

HÖHERE FLUGEIGENSCHAFTSANALYSE UND PIO-PRÄVENTION IM RAHMEN DER ENTWICKLUNG MODERNER HOCHLEISTUNGSFLUGZEUGE

D. Ossmann

Studiengang Luftfahrt / Aviation – FH JOANNEUM Graz

Alte Poststraße 149, 8020 Graz, Österreich

Daniel.Ossmann.Lav02@fh-joanneum.at

Dr. M. Heller

Flugdynamik, Military Air Systems, EADS Deutschland GmbH

81663 München

O. Brieger

Institut für Flugsystemtechnik, Deutsches Zentrum für Luft- und Raumfahrt

38108 Braunschweig

ÜBERSICHT

Die einzigartigen dynamischen Kopplungseffekte zwischen Flugzeugzelle, „Fly-by-Wire“ Flugsteuerungssystem und dem Piloten bei hochgradig reglerkonfigurierten Flugzeugen führen zu neuartigen Flugeigenschaftsproblemen im Zusammenhang mit sog. „*Pilot Involved Oscillations*“ (*PIO*), die bei konventionellen Flugzeugen nicht existent sind und eine ernstzunehmende Gefahr für das Flugzeug und dessen Besatzung darstellen. Sie verdienen daher besonderes Augenmerk schon in frühen Entwicklungsphasen moderner Hochleistungsflugzeuge.

Ausgehend von einer grundlegenden Einführung in die *PIO*-Problematik werden die durch Stellgeschwindigkeitsbegrenzungen im Flugsteuer- & Regelsystem induzierten *PIO*'s (sog. Cat. II *PIO*) analysiert und eine Systematik zur deren Detektion bzw. Prävention im Entwurfsprozeß eines Flugregelsystems vorgestellt.

Die vorliegenden Untersuchungen setzen auf den Überlegungen und Ergebnissen des innovativen, erst unlängst entwickelten „*OLOP*-Kriteriums“ (Open Loop Onset Point) auf, welches speziell für die Vorhersage von durch Ratenbegrenzung induzierten Cat. II *PIO*'s entwickelt worden ist, und stellen eine geradlinige Erweiterung der bestehenden Systematik dar.

Ein übergeordnetes Ziel ist dabei die Identifikation von, im Hinblick auf die Sensitivität der *OLOP*-Evaluierung, maßgeblichen Systemparametern des Flugsteuer- und Regelsystems, um dadurch letztlich wirksame Modifikationsmöglichkeiten bzgl. der Cat. II *PIO*-Tendenz definie-

ren zu können. Einen weiteren wesentlicher Aspekt betrifft die Analyse der Kritikalität und des wechselwirkenden Einflusses eines ggf. vorhandenen Ratenbegrenzers im Vorwärtszweig gegenüber einem Ratenbegrenzer im Rückführkreis. Hierzu wird eine Auslegungsstrategie bzw. „sichere“ Bandbreite für den Ratenbegrenzer im Vorwärtszweig präsentiert und validiert.

BEZEICHNUNGEN

φ_d	Durchtrittsphase
ω_0	Eigenfrequenz (ungedämpft)
ω_{onset}	Aktivierungsfrequenz
ω_s	Schnittfrequenz
ω_{KO}	Unterdrückungsfrequenz von F_{OLOP}
ζ	Dämpfungsmaß
CAP	Control Anticipation Parameter
FCS	Flight Control System
$F_{OLOP}(j\omega)$	<i>OLOP</i> -Frequenzgang
$OLOP$	Open Loop Onset Point
R	Ratenbegrenzung (maximale Rate)
t	Zeit
u_{OLOP}	Eingang des <i>OLOP</i> -Frequenzganges
y_{OLOP}	Ausgang des <i>OLOP</i> -Frequenzganges
u_C	Knüppeleingangssignal
T_i	Integratorzeitkonstante
VWZ	Vorwärtszweig
RFK	Rückführkreis

Allen übrigen Bezeichnungen liegt das Normblatt DIN 9300 (Ausgabe Okt. 1990) zugrunde.

1. EINLEITUNG

Die fortwährende Entwicklung moderner Fly-By-Wire Flugsteuer- und Regelsysteme (sog. „FCS“ – Flight Control Systems) während der letzten Dekaden hat die Möglichkeit eröffnet, den Flugzeugentwurf bezüglich der Flugleistungen zu optimieren und die bislang erforderlichen Kompromisse in punkto Stabilität und Flugeigenschaften durch weitestgehende Delegation an das (digitale) Flugregelungssystem zu vermeiden. Die heutigen „Fly-By-Wire“ Hochleistungsflugzeuge besitzen eine hochgradig reglerkonfigurierte Dynamik, womit für den Piloten spezifisch zugeschnittene Flugeigenschaften für den gesamten – bei derartigen Fluggeräten i.a. großen – Flugbereich bereitgestellt werden. Die komplexen Regelsysteme dieser sog. Control Configured Vehicles (CCV) werden umfangreichen Untersuchungen unterzogen, um Stabilität und Robustheit des geschlossenen Kreises (Flugzeug plus FCS) über den gesamten Flugbereich nachzuweisen.

