein erhöhen. Das Gesamtsystem wurde in einen Forschungssimulator integriert und in verschiedenen Studien evaluiert. Dieser Beitrag stellt das nxControl-System mit Fokus auf dem Vorgaberegler und die Evaluationsergebnisse bei Standard-ILS-Landeanflügen ohne Störungen sowie anspruchsvoller und steiler RNP-Landeanflüge vor. Die Ergebnisse der Studien zeigen, dass die Versuchspersonen nach kurzem Training mit dem System die gestellten Aufgaben mit der geforderten Präzision erfüllen können. Beim RNP-Landeanflug sind zudem Verbesserungen in der Flugpräzision bei verringerter Arbeitsbeanspruchung durch das nxControl-System zu beobachten. Das System verspricht somit, manuelles Fliegen unter hohen Präzisionsansprüchen bei akzeptabler Beanspruchung zu ermöglichen.

## Nomenklatur

### Abkürzungen

CAS	kalibrierte Fluggeschwindigkeit
EAS	äquivalente Fluggeschwindigkeit
EPR	Triebwerksdruckverhältnis
FL	Flugfläche
ILS	Instrumentenlandesystem
MSL	Meereshöhe
MMS	Mensch-Maschine-Schnittstelle
N1	Fan-Drehzahl
PFD	primäre Fluganzeige
RMSE	quadratisch gemittelter Fehlerwert
RNP	geforderte Navigationsgenauigkeit
SPL	Bremsklappen
THR	Schub
TLX	Task Load Index

$k$	Laufvariable
$LA$	Hebelaktivität
$LP$	Hebelposition
$LT$	Hebelschwelle
$N$	Stichprobengröße
$n$	Lastvielfaches   Probengröße
$p$	Überschreitungswahrscheinlichkeit
$SD$	Standardabweichung
$s$	komplexer Frequenzparameter
$\sigma$	Schubeinstellwinkel
$T$	Zeitkonstante
$t$	Zeit
$V$	Geschwindigkeit
$W$	Widerstandskraft
$x$	Zustandsparameter
$Z$	Zustand

### Symbole

$A$	Auftrieb
$\alpha$	Anstellwinkel
$\Delta$	Abweichung von der Referenz
$\delta$	Hebelstellung
$E$	Energie
$\eta_K$	Ausschlag der Hochauftriebshilfen
$F$	Schubkraft   Übertragungsfunktion
$g$	Erdbeschleunigung
$G$	Gewichtskraft
$\gamma$	Bahnwinkel
$H$	Höhe
$i$	Zeitschritt
$K$	Proportionalfaktor

### Indizes

$B$	Bremsklappen
$com$	Kommando
$E$	Energie
$err$	Fehler
$F$	Schub
$K$	inertial
$k$	bahnfestes Koordinatensystem
$T$	Schubregler
$t$	Zeitschritt
$tot$	total
$W$	Wind
$x$	Längsrichtung

## 1 EINLEITUNG

An den zukünftigen Luftverkehr werden hohe Anforderungen gestellt, um das wachsende Luftverkehrsaufkommen zu bewältigen (siehe z. B. Flightpath 2050 [1]). Vor allem das Erfliegen von komplexen Flugtrajektorien unter einem hohen Maß an Präzision wird als Möglichkeit gesehen, den Luftraum besser auszunutzen und Staffelungsabstände zu verringern. Im vollautomatischen Flugbetrieb ist dies bereits erfüllbar. Jedoch ist manuelles Fliegen nicht nur bei kurzfristig nötigen Bahnänderungen oder gar dem Ausfall des Autopiloten weiterhin notwendig. Auch zur Aufrechterhaltung der Flugfertigkeiten ist der stete Einsatz des manuellen Flugs unabdingbar, wie ein *Safety Alert for Operators* der FAA deutlich macht [2]. Allerdings erzeugen die hohen Anforderungen an die Präzision des zukünftigen Luftverkehrs hohe Arbeitsbelastungen im manuellen Flug. Eine mögliche Lösung dieses Konflikts liegt in der Verwendung von Vorgaberegler, wie sie bereits für die Lageregelung über die aerodynamischen Stellflächen eingesetzt werden (z. B.  $n_z$  Control Law bei Airbus Flugzeugen [3]). Statt der konventionellen Steuerung der Stellflächenausschläge können die Piloten die physikalische Auswirkung kommandieren und werden damit durch die Veränderung der Flugeigenschaften bei Stabilisierung und Ausgleich von Störungen unterstützt, bleiben aber als „Regler“ eingebunden (*in-the-loop*). Diese Art der Unterstützung wird jedoch bisher nur für die aerodynamischen Stellflächen und damit die schnellen Lagebewegungen des Flugzeugs eingesetzt. Triebwerksschub und Bremsklappen werden im manuellen Flug konventionell gesteuert. Die Auswirkungen von Eingaben müssen durch Drehzahl, Druckverhältnisse o.ä. bzw. der Hebelstellung eingestellt und durch Zustandsänderung im Display antizipiert werden. Jedoch sind die Reaktionen auf Eingaben davon abhängig, welcher Flugzustand momentan herrscht. Zudem beeinflussen die Schubzugabe bzw. Widerstandserhöhung den Energiehaushalt. Diese Zusammenhänge müssen von den Piloten aus Änderungen von Geschwindigkeit und Höhe selbst ermittelt werden. Daher handelt es sich um ein komplexes Steuerkonzept, was unter hohen Präzisionsansprüchen hohe kognitive und motorische Anforderungen stellt. In [4, 5] wurde das nxControl-System vorgestellt, welches durch einen Vorgaberegler für das Lastvielfache in Flugbahnrichtung  $n_x$  die Steuerung von Schub und Widerstand unterstützt. Eine angepasste Mensch-Maschine Schnittstelle (MMS) erleichtert die Steuerung und Überwachung des nxControl-Systems sowie der Energiezustandsänderung des Flugzeugs. In der in [5] beschriebenen Studie wurde das nxControl-System bereits in kurzen Flugszenarien getestet und der konventionellen manuellen Steuerung gegenübergestellt. Es wurde festgestellt, dass es für die teilnehmenden Piloten nach kurzer Trainingszeit möglich war, die gegebenen Aufgaben mit dem nxControl-System mit gleichbleibender Präzision aber verringerter Schubhebelaktivität durchzuführen. In diesem Beitrag werden sowohl das weiterentwickelte nxControl-System als auch zwei weitere Studien vorgestellt, welche die Einflüsse des nxControl-Systems einerseits bei einem Standard-Landeanflug mit Instrumentenlandesystem (ILS) und andererseits bei einem sehr anspruchsvollen Landeanflug unter *Required Navigation Performance* (RNP) Bedingungen zeigen. Ziel ist es den manuellen Flug auch unter den hohen

Anforderungen des zukünftigen Luftverkehrs zu ermöglichen.

## 2 DAS SYSTEM nxCONTROL: VORGABEREGLER UND MENSCH-MASCHINE-SCHNITTSTELLE

In heutigen mit *Sidestick* gesteuerten Passagierflugzeugen wird im manuellen Flug das vertikale Lastvielfache  $n_z$  für die Regelung der Nickbewegung verwendet. In Verbindung mit dem Schub können Fluggeschwindigkeit oder Bahnneigungswinkel eingestellt werden. Dabei werden die Triebwerke über ein Drehzahlkommando angesteuert. Der resultierende Triebwerksschub wirkt sich auf das Lastvielfache  $n_x$  aus, wobei die Stärke der Reaktion vom momentanen Flugzustand abhängt. Alternativ zur konventionellen Triebwerkssteuerung soll das nxControl-System direkt auf das longitudinale Lastvielfache  $n_x$  zurückgreifen, das in heutigen Konzepten nicht als Kommandogröße verwendet wird. Mit diesem Vorgabeparameter kann der Pilot die Änderungen der Gesamtenergie (Summe potentieller und kinetischer Energie) kommandieren. Mit dem  $n_z$ -Kommando des Sidesticks entscheidet der Pilot, ob die Energieänderung in Bahnneigungswinkel und/oder Fluggeschwindigkeit umgesetzt werden soll.

### 2.1 Flugmechanischer Hintergrund

Die flugmechanischen Beziehungen, die das Lastvielfache  $n_x$  beschreiben sind grundlegend und können in der Literatur unter verschiedenen Bezeichnungen gefunden werden, z. B. in [6–8]. Bekannte Bezeichnungen sind neben Lastvielfaches in Längsrichtung auch spezifischer Schubüberschuss, Steigpotential, Beschleunigungspotential, spezifische Energieänderung und Gesamtenergiewinkel.

Das Gesamtlastvielfache  $n_{tot}$  ist definiert als das Verhältnis aller äußeren Kräfte zur Gewichtskraft. Es entspricht damit auch der Gesamtbeschleunigung des Flugzeugs bezogen auf die Erdbeschleunigung [9]. Der Zusammenhang zwischen Beschleunigung und äußeren Kräften ergibt sich aus den flugmechanischen Bewegungsgleichungen, die beispielsweise nach dem zweiten Newton'schen Axiom aufgestellt werden. Für das longitudinale Lastvielfache in Flugpfadrichtung  $n_{xk,tot}$  ergeben sich aus der Widerstandsgleichung (x-Kraft-Gleichung) im Bahnachsensystem folgende gleichwertige Zusammenhänge (Annahme symmetrischer Flug: Schiebewinkel  $\beta = 0^\circ$ , Hängewinkel  $\Phi = 0^\circ$ , Azimutänderung  $\dot{\chi} = 0^\circ/s$ ):

$$(1) \quad n_{xk,tot} = \frac{1}{G} [F \cos(\alpha + \sigma - \alpha_W) - W \cos \alpha_W + A \sin \alpha_W]$$

$$(2) \quad = \frac{\dot{V}_K}{g} + \sin \gamma .$$

Für die weitere Betrachtung wird vereinfachend angenommen, dass der Schubeinstellwinkel  $\sigma$  dem Anstellwinkel  $\alpha$  entspricht und der Windanstellwinkel  $\alpha_W$  klein ist. Im Horizontallflug gleicht zudem die Auftriebskraft  $A$  der Gewichtskraft  $G$ :

$$(3) \quad n_{xk,tot} = \frac{F - W}{G} + \sin \alpha_W = \frac{\dot{V}_K}{g} + \sin \gamma .$$