Diese Reglerbewertung lässt eine vollständige Evaluierung des Systems mit Ausnahme der so genannten Pilot Involved Oscillations (PIO) zu. Bei Verwendung derartiger hochkomplexer und vollautoritärer Systeme können nämlich Phänomene auftreten, bei denen es zu einer Destabilisierung des geschlossenen Regelkreises, bestehend aus Pilot, (ggf. instabilem) Basisflugzeug und dem Flugsteuer-/Regelsystem durch unerwartete Kopplungseffekte zwischen Pilot und geregelter Flugzeugdynamik kommt. Diese plötzlich auftretenden Instabilitäten des Flugzeug-Piloten-Regelkreises werden als „Pilot Involved Oscillations“ (PIO) bezeichnet und sind aufgrund ihrer Kritikalität und dynamischen Komplexität bis dato Gegenstand intensiver Forschung.

PIO's sind historisch bedingt in drei Kategorien (Cat. I–III) eingestuft worden: Cat. I beschreibt Phänomene, bei denen die effektive Flugzeugdynamik und das Pilotenverhalten als quasi-linear und zeitlich invariant angesehen werden können. Destabilisierend wirken in diesen Fällen eine zu hohe Pilotenverstärkung oder ein Phasenverlust aufgrund von systeminhärenten Totzeiten bzw. Verzögerungen. Für die zweite Kategorie (Cat. II) wird prinzipiell ebenfalls ein quasi-lineares Systemverhalten vorausgesetzt, aber Stellgeschwindigkeits- und Stellbegrenzer werden als dedizierte Nichtlinearitäten mit berücksichtigt, so dass das Übertragungsverhalten maßgeblich von der Eingangsamplitude und -frequenz abhängig wird. Cat. II PIO's sind in der Regel als überaus gefährlich einzustufen, da große Amplituden auftreten können und die Band-

breite des Regelsystems durch das Erreichen der Begrenzungen schlagartig herabgesetzt wird, was katastrophale Folgen bei künstlich stabilisierten Systemen haben kann, vgl. die beiden spektakulären Flugunfälle der JAS-39 Gripen.

Die dritte PIO-Kategorie (Cat. III) befasst sich mit jeglichem nichtlinearen Systemverhalten, das sowohl flugzeugseitig als auch pilotenseitig induziert werden kann. Beispiele hierfür sind un stetige Änderungen in den Regelsystemen, plötzliche Änderungen der aerodynamischen Eigenschaften durch das Abwerfen von Außenlasten, Änderungen im Pilotenverhalten („compensatory to synchronous precognitive“) und dergleichen. Kürzlich ist noch eine vierte Kategorie (Cat. IV) eingeführt worden, welche einen Sonderfall der Cat. III darstellt und nichtlineare Effekte aufgrund von Kopplungen zwischen Piloteneingaben und der Flugzeugstruktur beschreibt.

Der vorliegende Beitrag behandelt primär das Phänomen der durch die Stellsysteme bzw. -begrenzungen bedingten PIO's (CAT. II) und präsentiert eine Systematik zu deren Vorhersage bzw. Unterbindung. In diesem Zusammenhang ist in den 90er Jahren beim DLR Braunschweig das sog. „Open Loop Onset Point“ Kriterium (OLOP) für hochgradig reglerkonfigurierte Fluggeräte entwickelt worden, welches ein höheres Flugeigenschaftskriterium darstellt und Vorhersagen für CAT. II PIO's liefert. In einem ersten Schritt wird daher das OLOP-Kriterium unter Matlab/Simulink implementiert und mittels Anwendung auf bzw. Evaluierung von diversen aktuellen Flugzeugkonfigurationen/-modellierungen bezüglich ihrer Cat. II PIO-Anfälligkeit validiert. Hierbei werden insbesondere auch die bestehenden Kriterium-Grenzen einer kritischen Verifizierung unterzogen. Die Identifikation von maßgeblichen FCS-Systemparametern hinsichtlich ihrer OLOP-Sensitivität liefert wichtige Aussagen in punkto wirksamer Modifikationsmöglichkeiten der Cat. II PIO-Tendenz. Letztlich kann eine Auslegungsstrategie bzw. Bandbreite für einen Ratenbegrenzer im Vorwärtszweig unter Berücksichtigung der Interaktion mit dem entsprechenden Begrenzer im Rückführkreis vorgeschlagen werden.

Stellausschlag- und Ratenbegrenzungen liegen generell allein schon durch die physikalischen Gegebenheiten der Stellsysteme vor. Z.B. existieren „natürliche“ Beschränkungen wie weit (Geometrie) bzw. wie schnell (Kräftebilanz) sich ein Hydraulikzylinder bewegen kann. Darüber hinaus werden aber auch künstliche Stell- und Ratenbegrenzer gezielt in einen Regelkreis integriert. Ihre definierten Grenzen liegen i.a. unterhalb der physikalischen

Stellbegrenzungen, was mehrere Gründe hat. Künstliche Positionsbegrenzungen sollen beispielsweise verhindern, dass der Hydraulikschlitten bzw. das Ruder mit voller Geschwindigkeit gegen den Anschlag fährt, was zu mechanischen Schäden führen kann (im schlimmsten Fall zum sog. „Hardover“, Verkeilen des Aktuators/Ruders) und die Lebensdauer des Aktuators drastisch verkürzt. Obwohl die Aktuatoren selbst auf die maximal mögliche Stellgeschwindigkeit hin ausgelegt sind, wird in modernen FCS dennoch meist ein Ratenbegrenzer mit geringerer Stellgeschwindigkeit eingeführt, um das Hydrauliksystem vor zu großem Druckverlust und dadurch induzierten Überlastungsphänomenen (z.B. Rückfluss) zu schützen und insbesondere auch die adäquate Stelleistung weiterer primärer Steuerflächen zu gewährleisten.

Unabhängig davon, die Begrenzungen im Regekreis physikalischer Natur sind oder gezielt künstlich als Begrenzungsglieder in den Regelkreis eingeführt werden, sie stellen in jedem Falle sog. „harte“ Nichtlinearitäten dar, die einen erheblichen Einfluss auf das Systemverhalten (Stabilität) haben können, falls sie aktiviert werden.

Der vorliegende Beitrag präsentiert Resultate, die im Rahmen des FF&E-Projektes „Fortschrittliche Synthese- und Analysewerkzeuge für Flugreglerentwicklungen“ bei der EADS München in einer Kooperation zwischen der FH Joanneum Graz, dem DLR Braunschweig und der EADS – Military Air Systems erarbeitet worden sind.

2. DAS OLOP-KRITERIUM

Die Einführung von komplexen, vollautoritären „Fly-By-Wire“ Flugregelungssystemen hatte – bedingt durch die reglerinduzierten Verzögerungen – zunächst ein verstärktes Auftreten von Cat. I *PIO*'s zur Folge. Durch den technischen Fortschritt der letzten Jahre und die Weiterentwicklung der komplexen Flugregelungssysteme kann jedoch die Problematik dieser Cat. I *PIO*'s als weitgehend beherrscht angesehen werden. Analysen der aufgezeichneten Zeitverläufe der maßgeblichen Flugparameter von hochgradig reglerkonfigurierten Flugzeugen, die in eine *PIO* gerieten, identifizieren das Einsetzen der Ratenbegrenzung als primäre Ursache für den Stabilitätsverlust, woraus sich in weiterer Folge die Notwendigkeit zur Entwicklung eines diesbezüglich spezifischen, neuartigen Kriteriums ergeben hat.

Das *OLOP*-Kriterium ist mittels der Theorie von Beschreibungsfunktionen und einer übertragenen Anwendung der Nicholsdiagramm-Analyse (Nyquistkriterium) entwickelt und anhand diverser Flugzeugkonfigurationen (YF-16, X-15, Space Shuttle) verifiziert sowie validiert

worden [2]. Prinzipiell ist es sowohl für die Vorhersage von *PIO*'s durch Ratenbegrenzungselemente im Rückführkreis als auch im Vorwärtzweig geeignet [2,3]. Des Weiteren ermöglicht das *OLOP*-Kriterium die Vorhersage von Cat. II *PIO*-Tendenzen bereits im Entwurfstadium eines Flugsteuerungssystems, im Gegensatz zu anderen konventionellen Verfahren, wie z.B. dem Zweiertskurvenverfahren, welches lediglich die Analyse schon aufgetretener *PIO*-Fälle erlaubt.

Das Einsetzen der Ratenbegrenzung hat zwei wesentliche Effekte zur Folge, die *PIO*'s verursachen können. Zum einen wird ein zusätzlicher Phasenverlust in das System eingebracht, wodurch die Zeitverzögerung zwischen dem Piloteneingangssignal und der Flugzeugantwort vergrößert wird (vgl. Bild 1). Diesen zusätzlichen Zeitverlust versucht der Pilot durch höherfrequente, aggressivere Eingangssignale zu kompensieren, was i.a. zu einer weiteren Verschärfung der Situation führt, da durch den Piloten noch größere Raten gefordert werden, was wiederum den Phasenverzug weiter zunehmen lässt. Zum anderen wird die Amplitude des Ausgangssignals vermindert (s. Bild 1), was der Pilot (abhängig von der Gestaltung der „Knüppelübersetzung“) als Minderung der Steuerautorität interpretieren kann und dadurch seine eigene Verstärkung und somit das Eingangssignal vergrößert, wodurch wiederum ungewollt die Kritikalität der Situation noch weiter gesteigert wird [2].

Regelungs- bzw. systemtheoretisch führen die beiden beschriebenen Effekte, insbesondere bei instabiler Basisauslegung, zu einer Annäherung des Frequenzganges des offenen Kreises (Pilot plus Flugzeug) an den kritischen Punkt, was eine Instabilität des Gesamtsystems zur Folge haben kann. Zusätzlich ist dem Pilot nicht bewusst, sich in einer durch diese Effekte induzierten *PIO* zu befinden, da er das geänderte Flugzeugverhalten auf eine Störung im System des Flugzeugsystems zurückführt, wie es beispielsweise bei einem Testflug der YF-22 der Fall war.