Einerseits beschreibt Gleichung (3) die Abhängigkeit von den äußeren Einflüssen Schub  $F$  und Widerstand  $W$  bezogen auf die Gewichtskraft  $G$  sowie dem Windanstellwinkel  $\alpha_W$ . Andererseits sind auch die Einflüsse der Bewegungsgrößen Bahnbeschleunigung  $\dot{V}_K$ , bezogen auf die Erdbeschleunigung  $g$ , und Bahnwinkel  $\gamma$  erkennbar. Gleichung (3) lässt die möglichen Steuer- und Störgrößen erkennen: Schub und Widerstand können über Triebwerksdrosselgrad  $\delta_F$ , Bremsklappen  $\delta_B$  und Hochauftriebshilfen  $\eta_K$  aktiv beeinflusst werden, während der Windeinfluss störend auf  $n_x$  (der erweiterte Index wird im Folgenden verkürzt) wirkt. Für das nxControl-System werden die Triebwerke und Bremsklappen als Stellorgane verwendet. Die Eingaben eines Piloten an diesen Stellorganen verändern die Schub- und Widerstandskraft jedoch nicht linear. Sie sind davon abhängig, welcher Flugzustand momentan vorherrscht. Bild 1 zeigt qualitativ die Abhängigkeit von Schub und Widerstand von der äquivalenten Fluggeschwindigkeit  $V_{EAS}$ , sowie von den Stellelementen. Gleicht die Schubkraft den Widerstand aus, bleibt die momentane Geschwindigkeit konstant (ohne Windeinfluss) und entspricht der Geschwindigkeit am Schnittpunkt der beiden Kurven (Trimpunkt  $Z_1$ ).

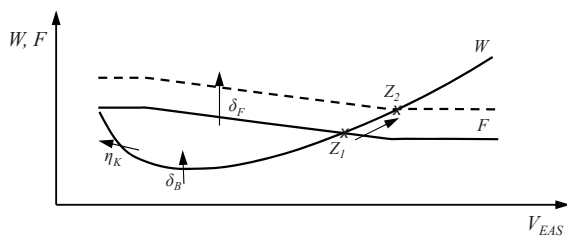


BIld 1: Abhängigkeiten von Schub  $F$  und Widerstand  $W$  von den Stellgrößen Schubhebel  $\delta_F$ , Bremsklappenhebel  $\delta_B$  und Klappenstellung  $\eta_K$  sowie der äquivalenten Fluggeschwindigkeit  $V_{EAS}$ ;  $Z_1$  und  $Z_2$  markieren getrimmte Zustände für zwei verschiedene Schubhebelstellungen

Wird der Schub  $F$  durch  $\delta_F$  oder der Widerstand  $W$  durch  $\delta_B$  verändert, entsteht eine Differenz, wie sie im Bild beispielhaft durch die verschobene Schubkurve (gestrichelte Linie) dargestellt ist. Nach Gleichung (3) kann diese Differenz in eine Geschwindigkeitsänderung oder in eine Bahnwinkeländerung umgesetzt werden. Wird die Bahn durch den Piloten oder zusätzliche Regler (z. B.  $n_z$ -Regler) gehalten, wird der Überschuss in Beschleunigung umgesetzt, die sich mit steigender Geschwindigkeit und damit wachsendem Widerstand (oberhalb Fahrt minimalen Widerstands) allmählich verringert. In diesem Fall wird durch die Schub- bzw. Widerstandsänderung ein neuer Trimpunkt  $Z_2$  erreicht, der sich erst nach einer vergleichsweise langen Zeit einstellt.

Um ausgehend von einem Trimpunkt  $Z_1$  die Fluggeschwindigkeit zu ändern, würde es nach Bild 1 ausreichen, den Schubhebel auf eine Position zu stellen, die für den neuen Zustand  $Z_2$  benötigt würde, und die Höhe mit dem Höhenruder zu halten. Um eine größere Beschleunigung zu erreichen, stellen Piloten einen höheren Wert für den Schubhebel ein, da die Annäherung an den neuen Zustand sonst nur langsam geschehen würde. Aus dem ursprünglichen Zustandskommando (*attitude command*) macht der

Pilot somit ein Ratenkommando (*rate command*). Die Vorstudie [10] zeigte, wie erwartet, dass Piloten mit den Stellelementen Triebwerk und Bremsklappen nicht nur die Geschwindigkeitsänderungen sondern auch Höhenänderungen steuern. Soll eine andere Flughöhe bei gleichbleibender Geschwindigkeit erreicht werden, wird mit Schub die Steigrate bzw. mit Schub und Bremsklappen die Sinkrate eingestellt und die Geschwindigkeit indirekt durch die Änderung der Längslage mit dem Höhenruder gesteuert, vgl. auch [11].

Die nichtlinearen Zusammenhänge der Flugzeugbewegung hängen vom Flugzustand ab und sind auch wegen der zeitverzögerten Reaktion der Triebwerke für die Piloten nur schwer abschätzbar. Eine von den Piloten eingesetzte Strategie ist die Verwendung von Blockeingaben an Schub- und Bremsklappenhebel. Ein Erfahrungswert wird vorgegeben und entsprechend korrigiert, wenn dieser nicht zur gewünschten Änderung in Fluggeschwindigkeit oder Bahnwinkel führt. Zur Unterstützung werden „Pitch-and-Power“ Tabellen benutzt, welche vorberechnete Eckwerte für Triebwerksdrehzahl und Längslagewinkel für stationäre Flugzustände in verschiedenen Höhen und Geschwindigkeiten beinhalten. Die Stärke der Reaktion des Flugzeugs auf eine Eingabeänderung ist jedoch weiterhin nur qualitativ durch den Piloten abschätzbar. Das genaue Einstellen und Halten des gewünschten Flugzustandes erfordert deshalb meist mehrere Korrekturen. Um den manuellen Flug präziser bei gleichzeitig geringerer Arbeitsbeanspruchung durchzuführen, müssen diese Abläufe verbessert werden. Durch das nxControl-System wird der manuelle Flug dahingehend unterstützt, dass die Eingabeparameter von Triebwerksdrehzahl  $N_1$  (o.ä.) und Bremsklappenhebelstellung zu einem physikalisch interpretierbaren Parameter geändert werden, der enger mit der gewünschten Änderung des Flugzustands zusammenhängt. Zur besseren Nachvollziehbarkeit des Lastvielfachen  $n_x$  durch die Piloten wird der Zusammenhang der Geschwindigkeitsänderung und des Bahnwinkels zur Änderung der kinetischen und potentiellen Energie und somit der Gesamtenergie des Flugzeugs hergestellt. Das Lastvielfache  $n_x$  entspricht dem so genannten Gesamtenergiewinkel  $\gamma_E$ , der die Änderung der Gesamtenergie  $\dot{E}_{tot}$  bezogen auf Gewicht und Bahngeschwindigkeit  $V_K$  in Grad beziffert:

$$(4) \quad \sin \gamma_E = \frac{\dot{E}_{tot}}{GV_K} = \frac{\dot{V}_K}{g} + \sin \gamma.$$

Für die manuelle Steuerung beschreiben die Gleichungen (3) und (4) die Möglichkeit der Piloten den Energiestatus des Flugzeugs durch Einstellung von Schub und Widerstand mit einer bestimmten Rate zu ändern und dies auf die Änderung von potentieller und/oder kinetischer Energie durch das Einstellen des Flugbahnwinkels zu verteilen. Da diese Größe mit dem Bahnwinkel direkt verglichen werden kann und somit auch Aussagen über die Geschwindigkeitsänderung zulässt, eignet sie sich als mentales Modell für das Lastvielfache  $n_x$  und wird für die Mensch-Maschine Schnittstelle (MMS) des nxControl-Systems verwendet.

Es sei angemerkt, dass die Piloten eine kalibrierte Fluggeschwindigkeit ( $V_{CAS}$ ) überwachen und steuern statt der bisher betrachteten Bahngeschwindigkeit. Daher basiert das in den Displays dargestellte und vom Regler verarbeitete Lastvielfache  $n_x$  auf der Fluggeschwindigkeit.

## 2.2 nxController: Der Vorgaberegler für Triebwerke und Bremsklappen

Die Kommando- und Regelgröße für den nxController ist das Lastvielfache  $n_x$ . Für die Mensch-Maschine-Schnittstelle (MMS) wird stattdessen der physikalisch gleichwertige aber besser interpretierbare Energiewinkel  $\gamma_E$  verwendet. Mit Triebwerksschub und Bremsklappenwiderstand stehen zwei Stellgrößen zur Verfügung. Die Kommandos werden mit einem *Control Allocation* Gesetz dem Triebwerk oder den Bremsklappen zugeordnet. In der Literatur sind zahlreiche Verfahren zu finden (z. B. in [12–14]). Das nxControl-System wurde in einem pilotenzentrierten Auslegungsprozess entworfen, weshalb in einer Studie ermittelt wurde, wie Linienpiloten mit Schub und Widerstand den Energiestatus des Flugzeugs steuern [10, 15]. Es wurde festgestellt, dass der Schub primär und Bremsklappen sekundär eingesetzt werden und nicht gemeinsam. Deshalb wurden im nxController für Triebwerke und Bremsklappen zwei separate Regelgesetze ausgelegt. Ein logischer Schalter steuert die Verwendung des jeweiligen Regelgesetzes automatisch, muss jedoch vom Piloten freigegeben werden (siehe Bild 2). Die Triebwerke sind das aktive Stellelement, wenn die Bremsklappen vollständig eingefahren sind. Die Bremsklappen werden vom Regler angesteuert, wenn die Triebwerke im Leerlauf sind und die Piloten ein Umschalten erlauben. Somit ist das Hauptstellelement stets der Triebwerksschub.

Die Aufteilung in zwei separate Regelgesetze erlaubt die isolierte Auslegung für beide Stellelemente. Der Auslegungsprozess wird sowohl durch lineare als auch nicht-lineare Analysen gestützt. Zur Erstellung einer passenden Reglerstruktur werden lineare Modelle der Regelstrecke verwendet, mit denen die Übertragungsfunktionen von Schub und Bremsklappen auf das Lastvielfache  $n_x$  im Frequenzbereich erstellt werden können. Für eine konstante Fluggeschwindigkeit können beide Antwortverhalten durch proportionale Systeme mit realen Zeitverzögerungen (Schub dritter und Bremsklappen erster Ordnung) beschrieben werden. Wird ein Schubüberschuss in Erhöhung der Fluggeschwindigkeit umgesetzt, muss zusätzlich die Auswirkung auf den aerodynamischen Widerstand abgebildet werden. Der Effekt einer Geschwindigkeitsänderung auf das Lastvielfache  $n_x$  wird gut durch ein differenzierendes Systemglied mit Zeitverzögerung erster Ordnung (DT1)

wiedergegeben. Die Auslegung beider Regler für Schub und Bremsklappen erfordert somit jeweils die Betrachtung zweier Modi – konstante Geschwindigkeit ohne DT1-Glied und konstante Höhe mit DT1-Glied. Die Übertragungsfunktion des Triebwerksschubs auf das Lastvielfache  $F_{n_x,THR}$  lautet somit

$$(5) F_{n_x,THR} = \frac{K}{(T_1s+1)(T_2s+1)(T_3s+1)} \left( \frac{s}{T_4s+1} \right),$$

wobei der DT1-Term in der hinteren Klammer steht. Für die Übertragungsfunktion der Bremsklappen auf das Lastvielfache ergibt sich eine analoge Gleichung.

Aufgrund der linearen Modelle und folgender gestellter Anforderungen wurde die Struktur des Reglers festgelegt. Eine vorrangige Anforderung ist stationäre Führungsgenauigkeit, da Piloten kein System akzeptieren würden, welches nicht ihre Eingaben realisiert. Daher ist ein integratives Verhalten des Reglers notwendig. Da der Modus *konstante Höhe* durch den DT1-Term eine zusätzliche Nullstelle in das System implementiert, muss diese durch einen weiteren Integrator eliminiert werden. Integratoren wirken sich jedoch negativ auf dynamische Stabilität aus, weshalb die Wirkung der Integratoren auf den Niederfrequenzbereich begrenzt werden sollte. Deshalb besteht der Regler aus zwei in Reihe geschalteten proportional-integralen Gliedern (PI) erster Ordnung anstelle zweier Integratoren. Diese Reglerstruktur ist für beide Stellelemente angewendet (siehe Bild 2) und die resultierende Übertragungsfunktion des Schubreglers  $F_{THR_{com},n_x,err}$  ist in Gleichung (6) angegeben.

$$(6) F_{THR_{com},n_x,err} = K_T \frac{T_{1T}s + 1}{s} \frac{T_{2T}s + 1}{s}$$

Bild 3 zeigt die Sprungantworten des Lastvielfachen im konventionellen Fall einer Schubhebeeingabe sowie mit  $n_x$ -Vorgaberegler, wenn der Schubüberschuss in Geschwindigkeitsänderung umgesetzt wird. Der Kommandowert  $\Delta n_{x,com}$  beträgt 0,1 bzw. im konventionellen Fall  $\Delta N1$ , was anfangs auch ein  $\Delta n_x = 0,1$  bewirkt. Der wachsende Fehler im anliegenden Lastvielfachen  $n_x$  mit steigender Geschwindigkeit im konventionellen Fall wird durch den nxController mit steigender Triebwerksdrehzahl ausgeglichen, sodass die Vorgabe eingehalten wird. Daraus resultierend ist auch die Beschleunigung konstant, was eine präzise Geschwindigkeitssteuerung im Hinblick

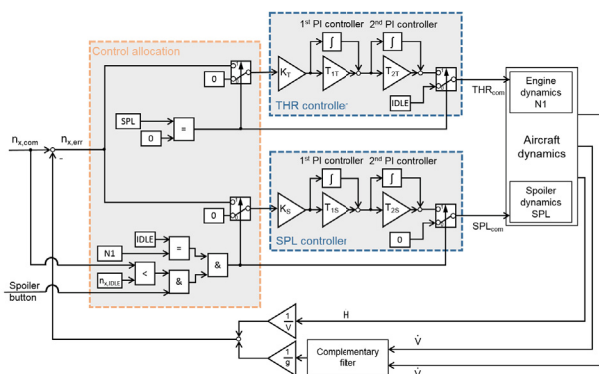


BILD 2: Aufbau nxController im geschlossenen Regelkreis

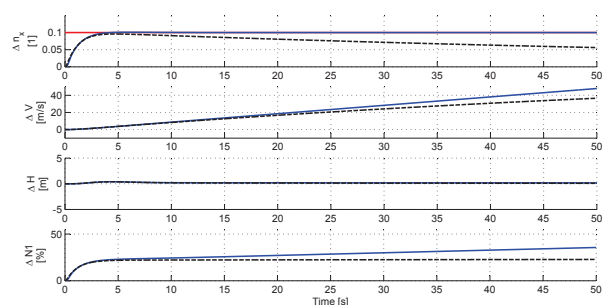


BILD 3: Sprungantwort nach Kommando  $\Delta n_{x,com} = 0,1$  (rote durchgezogene Linie) mit nxController (blaue durchgezogene Linie) und ohne (schwarze gestrichelte Linie)



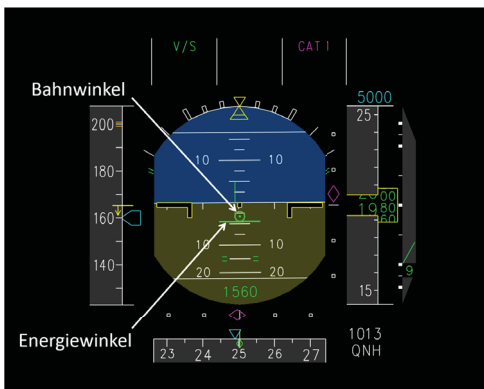
auf Zeiteinschränkungen ermöglicht. Wird der Schubüberschuss nicht in Geschwindigkeitsänderung umgesetzt ist die Sprungantwort ähnlich dem konventionellen Fall. Jedoch können die Piloten die passende Schubeinstellung für den gewünschten Bahnwinkel direkt einstellen, statt sich langsam herantasten zu müssen.

Die vorhandenen Reglerparameter wurden mit dem Software Tool MOPS (Multi-Objective Parameter Synthesis) vom Deutschen Zentrum für Luft- und Raumfahrt [16] ausgelegt. Zur Optimierung wurden neben den genannten linearen Modellen auch ein hochwertiges nichtlineares Simulationsmodell verwendet und in MOPS eingebunden. Die Optimierungsparameter wurden als sogenannte *bad/good* Kriterien zur Optimierung im Zeit- und Frequenzbereich aufgestellt, die sowohl aus den Vorstudien mit Piloten als auch der Modellanalyse entwickelt wurden. Für die Regelung des Energiezustandes durch Triebwerke und Bremsklappen gibt es keine standardisierten Reglerkriterien wie etwa bei der Lageregelung. Dies liegt vor allem daran, dass sich die Lageregelung in einem deutlich schnelleren Zeitverhalten widerspiegelt als die Energieregulierung (etwa Faktor 10). Die typischen Regleranforderungen für die Lageregelung wurden dennoch als Anhaltspunkte genutzt zur Aufstellung der Kriterien für den  $n_x$ -Vorgaberegler. Im Bildbereich sind die Optimierungsparameter Dämpfungsgrad der Reglervariable, Dämpfungsgrad der Stellgröße und Phasenreserve übliche Kriterien. Im Zeitbereich wurden Anstiegszeit, Überschwingweite, stationärer Fehler, maximaler Fehler und mittlerer Fehler der Reglervariablen bei einer Sprungantwort sowohl im linearen als auch im nichtlinearen Modell verwendet. Die gewählten Kriterien ermöglichten einerseits die Vorgabe eines akzeptablen Zeitverhaltens, wie es beispielsweise beim  $C^*$ -Kriterium [17] für die Lageregelung eingesetzt wird, und andererseits wird der Frequenzgang des Gesamtsystems charakterisiert. Die Reglerparameter wurden für verschiedene Geschwindigkeiten und Höhen mittels globaler Optimierung bestimmt. Damit werden ähnliche Sprungantworten für gleiche Eingaben erreicht, egal wie der Flugzustand sich ändert. Da die Reglervariable  $n_x$  aus der Ableitung der gemessenen Fluggeschwindigkeit und des Bahnwinkels ermittelt wird, werden alle Störungen im Energiezustand, z. B. durch Konfigurationsänderungen oder Wind, vom Regler verar-

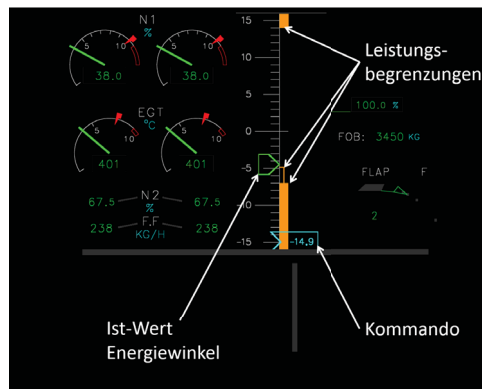
beitet. In diesen Situationen kann die Arbeitsbeanspruchung der Piloten gesenkt werden, da die Anpassung der Eingabe entfällt, wenn einmal der richtige Wert eingestellt ist. Allerdings wird die Fluggeschwindigkeit mit der Bahngeschwindigkeit komplementär gefiltert, um Einflüsse von Turbulenz auf die Schubruhe zu verringern.