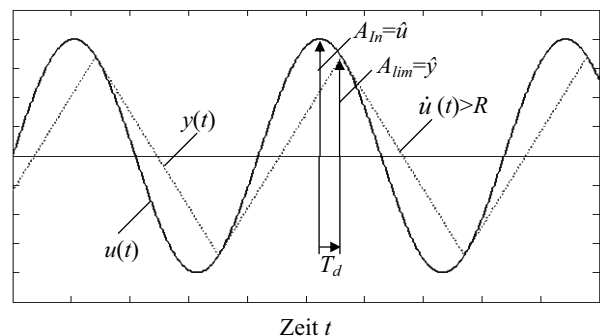


Bild 1: Stationäre Sinusantwort eines voll aktivierten Ratenbegrenzers: Phasenverzug & Amplitudenabfall

Mit Hilfe des *OLOP*-Kriteriums ist es möglich, die skizzierten Phänomene bereits in der Entwurfsphase eines Flugregelsystems zu analysieren und ihnen durch entsprechende Modifikationen entgegenzuwirken.

2.1. Systemtheoretische Grundlagen

Obwohl Cat. II *PIO*'s primär (Grenz-)Schwingungen infolge der nichtlinearen Effekte durch Ratenbegrenzung darstellen, basiert das *OLOP*-Kriterium weitgehend auf quasi-linearen Analysen. Dies wird durch die Einführung von sog. Beschreibungsfunktionen [6] für die Ratenbegrenzer ermöglicht. Die Beschreibungsfunktion eines voll-aktivierten Ratenbegrenzers $N(j\omega, \omega_{onset})$ lässt sich mittels Anwendung der Fouriertransformation angeben zu [2]:

$$(1) \quad N(j\omega) = \frac{4\omega_{onset}}{\pi\omega} e^{-j\arccos(\frac{\pi\omega_{onset}}{2\omega})}$$

und repräsentiert eine eingangsamplituden-abhängige Approximation des Ratenbegrenzer-Frequenzganges, vgl. Bild 1. Dementsprechend ist die Beschreibungsfunktion neben der Frequenz ω auch von der Eingangsamplitude \hat{u} des Ratenbegrenzers abhängig. Diese Abhängigkeit verbirgt sich hier in der Definition der Aktivierungsfrequenz ω_{onset} des Ratenbegrenzers (Frequenz der erstmaligen Aktivierung bei gegebener Eingangsamplitude \hat{u}):

$$(2) \quad \omega_{onset} = R/\hat{u}$$

Nichtlineare Systeme sind durch zahlreiche signifikante Phänomene charakterisiert, die in linearen Systemen nicht auftreten. Wesentlich im Hinblick auf die Stabilität und die *PIO*-Tendenzen ist hierbei das Vorhandensein von sog. Sprungresonanzen [2], die in Form von Amplituden- und Phasensprüngen im geschlossenen (und damit auch im aufgeschnittenen) nichtlinearen Kreis nachgewiesen werden können. Beispielsweise treten Sprungresonanzen im quasi-linearen Ersatzfrequenzgang des geschlossenen Regelkreises bei Ausschlagbegrenzung auf, was dazu führt, dass die Zuordnung zwischen Frequenz und Frequenzgang nicht mehr eindeutig ist. Diese Sprungresonanzen sind für die Vorhersage von Cat. II-*PIO* von Bedeutung, da die dadurch plötzlich auftretende Veränderung der Systemdynamik zu einer Fehlanpassung des Piloten führen und eine *PIO* auslösen kann [2].

Bezüglich des Ausmaßes und der Auswirkung der zusätzlichen Phasenverzögerung ist die Lage des sog. *OLOP*-Parameters von entscheidender Bedeutung, wie anhand von zahlreichen Beispielen in [2] gezeigt wird. Der *OLOP*-Parameter selbst ist als der Frequenzgangbetrag

des am Ratenbegrenzer aufgeschnittenen, linearen Kreises (Begrenzer entfernt) bei der Aktivierungsfrequenz $\hat{\omega}_{onset}$ definiert. Dabei bezeichnet $\hat{\omega}_{onset}$ die Frequenz der erstmaligen Aktivierung des Ratenbegrenzers im geschlossenen Regelkreis.

Nach der Aktivierung der Ratenbegrenzung kommt es neben dem zusätzlichen Phasenverlust durch den Phasensprung zu einem leichten Abfall der Amplitude des offenen Kreises. Wesentlich hinsichtlich der Stabilität des geschlossenen Kreises bzw. der *PIO*-Neigung ist der Einfluss des Phasenverlustes auf die Amplitude des geschlossenen Regelkreises. Im Zuge der systematischen Untersuchungen ist in [2] eine Grenze im Nicholsdiagramm definiert worden, mit der das Auftreten von Cat. II *PIO*'s vorhergesagt werden kann, vgl. Bild 2.

Oberhalb dieser Grenze führt der zusätzliche Phasenverlust zu einem Ansteigen der Amplitude des geschlossenen Kreises, vgl. die in Bild 2 gestrichelt dargestellten Kurven konstanter Amplitude des geschlossenen Regelkreises, sog. Nichols-*M*-Circles. Durch die vorhandene Rückführung wirkt dieses Ansteigen auch direkt am Eingang des Ratenbegrenzers, was zu einer weiteren Vergrößerung der Eingangsamplitude und damit zu einem noch stärkeren Phasenverlust führt und so sukzessive das System destabilisieren kann. Liegt der *OLOP*-Parameter dagegen unterhalb der Grenzkurve, tritt nach der Aktivierung keine effektive Vergrößerung der Amplitude des geschlossenen Kreises auf und das System bleibt trotz der zusätzlich auftretenden Phasenverzögerung stabil. Dieser Sachverhalt ist in Bild 2 anschaulich dargestellt. Durch den Phasensprung oberhalb der definierten Grenze steigt die Amplitude des geschlossenen Kreises stark an, wohingegen der Sprung darunter nahezu keine Änderung der Amplitude zur Folge hat, da er nahezu entlang eines „Nichols-*M*-Circle“ verläuft, vgl. [4].