### 2.3 nxStatus, nxPFD und nxLever: Die Mensch-Maschine-Schnittstelle

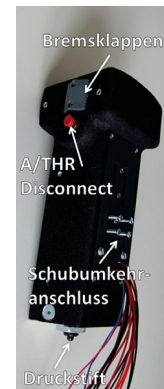
Die Mensch-Maschine-Schnittstelle im Cockpit dient einerseits zur Eingabe und Überwachung der neuen Steuerungsart und andererseits zum allgemeinen Verständnis von Energieänderung und -verteilung im manuellen Flug. Drei neue Elemente wurden hinzugefügt. In der primären Fluganzeige (PFD) wurden Zusatzsymbole für Bahnwinkel (Kreis mit Mittelpunkt) und Energiewinkel (horizontale Linie) hinzugefügt (bezeichnet als nxPFD, siehe Bild 4(a)), welche somit die Überwachung der Änderung des Energiezustands und dessen Verteilung auf potentielle und kinetische Energie erlauben. Durch den Bahnwinkel werden Höhenänderungen deutlich und die Unterschiede zwischen Bahn- und Energiewinkel lassen direkt die Auswirkungen auf die Geschwindigkeit erkennen. Diese Informationen beziehen sich ausschließlich auf den momentan vorhandenen Zustand und sind auch ohne nxController nutzbar. Ähnliche Ansätze zur Integration von Energieinformationen ins Cockpit wurden z. B. in [18–20] vorgestellt und werden in einigen Head-Up-Displays eingesetzt [21]. Zudem ist die Darstellung des Bahnwinkels in konventionellen PFDs standardmäßig möglich und den Piloten bekannt. Die visuelle Schnittstelle zum nxController bildet das nxStatus Display, eine vertikale Gradskala im *Engine Warning Display* (siehe Bild 4(b)). Auf der vertikalen Gradskala sind der Kommandowert (blaue Fahne), der momentan vorherrschende Wert (grüner Zeiger) sowie die minimalen und maximalen Begrenzungen dargestellt. Die Begrenzungen stehen für die Leistungsenveloppe und verändern sich entsprechend anliegender Fluggeschwindigkeit und Höhe sowie der Konfiguration der Hochauftriebshilfen und Fahrwerk bei Start- und Landung. Die untere Begrenzung teilt sich auf in den minimal möglichen Energiewinkel bei Leerlaufschub (umrahmtes unteres Band) und



(a) nxPFD: Energie- und Bahnwinkel im künstlichen Horizont



(b) nxStatus im *Engine Warning Display*: vertikale Gradskala für Energiewinkel und Kommando



(c) nxLever: Griff mit Bremsklappenaktivierung

BILD 4: MMS des nxControl-Systems

den minimalen Energiewinkel bei Leerlaufschub, wenn zusätzlich die Bremsklappen maximal ausgefahren sind (ausgefülltes unteres Band). Da die Bremsklappen vom Regler erst eingesetzt werden, wenn der Pilot dies aktiv erlaubt, kann der Ist-Wert die erste Begrenzung nur nach Aktivierung der Bremsklappen unterschreiten. In Bild 4(b) ist eine Situation gezeigt, in der der Pilot einen minimalen Wert gewählt hat, der bereits außerhalb der möglichen Begrenzungen liegt. Der Kommandowert liegt am unteren Anschlag, während der Ist-Wert das  $x$ -Lastvielfachen bei Leerlaufschub anzeigt, da keine Aktivierung der Bremsklappen erlaubt wurde. Die Darstellung der Leistungsvelope wurde auch in [22] vorgeschlagen, wobei hier die Informationen in einem Vertikaldisplay entlang des Flugpfades dargestellt werden. Konzepte zur Darstellung von Schubgrenzen in Skalendarstellung inklusive Kommando- und Ist-Wert der Fan-Drehzahl  $N_1$  bzw. des Druckverhältnisses  $EPR$  wurden z. B. in [23] patentiert und im PFD integriert [24]. In den beiden  $nx$ Displays wird das Lastvielfache in Form des Energiewinkels dargestellt, da der Grad-Wert direkt mit der Pitch-Skala verknüpft werden kann und somit das Verständnis erleichtert.

Der  $nx$ Lever ist die Eingabeschnittstelle, welche entgegen der konventionellen Schubsteuerung nur einen Hebel für alle vorhandenen Triebwerke bereitstellt. Da nur der Regelparameter  $n_x$  vorgegeben werden soll, reicht ein Hebel aus. In Bild 4(c) ist ein Prototyp des Hebegriffs dargestellt. Es sind die üblichen Schalter für *Auto-Thrust-Disconnect* und Schubumkehr vorgesehen. Zudem ist ein Schiebeschalter hinzugefügt worden, der zur Aktivierung der Bremsklappen dient. Kommandieren die Piloten eine Energieabnahme, die durch Leerlaufschub nicht erreicht werden kann, kann dieser Schalter nach hinten gezogen werden, wodurch die Bremsklappen zur Regelung des kommandierten Wertes verwendet werden können. Diese Aktivierung muss erneuert werden, wenn zwischenzeitlich wieder die Triebwerke zur Regelung verwendet wurden. Der Hebelweg ist in der Mitte durch eine Raste geteilt in Energiezu- bzw. -abfuhr. Rastet der Druckstift an der Unterseite des Griffs in die Mittelstellung ein, bedeutet dies, dass der momentane Gesamtenergiezustand gehalten werden soll.

### 3 EVALUATIONSTUDIEN

Das beschriebene Gesamtsystem wurde in zwei Flugsimulatorstudien evaluiert. Dabei sollte geprüft werden, ob es die anfänglich gestellten Anforderungen in Hinblick auf Präzision und Arbeitsbeanspruchung erfüllen kann. Im einzelnen wurde erwartet, dass sich durch die zusätzliche Energieanzeige, sowie das präzisere Einstellen des benötigten Schubs bei Verwendung von  $nx$ Control ein Vorteil für die Präzision des manuellen Flugs ergibt. Konkret wurde angenommen, dass die Piloten vorgegebene Flugparameter, wie Fluggeschwindigkeit und Höhe präziser einhalten können. Zudem wurde angenommen, dass die Piloten durch  $nx$ Control entlastet werden und somit die Arbeitsbeanspruchung der Piloten im manuellen Flug bei der Nutzung des  $nx$ Control-Systems gegenüber dem konventionellen manuellen Fliegen geringer ist. Speziell wurde durch die zusätzliche Referenz des Energiewinkels und die Assistenz des Vorgabereglers inklusive Kommandowert eine Reduktion der Schubhebelnutzungshäufigkeit erwartet.

Dies wird damit begründet, dass ein direkteres und präziseres Einstellen des benötigten Schubs möglich ist als in der konventionellen Schubsteuerung und es damit zu einer kognitiven und motorischen Entlastung der Piloten kommt. In der ersten Evaluationsstudie, die zusammen mit der in [5] beschriebenen Kampagne durchgeführt wurde, war die Flugaufgabe ein standardmäßiger geradliniger ILS-Landeanflug auf Frankfurt 25R. An dieser Studie nahmen 11 lizenzierte Verkehrspiloten teil (alle männlich, 2 Kapitäne, 9 *First Officer*). Sie besaßen alle Airbus A320 Type-Ratings und waren somit mit den Displays, dem *Sidestick* sowie den *Fly-By-Wire Control Laws* vertraut. Durchschnittlich waren die Teilnehmer 34 Jahre alt ( $SD = 9,2$  a) mit einer Spanne von 27 bis 55 Jahren. Die Flugerfahrung lag zwischen 770 und 14 560 Flugstunden, durchschnittlich 4 371 Flugstunden ( $SD = 4 558,6$  h).

Eine zweite Evaluationsstudie beinhaltete Flugaufgaben mit sehr hohen Ansprüchen an die Präzision – ein Landeanflug auf Salzburg mit *Required Navigation Performance* RNP 0.1. An dieser Studie nahmen 24 Personen teil, von denen 10 Kapitäne, 2 *Senior First Officer* und 12 *First Officer* waren. Das Durchschnittsalter lag bei 40 Jahren ( $SD = 12,6$  a) in einer Altersspanne von 24 bis 63 Jahren. Die durchschnittliche Erfahrung der Piloten lag bei 8505 Flugstunden ( $SD = 7 422,4$  h) im Bereich von 600 bis 25 000 Flugstunden. Alle Piloten besaßen Airbus Type-Ratings (20 x A320, 3 x A330/A340, 1 x A380).

Beide Versuche fanden im Festsitzsimulator SEPHIR (*Simulator for Educational Projects and Highly Innovative Research*) [25] des Fachgebiets Flugmechanik, Flugregelung und Aeroelastizität (FMRA) an der TU Berlin statt, der mit Airbus-ähnlichen Displays und *Sidestick* inkl. *Control Laws* ausgerüstet ist. Zum neuen  $nx$ Control-System gab es vor Beginn der Testszenarien ein Training, welches jeweils ca. 1,5 Stunden dauerte. Aus versuchstechnischen Gründen führten die Versuchspersonen die Versuche vom Kapitänssitz durch, ungeachtet der üblichen Position entsprechend ihres Ranges. Dennoch wurden die Piloten angehalten sich so gut wie möglich wie unter realen Flugbedingungen zu verhalten. Während der Landeanflüge übernahm der Versuchsleiter die Aufgaben des *Pilot Monitoring* wie z.B. Eindrehen der Zielwerte an der Autopiloten-Bedieneinheit (*Flight Control Unit*, FCU), Ausführen der kommandierten Konfigurationsänderungen und Ausrufen von üblichen Informationen (*Call Outs*).

#### 3.1 Getestete Systemkonfigurationen

Es wurden zwei Systemkonfigurationen verglichen:

- Konventionelle Ansteuerung von Schub und Bremsklappen und
- $nx$ Control ( $nx$ PFD,  $nx$ Status und  $nx$ Controller).

Eine Zwischenstufe, bei der nur das  $nx$ PFD eingesetzt wurde, wird in diesem Beitrag nicht weiter dargestellt (siehe dazu [26–28]). Die Reihenfolgen der Konfigurationen wurden ausbalanciert, sodass sowohl Lerneffekte als auch Ermüdungseffekte über die Versuchsteilnehmer ausgeglichen wurden.

Es ist anzumerken, dass in der ersten Studie mit dem ILS-Anflug ein erster Prototyp des  $nx$ Control-Systems getestet wurde, der von dem in Abschnitt 2 beschriebenen System abweicht. Zum Einen wurde die  $nx$ Status-Anzeige in einem

separaten Display über dem Navigationsdisplay dargestellt und zum Anderen waren die Reglerparameter noch im Stadium der Vorauslegung und noch nicht optimiert worden.

### 3.2 Vergleichsparameter zur Evaluation

Zur Bewertung der Effekte durch nxControl auf die Präzision wurden Flugparameter gewählt, welche für das Energiemanagement vertretend sind: Fluggeschwindigkeit und Flughöhe sowie Bahnwinkel und Energiewinkel. Da die Flugaufgabe eine fest vorgegebene Flugbahn mit vorgegebenen Geschwindigkeiten vorsieht, kann als Maß für die Präzision die Abweichung der Flugparameter von deren Vorgaben verwendet werden. Hierfür wurde der quadratisch gemittelte Fehlerwert (*Root Mean Square Errors*, RMSE) des jeweiligen Flugparameters  $x$  über den mit 50 Hz aufgezeichneten Zeitschritten  $i$  verwendet:

$$(7) \quad RMSE(x) = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (x_i - x_{soll,i})^2}{n}}$$

Die Arbeitsbeanspruchung wurde sowohl durch subjektive Befragung als auch über objektive Messungen der Hebelbewegung erfasst. Jeden Anflug sollten die Piloten direkt anschließend mit dem NASA *Task Load Index* (TLX) [29] und dessen sechs Subskalen: geistige Anforderungen, körperliche Anforderungen, zeitliche Anforderungen, Leistung, Anstrengung und Frustration bewerten. Daraus wurde ein Gesamtwert (TLX Score) ermittelt. Die zusätzliche Gewichtung der einzelnen Kategorien aus dem originalen NASA-TLX wurde aufgrund geringer Aussagekraft weggelassen [30].

Die Hebelaktivität wurde während der Simulation aufgezeichnet. Diese wurde in eine prozentuale Hebelaktivität überführt, indem die Hebelbewegungen gezählt wurden. Gezählt wurde dann, wenn die Hebelposition im Abstand von  $\Delta t = 2$  s eine Schwelle  $LT = 0,2$  cm überschreitet (0,5 % des gesamten Hebelwegs):

$$(8) \quad count_k = \begin{cases} 0, & \text{if } |LP_{t_k - \Delta t} - LP_{t_k}| < LT \\ 1, & \text{if } |LP_{t_k - \Delta t} - LP_{t_k}| \geq LT \end{cases}$$

Die Hebelaktivität  $LA$  ist die Summe dieser Hebelbewegungen bezogen auf die Anzahl der Zeitpunkte  $N = t/\Delta t$ :

$$(9) \quad LA = \frac{\sum_{k=1}^N count_k}{N}$$

Je höher dieses Verhältnis ist, je öfter also Korrekturen der jeweiligen Einstellungen vorgenommen werden mussten, desto höher wurde die kognitive und motorische Beanspruchung bei der Erfüllung der Flugaufgabe angenommen.

Weiterhin wurden im zweiten Evaluierungsversuch in einem Debriefing-Fragebogen subjektive Eindrücke zum nxControl-System erfragt. Einerseits wurde die Nutzbarkeit (*Usability*) anhand vorgefertigter Statements und einer Skala von „Stimme nicht zu“, „Neutral“ und „Stimme zu“ von den Testpersonen beurteilt (Anlehnung an *System Usability Scale* [31]). Andererseits wurde erfragt bei welchen Displayelementen sich das Scanningverhalten bei hinzu geschaltetem nxControl-System verändert hat (Skala „Seltener“, „Unverändert“, „Häufiger“).

## 3.3 Flugszenario und Prozedur

### 3.3.1 ILS-Anflug auf Frankfurt FRA25C

In der ersten Evaluationsstudie lag der Fokus auf der Durchführbarkeit eines heutigen Standardverfahrens mit dem nxControl-System. Daher wurde ein ILS-Landeanflug auf Frankfurt als Flugaufgabe gewählt, der mit einer vorgegebenen und an die Versuchszwecke angepassten Flugprozedur für Konfigurations- und Geschwindigkeitsänderungen durchgeführt werden sollte (siehe Vertikalprofil in Bild 5). In 20 NM Abstand zur Landeschwelle von FRA25C begann das Flugszenario in 4000 ft Höhe über Meereshöhe (MSL) für einen geradlinigen Landeanflug. Vor dem Einflug auf den  $3^\circ$  *Glide Slope* wurden zwei Konfigurations- und Geschwindigkeitsänderungen durchgeführt, was einem üblichen Verlauf eines ILS-Anflugs entspricht. Beim Einflug auf den *Glide Slope* sollte die Geschwindigkeit gehalten werden, was eine präzise Einstellung des Schubs erforderte. Ein für Frankfurt ungewöhnlicher Verlauf wurde bei 6 NM vor der Landebahn vorgesehen, da die volle Landekonfiguration bei gleichbleibender Geschwindigkeit eingestellt werden sollte. Erst bei 5 NM vor der Landeschwelle sollte dann die Landegeschwindigkeit eingestellt werden. Solche Abfolgen sind jedoch an anderen Flughäfen, wie z.B. London Heathrow, durchaus Standard, da die Landeanflüge somit schneller beendet und die Landebahnen stärker ausgelastet werden können. Die angegebenen Punkte für die Geschwindigkeitsreduktionen sollten als Beginn der Verzögerung genutzt und mit Leerlaufschub ausgeführt werden. Es herrschte kein Wind, jedoch war die Außensicht durch Nebel bis zur Entscheidungshöhe erheblich beeinträchtigt.

### 3.3.2 RNP-Anflug auf Salzburg SZG33

Als Flugaufgabe der zweiten Studie wurde ein möglichst komplexes und aus Sicht des Energiemanagements anspruchsvolles Landeanflugszenario gewählt, das jedoch auch manuell nach Rohdaten (*Raw-Data*) zu erfliegen war. Dazu wurde die südöstliche RNP-Anflugroute auf Salzburg SZG33 [32] verwendet, welche durch Täler führt und somit beiderseits durch Gebirge begrenzt wird und zudem einen steileren *Glide Slope* aufweist ( $3,6^\circ$ ) als üblich. Die Genauigkeitsanforderung von RNP 0.3 (*Required Navigation Performance*) für diesen Anflug wurde für die Versuche noch verschärft und RNP 0.1 verlangt. Die Ablagen vom Sollflugpfad wurden mit Hilfe der vom ILS bekannten Rauten im PFD angezeigt. Ein *Dot*, der die gegebene Toleranz markiert, entsprach einer lateralen Ablage von 0,1 NM und vertikal 100 ft. Bild 6 zeigt das Vertikalprofil zusammen mit Konfigurationszeitpunkten sowie Geschwindigkeitsvorgaben anhand der lateralen Abstände zum nächsten Wegpunkt. Auch hier wurde für vergleichbare Ergebnisse eine an die Versuchszwecke angepasste feste Anflugprozedur vorgegeben, an die sich die Piloten möglichst präzise halten sollten. Diese Prozedur erhöhte den Anspruch an den manuellen Flug noch weiter, da mit relativ hoher Geschwindigkeit und ohne Hochauftriebshilfen in 12000 ft Höhe MSL auf den *Glide Slope* übergegangen wurde. Auch die schrittweise Konfiguration des Flugzeugs sollte die Belastung der Piloten bis kurz vor Ende des Anflugs auf einem hohen Level halten. Vom Beginn des Szenarios bis Wegpunkt

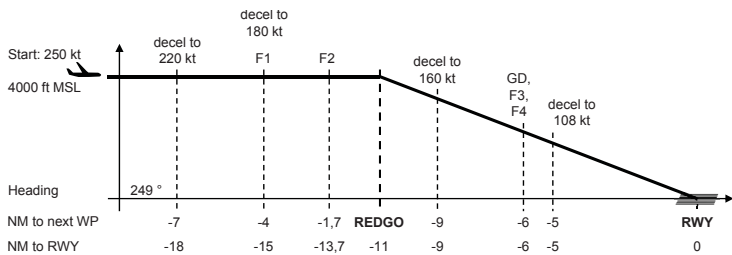


BILD 5: Flugprozedur auf Frankfurt FRA25C im Vertikalprofil über der Distanz zur Landebahn

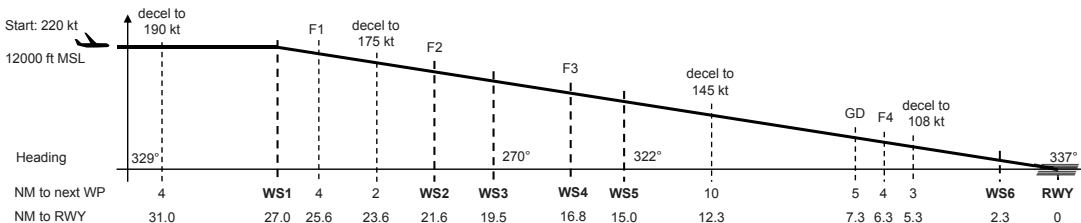


BILD 6: Flugprozedur auf Salzburg SZG33 im Vertikalprofil über der Distanz zur Landebahn

WP2 war ein geradliniger Weg zu erfliegen. Es folgte eine Linkskurve bis WP3 und nach einem kurzen Zwischenstück wurde ab WP4 eine Rechtskurve eingeleitet. Bis zur Entscheidungshöhe auf 2550 ft MSL folgte ein geradliniger Abschnitt, der kurz vor der Landebahn an WP6 noch mit einer weniger starken Rechtskurve zum Eindrehen auf die Landebahnrichtung abgeschlossen wurde. Damit vorrangig Fluginstrumente verwendet wurden (*head down*), wurde die Sichtweite in der Außensicht durch Nebel stark reduziert, so dass die Landebahn erst kurz vor Erreichen der Entscheidungshöhe sichtbar war. Zusätzlich herrschte ein stetiger 15 Knoten Seitenwind aus 057° (keine Turbulenz), der durch die Kursänderungen zwischenzeitlich vom Seitenwind auf einen Rückenwind wechselte und somit zusätzlich das Energiemanagement beeinflusste. Die angegebenen Punkte der Geschwindigkeitsänderungen sollten als Beginn der Verzögerungsphase benutzt werden und alle gegebenen Wegpunkte sollten als Überflugpunkte verwendet werden.

Die Anflugprozedur wurde je Systemkonfiguration zweimal hintereinander durchgeführt, um bei der Auswertung zwischen zwei Versuchen mitteln zu können.