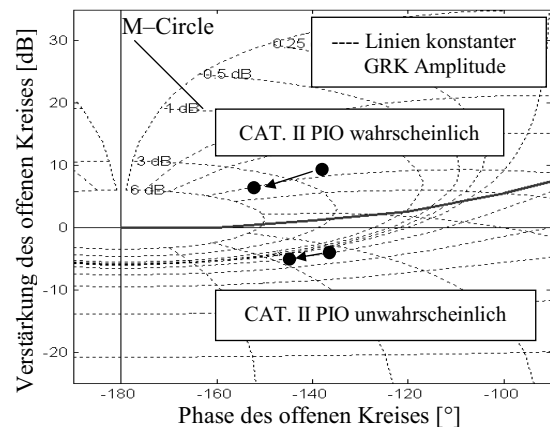


Bild 2: Einfluss des Phasensprungs auf die Amplitude des geschlossenen Regelkreises

2.2. Übersicht zur Bestimmung des *OLOP*-Parameters

Im Folgenden wird der systematische Weg zur Bestimmung des *OLOP*-Parameters kurz skizziert:

- Der erste Schritt besteht in der Berechnung eines einfachen Pilotenmodells K_P . Bei der Anwendung des *OLOP*-Kriteriums wird angenommen, dass der Pilot während einer auftretenden *PIO* als reines Verstärkungsglied agiert (synchronisierendes Verhalten). Zur Bestimmung der Pilotenverstärkung wird die Übertragungsfunktion vom Knüppelausschlag auf den Lagewinkel des geschlossenen Regelkreises folgendermaßen herangezogen:

$$(3) \quad K_P(\varphi_d) \cdot \left| F_{u_C}^\Theta(\omega_d) \right| = 1$$

Dabei stellt ω_d die Durchtrittsfrequenz bei einer vorgegebenen Durchtrittsphase von φ_d zwischen -90° und -130° in der Nick- und -110° bis -160° in der Rollachse dar, um einen möglichst großen Bereich von verschiedenen Pilotenverstärkungen abdecken zu können.

- Im zweiten Schritt wird, um letztlich den Betrag und die dazugehörige Phase des *OLOP*-Parameters bestimmen zu können, die maßgebliche Aktivierungsfrequenz $\hat{\omega}_{onset}$ des geschlossenen Regelkreises berechnet. Da hierbei jene Frequenz gesucht wird, bei der der Ratenbegrenzer erstmals im geschlossenen Regelkreis aktiviert wird, d.h. bis zu dieser Frequenz liegt ein lineares Verhalten vor (Beschreibungsfunktion gleich Eins), kann für die Eingangs-Ausgangs-Beziehung des Ratenbegrenzers folgende lineare Bedingung angegeben werden.

$$(4) \quad \underbrace{u_{C,max} \cdot \left| F_{u_C}^u(j\omega) \right|}_{u_{RLin}} = \frac{R}{\hat{\omega}_{onset}}$$

Hierin stellt $F_{u_C}^u(j\omega)$ den Frequenzgang des geschlossenen Regelkreises vom Knüppelsignal u_C auf das Eingangssignal u des Ratenbegrenzers ohne Berücksichtigung nichtlineare Elemente dar, da diese ja bis zum Punkt der Aktivierung keinen Einfluss haben. Für den Knüppeleingang wird dabei in der Regel das maximal mögliche Eingangssignal $u_{C,max}$ verwendet, da dies den ungünstigsten Fall darstellt.

Die Bestimmung der Aktivierungsfrequenz $\hat{\omega}_{onset}$ aus Gl. (4) erfolgt durch ein halbanalytisches Verfahren im Bode-Diagramm, indem die linke und rechte Seite der Gleichung gegeneinander aufgetragen werden. Der resultierende Schnittpunkt liefert letztlich die gesuchte Aktivierungsfrequenz des geschlossenen Regelkreises.

- Letztendlich ist noch der *OLOP*-Frequenzgang $F_{OLOP}(j\omega)$ des am Ratenbegrenzer aufgeschnittenen, linearen Regelkreises zu bestimmen (Ratenbegrenzer entfernt, vgl. Bild 3). Der *OLOP*-Parameter selbst ist dann als Amplitude und Phase des *OLOP*-Frequenzgangs $F_{OLOP}(j\omega)$ bei der Aktivierungsfrequenz $\hat{\omega}_{onset}$ des geschlossenen Kreises definiert.

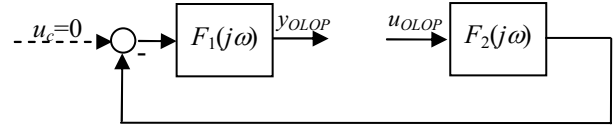


Bild 3: Offener Kreis für die Bestimmung des *OLOP*-Parameters

3. ANWENDUNG DES KRITERIUMS

In diesem Abschnitt wird die zuvor dargestellte Systematik des *OLOP*-Kriteriums auf das flugdynamische Modell eines projektierten Hochleistungs-Trainers angewendet (Referenzzustand: Anstellwinkel $\alpha_0=3^\circ$, Höhe 20000ft, Mach 0.6). Entsprechend des oben beschriebenen Schemas zur *OLOP*-Bestimmung wird dabei zunächst ein einfaches Verstärkungsmodell des Piloten bestimmt, anschließend die Aktivierungsfrequenz $\hat{\omega}_{onset}$ und der *OLOP*-Parameter $F_{OLOP}(j\omega_{onset})$ ermittelt. Die Ergebnisse der *OLOP*-Auswertung können dann mittels nichtlinearer Simulation verifiziert werden. Eine systematische Analyse erlaubt die Identifikation der Haupteinflussgrößen des hier im Modell verwendeten α -Vorgabereglers hinsichtlich der Cat. II *PIO*-Anfälligkeit des Systems. Letztlich wird neben der Untersuchung der Ratenbegrenzung im Rückführkreis auch die Kritikalität einer entsprechenden Begrenzung im Vorwärtzweig untersucht und beide verglichen.

3.1. *OLOP*-Analyse des Referenzsystems

Der Bereich des kommandierten Anstellwinkel ist für das betrachtete System mit $-10^\circ \leq \alpha_c \leq 30^\circ$ spezifiziert. Da bei der Auswertung des *OLOP*-Kriteriums der maximale Piloteneingang verwendet werden soll, wird im ersten Schritt die Eingangsamplitude $u_{C,max}$ auf 30° gesetzt, was den ungünstigsten Fall darstellt. In einem zweiten Schritt wird der maximal kommandierbare Anstellwinkel auf 20° reduziert, da dies auf Grund der Kommandocharakteristik ($-10^\circ \leq \alpha_c \leq 30^\circ$) einen im Sinne des linearisierten Systems realistischen Mittelwert darstellt. Nach Einbringung dieser Randbedingungen wird das *OLOP*-Kriterium für die Längsbewegung (Nickachsenbasisregler) des Hochleistungs-Trainermodells ausgewertet, s. Bild 4.

Aus Bild 4 wird ersichtlich, dass sich das System im gefährdeten Bereich für Cat. II *PIO*'s befindet und trotz

einer relativ hohen maximal möglichen Rate R von $80^\circ/\text{s}$ der unkritische Bereich nicht erreicht wird. Der Einfluss der Pilotenverstärkung ist dabei als gering einzustufen. Anders ausgedrückt bedeutet dies, dass die Wahrscheinlichkeit in eine *PIO* zu geraten bei Piloten mit geringen Verstärkungen ähnlich groß ist wie bei Piloten mit großen Verstärkungen, und die *PIO*-Neigung nur unwesentlich vom Pilotenverhalten abhängt.

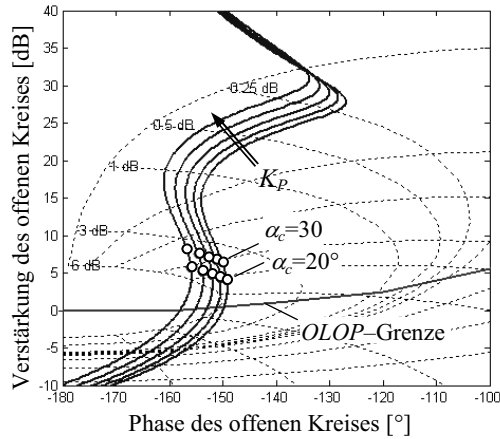


Bild 4: *OLOP*-Parameter bei Variation von K_P und der Eingangsamplitude α_c , $R=80^\circ/\text{s}$

Auf Grund der bereits erwähnten Unsymmetrie des kommandierbaren Anstellwinkelbereiches ($-10^\circ \leq \alpha_c \leq 30^\circ$) wird die maximale Eingangsamplitude nun auf 20° reduziert. Bild 4 zeigt hierfür eine geringfügige Verbesserung, jedoch bleibt die starke *PIO*-Tendenz erhalten.

Der Vergleich der *OLOP*-Parameter identifiziert dennoch das Eingangskommando – im Verhältnis zur Pilotenverstärkung – als entscheidende Größe im Hinblick auf die Cat. II *PIO*-Neigung, da durch die geringere Eingangsamplitude eine deutliche Erhöhung der Aktivierungsfrequenz erreicht wird. Zur Verifikation dieser Ergebnisse wird eine nichtlineare Simulation durchgeführt. Dazu wird ein sinusförmiges Eingangssignal Θ_c definiert, das die Aktivierung der Ratenbegrenzung sicherstellt. Gleichzeitig wird auf einen für bestehende Systeme repräsentativen Wert für die Ratenbegrenzung von $R=60^\circ/\text{s}$ übergegangen.