#### 4 ERGEBNISSE

Die Vergleichsparameter der Simulatorstudien wurden statistisch analysiert und sind in Bild 7 und 8 als Boxplots dargestellt. Eine Box repräsentiert den Bereich zwischen den 25 % und 75 % Perzentilen, der durch den Median geteilt wird. Zusätzlich wird der arithmetische Mittelwert durch einen Stern dargestellt. Die Datenverteilungen wurden zwischen den Systemkonfigurationen paarweise durch t-Tests analysiert, welche die p-Werte (Wahrscheinlichkeit für zufällige Datenverteilungen) in den Bildüberschriften ergeben. Liegt dieser Wert unter dem üblichen Signifikanzniveau von  $\alpha = 0,05$ , kann die statistische Signifikanz der Mittelwertunterschiede zwischen den Systemkonfigurationen angenommen werden. [33]

#### 4.1 ILS-Anflug auf Frankfurt

**Flugpräzision der Piloten** Die Verteilungen der RMSE in Bild 7(a) bis 7(d) zeigen die Präzisionsparameter aller Versuchsteilnehmer. Es wird deutlich, dass die Mittelwerte der Parameter nur geringfügig und auch nicht statistisch signifikant variieren. Nur der Energiewinkel, welcher durch das nxControl-System geregelt wird, zeigt eine Tendenz zu kleineren Fehlerwerten mit nxControl (nur knapp nicht signifikant). Der erwartete Effekt der Verbesserung der Präzision mit nxControl ist in diesem Szenario somit nicht zuverlässig statistisch nachweisbar.

**Arbeitsbeanspruchung** Die Hebelaktivität als Maß der Arbeitsbeanspruchung ist, wie erwartet, mit dem nxControl-System deutlich und statistisch signifikant gesunken (siehe Bild 7(e)). Es ist jedoch anzumerken, dass aufgrund technischer Probleme nur bei fünf der Teilnehmer die Hebelaktivität mit dem nxControl-System aufgenommen wurde und daher die Stichprobe für diesen Parameter niedriger ist als bei den anderen Systemkonfigurationen. Der NASA-TLX Score (ohne Abbildung) als globales Maß für die wahrgenommene Arbeitsbeanspruchung in den unterschiedlichen Bedingungen zeigte keine signifikanten Unterschiede. Zum Vergleich mit der zweiten Evaluationsstudie sind in Bild 7(f) die Ergebnisse der Unterskala „Körperliche Anforderung“ dargestellt, die ebenfalls keine statistischen signifikanten Unterschiede zwischen den Systemkonfigurationen aufweisen.

#### 4.2 RNP Anflug auf Salzburg

**Flugpräzision der Piloten** Die Boxplots in Bild 8(a) bis 8(d) zeigen die Verteilungen der RMSE aller Versuchspersonen der jeweiligen Präzisionsparameter. Es ist erkennbar, dass der RMSE der Fluggeschwindigkeit im Vergleich zur konventionellen Konfiguration mit nxControl signifikant sinkt. Ein vergleichbarer Effekt für den RMSE für die Höhe wurde nicht gefunden. Die RMSE der beiden zusätzlich im nxPFD dargestellten Parameter Bahnwinkel und Energiewinkel zeigen unterschiedliche Ergebnisse. Wäh-



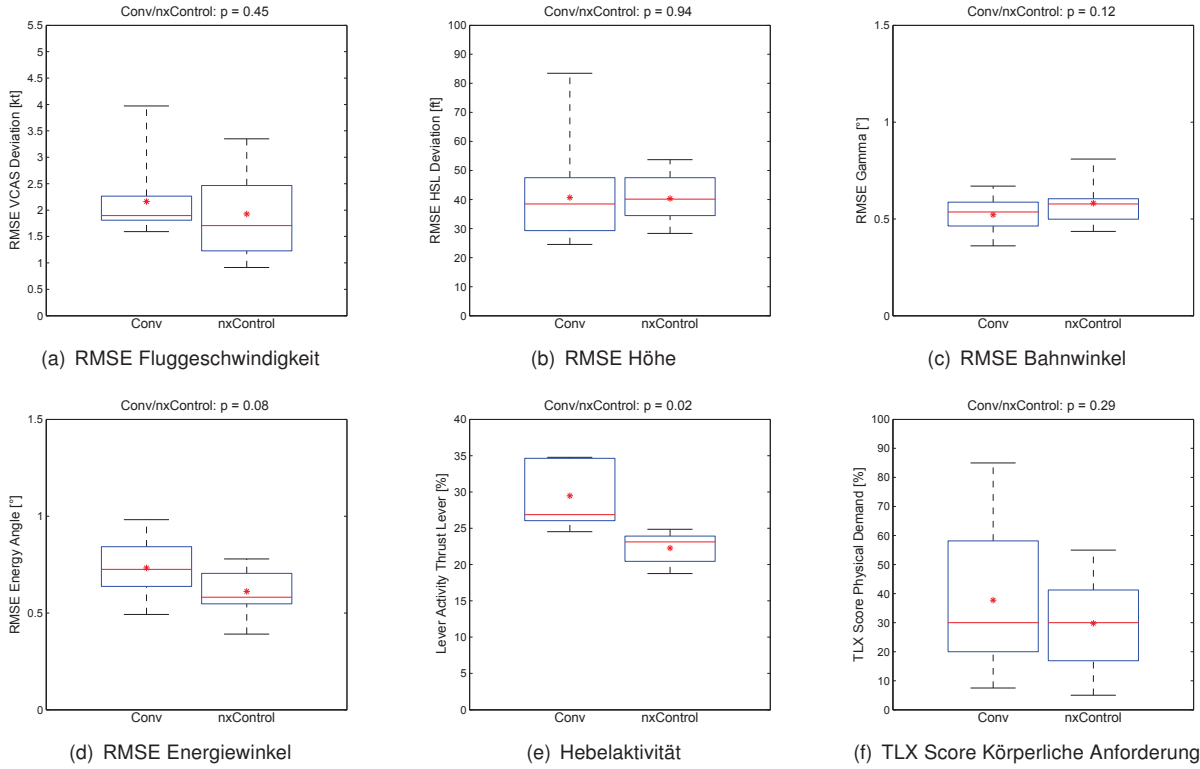


BILD 7: Ergebnisse ILS-Anflug auf Frankfurt: Statistische Auswertung der RMSE Werte von Präzisions- und Arbeitsbeanspruchungsparametern.

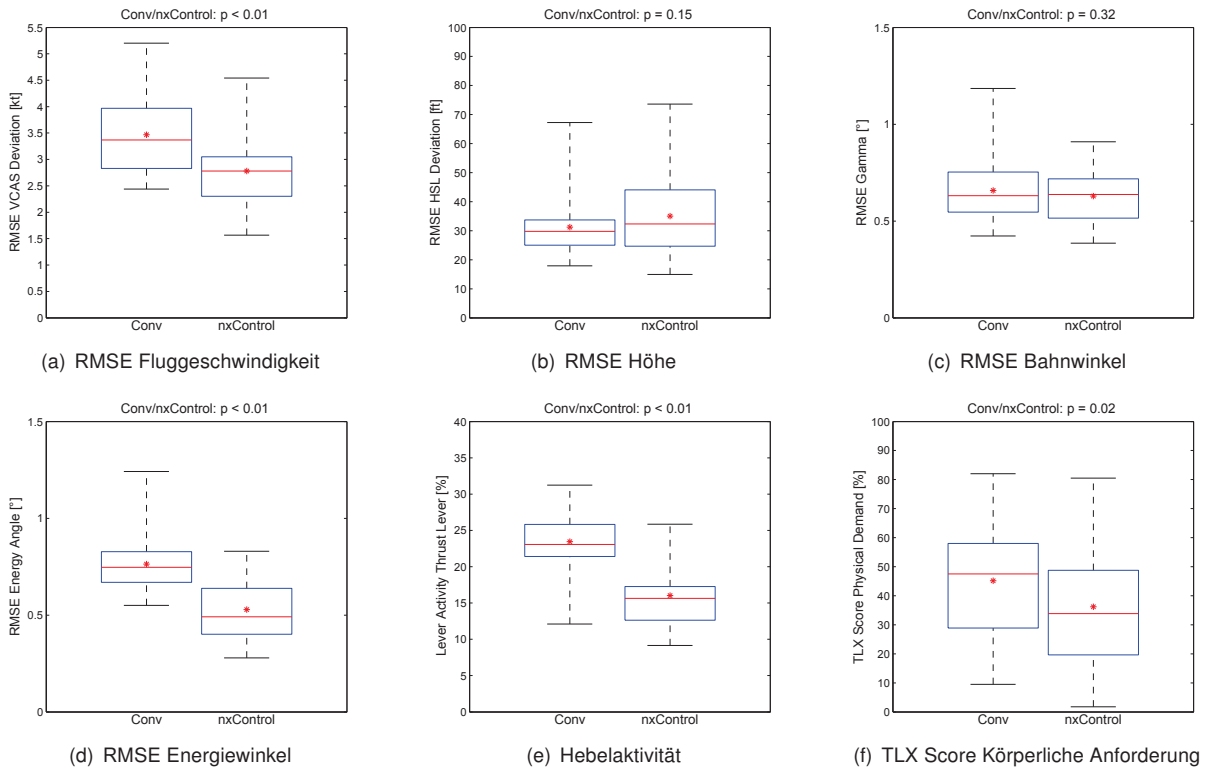


BILD 8: Ergebnisse RNP-Anflug auf Salzburg: Statistische Auswertung der RMSE Werte von Präzisions- und Arbeitsbeanspruchungsparametern.

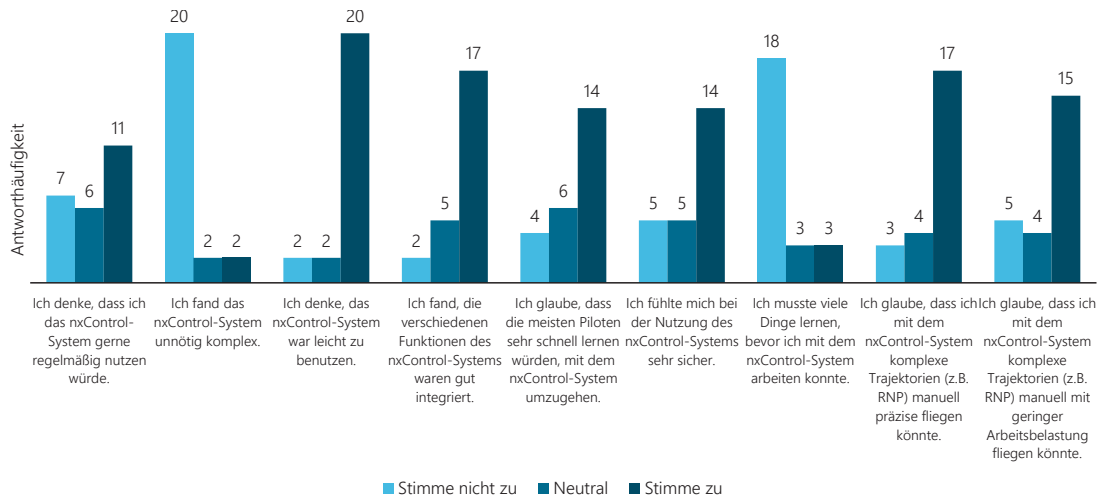


BILD 9: Usability-Fragebogen: Antworthäufigkeit je Frage

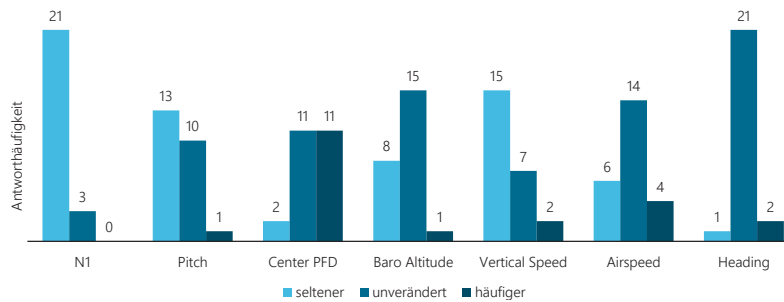


BILD 10: Scanning-Fragebogen: Antworthäufigkeit je genutztem Display-Element bei nxControl

rend der RMSE des Bahnwinkels in beiden Konfigurationen gleich bleibt, wurde der Fehler im Energiewinkel durch das nxControl-System gegenüber dem konventionellen Flug signifikant gesenkt.

**Arbeitsbeanspruchung** In Bild 8(e) sind die Boxplots der Hebelaktivität gezeigt. Wie erwartet reduziert sich die Hebelaktivität signifikant bei Verwendung des Gesamtsystems im Gegensatz zur konventionellen Schubsteuerung. Der Gesamt-Score des NASA-TLX (ohne Abbildung) zeigt keinen signifikanten Effekt bei der Arbeitsbeanspruchung. Werden jedoch die einzelnen Dimensionen des NASA-TLX Fragebogens separat ausgewertet, zeigt sich wie erwartet in der Subskala „Körperliche Anforderungen“ (Bild 8(f)) die Entlastung in der Simulatorkonfiguration mit hinzugeschaltetem nxControl. Die weiteren Dimensionen des TLX zeigten keine signifikant unterschiedlichen Ergebnisse.

**Fragebögen** Bild 9 zeigt die Fragestellungen und Ergebnisse des Usability-Fragebogens, wobei die kumulierten Antworthäufigkeiten je Frage angegeben sind. In jeder Frage zeichnet sich eine für das nxControl-System positive Antworttendenz ab. In Bild 10 sind die relevanten Display-Elemente und die Antworthäufigkeiten des Scanning-Fragebogens bei der Nutzung des nxControl-Systems veranschaulicht. Es wird deutlich, dass laut Einschätzung der Piloten Nicklage (Pitch), Vertikalgeschwindigkeit (Vertical Speed), Höhe und Drehzahl N1 seltener gescannt wurden bei Verwendung des nxControl-Systems. Hinge-

gen nimmt das Scanning des Zentrums des PFDs zu.

### 4.3 Diskussion der Ergebnisse

Die Ergebnisse der ILS-Anflug-Studie zeigen nur geringe Effekte durch den Einsatz des nxControl-Systems und decken sich mit den Resultaten der Studie mit kurzen Flugaufgaben [5]. Die Präzisionsparameter bleiben für beide Systemkonfigurationen nahezu gleich und auch die subjektive Wahrnehmung der Arbeitsbeanspruchung ändert sich kaum. Ausschließlich die Hebelbewegungshäufigkeit zeigt den erwarteten Effekt der verminderten Arbeitsbeanspruchung mit nxControl. Erklärt werden kann dies dadurch, dass Piloten Schwankungen der aktuellen Werte in einem gewissen Band tolerieren, damit der Flug nicht durch hochfrequente Steuerkommandos unruhig wird. Durch die relativ geringen Präzisionsanforderungen beim ILS-Anflug bestand kein Anreiz die Präzision noch weiter zu verbessern, weshalb das vermutete Potential des nxControl-Systems nicht genutzt wurde. Bemerkenswert ist, dass trotz des geringen Trainings die Ergebnisse mit nxControl gleich denen waren, die konventionell erfolgen wurden. Die Ergebnisse der anspruchsvolleren RNP-Anflug-Studie zeigen dagegen die erwarteten positiven Effekte des nxControl-Systems. So wurden die erwarteten Verbesserungen bei Geschwindigkeit und Energiewinkel durch nxControl erreicht. Nur Höhen- und Bahnwinkelfehler blieben unverändert. Dass der Höhenverlauf nicht durch nxControl beeinflusst wurde, folgt vermutlich aus dem bahnstabilen Regelgesetz

des Sidesticks. Energieänderungen werden dabei vorrangig in Geschwindigkeitsänderungen überführt, da das vertikale Lastvielfache  $n_z$  konstant gehalten wird. An diesem Verhalten ändert das nxControl-System nichts, weshalb auch keine Unterschiede in der vertikalen Bahnbewegung entstehen können. Da demnach Energieänderungen zunächst auf die Geschwindigkeit wirken, kann der Effekt durch nxControl am besten in den Geschwindigkeits- und Energieparametern abgelesen werden. Änderungen in der Geschwindigkeit können durch die zentralisierte Darstellung mit dem nxPFD schneller und genauer erfasst werden, als es mit einem konventionellen PFD der Fall ist, da der *Speed Trend* im PFD träge reagiert und erst ab einem bestimmten Schwellwert Änderungen darstellt. Damit können Piloten einem auftretenden Fehler schneller und genauer entgegenwirken. Auch die Darstellung des Energiewinkels bringt zusätzliche Informationen über den Energiestatus ins Cockpit, wodurch ungenaue Schubeinstellungen schneller erfasst werden. Der nxController verhindert zudem Fehler durch Störungen automatisch.

In beiden Anflugszenarien konnte nxControl die Hebelaktivität deutlich und wie erwartet senken. Zwar zeigte sich im Gesamtwert des NASA TLX kein signifikanter Unterschied in der subjektiven Gesamtbeanspruchung zwischen den Bedingungen, speziell die Werte für die Einschätzung der körperlichen Anforderungen zeigten aber den erwarteten Effekt. Das zeigt, dass die Möglichkeit der gezielteren Eingabe am Schubhebel durch die Darstellung des Energiewinkels im nxPFD zu einer Entlastung der Piloten geführt hat, da diese gezielt und nicht durch „blindes Herantasten“, wie im konventionellen Fall, steuern konnten. Da der Regler zudem Störungen automatisch ausgleicht, ohne weitere Eingaben zu erfordern, wird zusätzlich die objektive Belastung gesenkt. Allerdings war dieser Effekt nicht so groß, die insgesamt wahrgenommene Beanspruchung zu reduzieren. Im Debriefing merkten die Piloten an, dass das nxStatus Display zu weit entfernt vom primären Display ist, wodurch das Scanning des Kommandowertes erschwert wurde. Der Einbauort war durch die Möglichkeiten im Simulator vorgegeben. In einem zukünftigen Cockpit sollte das nxStatus Display zentraler platziert werden. Allgemein wurde das Scanning auf das Zentrum des nxPFD fokussiert. Es wird davon ausgegangen, dass die Konfrontation mit einem neuen System und dem eher kurzen Training eine erhöhte Arbeitsbeanspruchung im Vergleich zum alltäglichen konventionellen Fliegen hervorruft. Da die Abläufe und das Verständnis des neuen Systems nach der kurzen Einweisungszeit nicht so fest verankert sind wie im konventionellen Fall, ist eine gleichbleibende kognitive Arbeitsbeanspruchung bei den Flugszenarien aber bereits als positiv zu werten. Des Weiteren könnten die Ergebnisse der *First Officer* durch den für sie ungewohnten linken Arbeitsplatz und dem damit einhergehenden geänderten Parameterscanning und motorischen Verhalten beeinflusst sein. Es ist zu erwarten, dass nach ausreichendem Training auch die Arbeitsbeanspruchung insgesamt abnehmen wird.

## 5 ZUSAMMENFASSUNG UND FAZIT

Das Ziel des nxControl Projektes ist es, ein präzises manuelles Fliegen auf anspruchsvollen, gekrümmten Trajektorien bei verringerter Arbeitsbeanspruchung zu ermöglichen. Für dieses Ziel wurde das System ausgelegt. Mit Evaluie-

rungsversuchen wurde nachgewiesen, dass dieses Ziel für RNP-Landeanflüge erreicht wurde. Die Motivation des Projektes ergab sich aus dem wachsenden Luftverkehr und den zusätzlichen Sicherheitsanforderungen, die aus dem Verlust von Flugfertigkeiten bei übermäßigem Verwenden des Autopiloten entstehen. Das System soll demzufolge auch die Sicherheit im Flug erhöhen. Sicherheit adressiert hier

- das stetige Trainieren der Flugfertigkeiten durch mehr manuellen Flug,
- die geringe Änderung der Arbeitsabläufe durch ein weiteres System wie nxControl gegenüber dem konventionellen Flug, um die grundlegenden Flugfertigkeiten nicht zu beeinflussen und
- die Verbesserung des Energiebewusstseins und der Energiesteuerung.