Bild 5 zeigt die Zeitschriebe der nichtlinearen Simulation. Während der ersten drei Perioden liegt ein adäquates Übertragungsverhalten des Kommandosignals Θ_c auf den Lagewinkel Θ vor, wobei in diesem Bereich die Ratenbegrenzung noch nicht aktiviert ist. Nach der Aktivierung der Stellgeschwindigkeitsbegrenzung in dem darauf folgenden Zeitabschnitt (schnelleres und größeres Kommandosignal) baut sich im Kreis eine aufklingende Lagewinkelschwingung auf, was auf eine entstehende *PIO* hindeutet. Somit wird die Vorhersage aus dem *OLOP*-Kriterium

bestätigt. Deutlich zu erkennen ist der schnelle Aufbau des Lagewinkels Θ nach dem Einsetzen der Ratenbegrenzung und die sehr großen resultierenden Werte des Nicklagewinkels. In der Realität hätte der Pilot somit nur ein sehr schmales Zeitfenster, um adäquat reagieren zu können bevor die Flugzeugstruktur (infolge von n_z -Überlastung) zerstört wird.

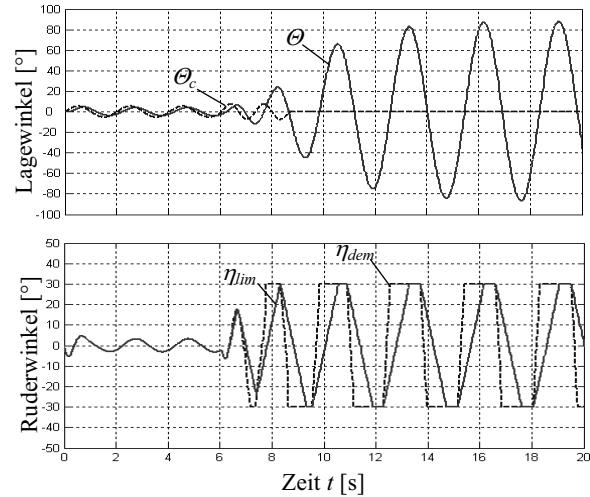


Bild 5: Nichtlineare Simulation des Regelkreises, $R=60^\circ/\text{s}$, $K_P(\varphi_d=-110^\circ)$, $\alpha_c=20^\circ$

3.2. Systemmodifikation zur Verbesserung der *PIO*-Resistenz

Die mittels dieser ersten *OLOP*-Analyse detektierte hohe Cat. II *PIO*-Wahrscheinlichkeit resultiert aus der Tatsache, dass der betrachtete Hochleistungstrainer ein relativ kleines, agiles Flugzeug ist (große Steuerempfindlichkeit). Des Weiteren weist das Basisflugzeug eine partiell instabile Auslegung auf, was eine sorgfältige Reglerauslegung essentiell macht, damit das System ausreichende Stabilitätsreserven aufweisen kann.

Da die Dominanz der Rückführungen durch die gewählte Auslegungsstrategie mit einem Vorgabe- „Control Anticipation Parameter“ $CAP=1$ (entsprechend „MIL Level 1“, vgl. [4]) relativ groß ist, wird vom Ideal- und Auslegungsfall im Folgenden abgewichen, um den Einfluss einer geringeren Steuerempfindlichkeit und damit auch geringeren Verstärkungen auf die Cat II *PIO*-Anfälligkeit zu untersuchen. Dabei wird jedoch darauf geachtet, dass die grundlegende Auslegungsstrategie [4], d.h. die Integratorpolkürzung als auch die „optimale“ Dämpfung ζ_{SP} , beibehalten wird. Lediglich die „effektiv geregelte“ Eigenfrequenz ω_{bSP} wird entsprechend reduziert.

In Bild 6 ist die Auswertung des *OLOP*-Kriteriums für das modifizierte System dargestellt. Zum Vergleich ist die

ursprüngliche, nominelle Auslegung mit eingetragen. Es zeigt sich eine maßgebliche Verbesserung der Cat. II *PIO*-Charakteristik. Während bei dem sehr konservativ gewählten maximalen Eingangssignal von $\alpha_c=30^\circ$ noch eine geringe *PIO*-Neigung erkennbar ist, ergibt sich für den realistischeren Wert von $\alpha_c=20^\circ$ gemäß dem *OLOP*-Kriterium keine *PIO*-Tendenz mehr.

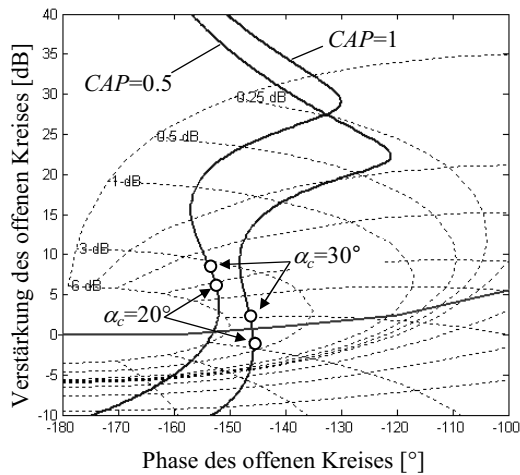


Bild 6: Vergleich der *OLOP*-Auswertung des modifizierten mit dem Referenz-System, $R=60^\circ/\text{s}$

Die durchgeführte Reduzierung des Vorgabe-*CAP* auf einen Wert von 0.5 lässt aber gemäß der Flugeigenschaftsrichtlinien [1] immer noch ausreichend „Spielraum“ nach unten zu, um die *PIO*-Charakteristik auf Grund von Ratenbegrenzung weiter zu verbessern, ohne auf die Bereitstellung adäquater Flugeigenschaften (MIL Level 1) verzichten zu müssen.