Die Ergebnisse zeigen, dass die manuelle Steuerung insbesondere bei anspruchsvollen aber auch bei Standard-Szenarien durch nxControl weniger Arbeitsaufwand erfordert. Zudem konnte bei dem anspruchsvolleren RNP-Szenario eine Verbesserung der Präzision erreicht werden. Somit wäre häufigeres manuelles Fliegen auch zukünftig trotz hoher Präzisionsanforderungen möglich. Die prinzipiellen Armbewegungen zum Zu-/Abführen von Energie am nxLever gleichen der konventionellen Schubsteuerung, wodurch die Arbeitsabläufe kaum beeinflusst werden. Da Energiestörungen vom Regler automatisch ausgeglichen werden, ändert sich die Steuerstrategie gegenüber der konventionellen. Auch die Änderung des *Scanning-Patterns* weg von grundlegenden Parametern wie Triebwerksdrehzahl und Längslagewinkel hin zu den physikalisch aussagekräftigen Parametern Bahn- und Energiewinkel verändern die übliche Arbeitsweise. Wie sich diese Veränderung auf die Flugfertigkeiten auswirken, ist noch kritisch zu hinterfragen, da bei einem Ausfall des Systems wieder auf die konventionellen Abläufe zurückgegriffen werden müsste. Da die nxDisplays zusätzliche Informationen zu Energieentwicklung und -verteilung liefern, sind – auch bei Degradierung auf konventionelle Steuerung – eine gezielte Energievorgabe und eine schnelle Reaktion auf Störungen möglich. Insgesamt kann festgehalten werden, dass das nxControl-System im intakten Fall sowohl Sicherheit als auch Präzision des manuellen Flugs erhöht. Wie ein Ausfall des Systems oder wichtiger Komponenten des Systems diese Parameter beeinflusst, ist offen und wird zukünftig adressiert.

## DANKSAGUNG

Diese Arbeit entstand im Rahmen des Projektes nxControl, welches durch die Deutsche Forschungsgemeinschaft (DFG), GZ: LU 1397/3-1, MA 3759/3-1, gefördert wird. Die Autoren möchten den Piloten danken, die sich für die Versuche zur Verfügung gestellt haben, und der Vereinigung Cockpit e.V., die bei deren Mitgliedern für die Flugsimulatorstudie geworben hat. Desweiteren gilt ein großer Dank B. Boche, D. Bieniek, A. Kaden, I. Karakaya und M. Schaumburg, die durch ihre Unterstützung wesentlich zur erfolgreichen Versuchsdurchführung beigetragen haben.

## LITERATUR

- [1] EC (European Commission): *Flightpath 2050, Europe's vision for aviation*. Report of the High Level Group on Aviation Research, Publications Office of the European Union. Luxembourg, 2011.
- [2] FAA (Federal Aviation Administration): *Safety Alert for Operators, Manual Flight Operations, SAFO 13002*, [http://www.faa.gov/other\\_visit/aviation\\_industry/airline\\_operators/airline\\_safety/safo/all\\_safos/media/2013/SAFO13002.pdf](http://www.faa.gov/other_visit/aviation_industry/airline_operators/airline_safety/safo/all_safos/media/2013/SAFO13002.pdf), 2013.
- [3] Favre, C.: *Fly-by-wire for commercial aircraft: the Airbus experience*. International Journal of Control Vol. 59, Nr. 1, S. 139–157, 1994.
- [4] Schreiter, K.; Müller, S.; Luckner, R.: *nxControl: Konzept zur Vorgaberegulation für die Längsbeschleunigung des Flugzeugs*. Deutscher Luft- und Raumfahrtkongress. Stuttgart, 2013.
- [5] Müller, S.; Schreiter, K.; Manzey, D.; Luckner, R.: *nxControl instead of pitch-and-power: A Concept for Enhanced Manual Flight Control*. CEAS Aeronautical Journal Vol. 7, Nr. 1, S. 107–119, 2016.
- [6] Brockhaus, R.; Alles, W.; Luckner, R.: *Flugregelung*. 3rd Edition. Berlin: Springer, 2011.
- [7] Filippone, A.: *Advanced Aircraft Flight Performance*. Cambridge: Cambridge University Press, 2012.
- [8] International Standard Organisation (ISO): *Flight dynamics - Concepts, quantities and symbols - Part 1: Aircraft motion relative to the air, ISO1151-1*, 1988.
- [9] Deutsches Institut für Normen: *DIN 9300 Teil 1: Begriffe, Größen und Formelzeichen der Flugmechanik*, S. 15, 1990.
- [10] Müller, S.; Schreiter, K.; Manzey, D.: *Simulatorstudie zur Ermittlung mentaler Handlungsmodelle von Piloten beim Energiemanagement*. Deutscher Luft- und Raumfahrtkongress. Stuttgart, 2013.
- [11] Soulé, H. A.: *The Throttle Controls Speed, Right? Wrong!* Astronautics and Aeronautics, NASA. Virginia, 1969.
- [12] Enns, D.: *Control Allocation Approaches*. Proceedings of the AIAA GNC Conference, S. 98–108. Boston, 1998.
- [13] Bodson, M.: *Evaluation of Optimization Methods for Control Allocation*. Journal of Guidance, Control, and Dynamics Vol. 25, Nr. 4, S. 703–711. Virginia, 2002.
- [14] Oppenheimer, M. W.; Doman, D. B.; Bolender, M. A.: *Control Allocation for Over-actuated Systems*. 14th Mediterranean Conference on Control and Automation, IEEE. Ancona, 2006.
- [15] Müller, S.; Manzey, D.; Bleyer, A.; Schreiter, K.; Voigt, A.; Luckner, R.: *Untersuchung der mentalen Repräsentation von Energiemanagement bei der Flugzeugführung zur Entwicklung eines Pilotenassistenzsystems*. 10. Berliner Werkstatt – Mensch-Maschine-Systeme. Berlin, 2013.
- [16] Joos, H.; Bals, J.; Looye, G.; Schnepfer, K.; Varga, A.: *A multi-objective optimisation-based software environment for control systems design*. IEEE International Symposium on Computer Aided Control System Design, S. 7–14. Glasgow, 2002.
- [17] Tobie, H.; Elliot, E.; Malcom, L.: *A new longitudinal handling qualities criterion*. Proceedings of the National Aerospace Electronics Conference, Dayton, S. 93–99, 1966.
- [18] Klopstein, G.: *Rational Study of Aircraft Piloting*. Proceedings of Advanced Aircrew Display Symposium, S. 231–248. Patuxent River, 1976.
- [19] Lambregts, T.; Rademaker, R.; Theunissen, E.: *A new ecological primary flight display concept*. 2008 IEEE/AIAA 27th Digital Avionics Systems Conference, IEEE. St. Paul, 2008.
- [20] Amelink, M. H.; Mulder, M.; Paassen, V.; Flach, J.: *Theoretical Foundations for a Total Energy-Based Perspective Flight-Path Display*. International Journal of Aviation Psychology Vol. 15, Nr. 3, Taylor & Francis, S. 205–231, 2005.
- [21] Blaye, P. L.; Roumes, C.; Fornette, M.-P.; Valot, C.: *Head Up Displays symbology (HUD): Pre normative study for DGAC/SFACT*. Techn. Ber. Paris: Onera, S. 1–84, 2002.
- [22] Rijnveld, P.; Borst, C.; Mulder, M.; van Paassen, M. M.: *Towards Integrating Traffic and Terrain Constraints*. AIAA Guidance, Navigation, and Control Conference. Toronto, 2010.
- [23] Artini, F.; Demortier, J.-P.; Bouchet, C.; Airbus France: *Flight Control Indicator Displaying the Aircraft's Thrust Information*. Patent US 7636617 B2 (US), 2009.
- [24] Wyatt, I. S.; Honeywell International Inc.: *Aircraft Display With Potential Thrust Indicator*. Patent US 6262674 B1 (US), 2001.
- [25] TU Berlin, Department of Flight Mechanics, Control and Aeroelasticity: *SEPHIR - Simulator for Educational Projects and Highly Innovative Research*, <http://www.fmra.tu-berlin.de/menue/forschung/ausstattung/sephir/>.
- [26] Müller, S.; Manzey, D.; Schreiter, K.; Luckner, R.: *Implementing Energy Status in Head-Down Cockpit Displays: Impact of Augmented Energy Information on Pilot's Performance*. 59th Annual Meeting of the Human Factors and Ergonomics Society, Human Factor and Ergonomics Society, S. 926–930. Santa Monica, 2015.
- [27] Müller, S.; Schreiter, K.; Manzey, D.; Luckner, R.: *Effects of an Enhanced Energy Display and a Related New Approach of Thrust Control on Pilot's Flight Performance and Workload*. Aviaton Psychology and Applied Human Factors, Hogrefe (in press).
- [28] Schreiter, K.; Müller, S.; Luckner, R.; Manzey, D.: *Enhancing Manual Flight Precision and Reducing Pilot Workload by Using a New Manual Control Augmentation System for Energy Angle*. AIAA Guidance, Navigation, and Control Conference, AIAA Science and Technology Forum and Exposition 2017. Grapevine, Texas, 2017.
- [29] Hart, S.; Staveland, L.: *Development of NASA-TLX (Task Load Index): Results of empirical and theoretical research*. Human mental workload Vol. 52, 1. Aufl., Elsevier, S. 139–183. Amsterdam, 1988.
- [30] Byers, J. C.; Bittner, A. C.; Hill, S. G.: *Traditional and raw task load index (TLX) correlations: Are paired comparisons necessary?* Advances in Industrial Ergonomics and Safety Vol. 1, Taylor & Francis, S. 481–485, 1989.
- [31] Brooke, J.: *SUS - A quick and dirty usability scale*. Usability evaluation in industry Vol. 189, Nr. 194, S. 4–7, 1996.
- [32] Austro Control GmbH: *Instrument Approach Procedure Salzburg RNAV (RNP) Z RWY 33, OWS AD 2.24-6-6*, [http://eaip.austrocontrol.at/lo/150430/Charts/LOWS/LO\\_AD\\_2\\_LOWS\\_24-6-6\\_en.pdf](http://eaip.austrocontrol.at/lo/150430/Charts/LOWS/LO_AD_2_LOWS_24-6-6_en.pdf), [cited 05.10.2015].
- [33] Bortz, J.; Schuster, C.: *Statistik für Human- und Sozialwissenschaftler*. 7. Aufl. Berlin: Springer, 2010.