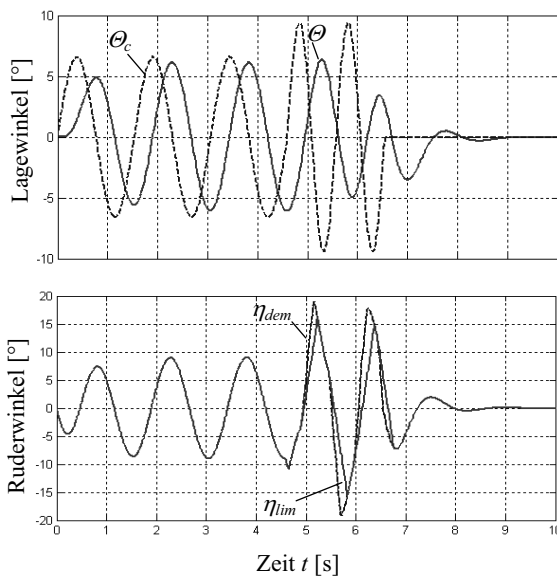


Bild 7: Nichtlineare Simulation des modifizierten Systems $CAP=0.5$, $R=60^\circ/\text{s}$, $\alpha_c=20^\circ$

Die in Bild 7 dargestellten Simulationsergebnisse des Lage- und Höhenruderwinkels bestätigen die Aussage des *OLOP*-Kriteriums, dass auf Grund der Lage des *OLOP*-Parameters unterhalb der definierten Grenzkurve, für das modifizierte System keine Cat. II *PIO*-Anfälligkeit mehr zu erwarten ist. Deutlich zu erkennen ist das Einsetzen der Ratenbegrenzung nach den ersten drei Perioden, die in diesem Fall aber zu keiner Vergrößerung der Amplitude des geschlossenen Kreises und folglich auch nicht zur Ausbildung einer *PIO* führt. Damit kann der *CAP* des geschlossenen Kreises (zumindest für das betrachtete α_c -System) als ein wesentlicher Einflussparameter auf die Cat. II *PIO*-Tendenz bei hochgradig reglerunterstützten Flugzeugen identifiziert werden.

3.3. Berücksichtigung eines Ratenbegrenzers im Vorwärtszweig

Durch die zusätzliche Implementierung eines Ratenbegrenzers im Vorwärtszweig (*VWZ*), was bei modernen Hochleistungsflugzeugen häufig der Fall ist, wird die effektive Eingangsamplitude des inneren Kreises und damit auch die am Ratenbegrenzereingang des geschlossenen Rückführkreises (*RFK*) letztlich anliegende Amplitude vermindert. Dies hat zur Folge, dass der Ratenbegrenzer im *RFK* erst bei einer höheren Frequenz oder im Extremfall gar nicht aktiviert wird. Durch die Erhöhung der Aktivierungsfrequenz im Rückführkreis ergibt sich dadurch i.a. eine Verbesserung der *OLOP*-Evaluierung, da infolge des Amplitudenabfalls von $F_{OLOP}(j\omega)$ mit der Frequenz der *OLOP*-Parameter nach unten wandert, vgl. Bild 6.

Die in Abschnitt 2 skizzierte Systematik einer *OLOP*-Auswertung für einen Ratenbegrenzer im *RFK* lässt sich weitgehend parallel auch auf die Analyse einer Ratenbegrenzung im *VWZ* übertragen [2]. Lediglich der für den *OLOP*-Parameter maßgebliche Frequenzgang des *VZW* $F_{OLOP}(j\omega)_{VZW}$ und die Berechnung der zugehörigen Aktivierungsfrequenz $(\hat{\omega}_{onset})_{VZW}$ müssen an die geänderten Verhältnisse angepasst werden, s. hierzu [2,5].

Bild 8 zeigt eine entsprechende *OLOP*-Evaluierung für den *VZW*-Ratenbegrenzer des Jet-Trainers im Referenzzustand. Die maximal kommandierbare Rate ist dabei mit $R_{VZW} = \dot{\alpha}_{C,max} = \dot{\alpha}_{C,max} = 25^\circ/\text{s}$ angesetzt worden, was einen gängigen Wert für derartige Hochleistungsflugzeuge darstellt. Keiner der in Bild 8 eingetragenen *OLOP*-Parameter (3 verschiedene Pilotenverstärkungen bei zwei Eingangsamplituden) liegt oberhalb der *PIO*-Grenze, womit gemäß des Kriteriums auch keine *PIO*-Tendenz infolge des *VZW*-Ratenbegrenzers vorliegt.

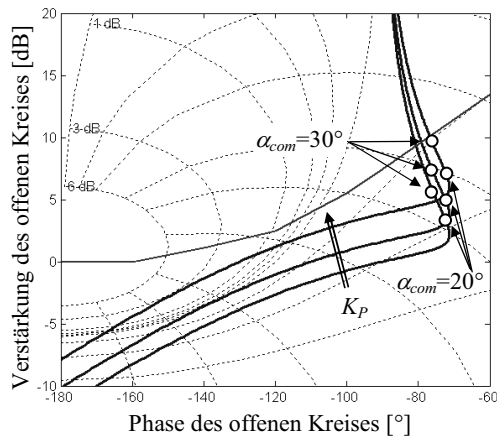


Bild 8: Auswertung des *OLOP*-Kriteriums der Systemstruktur mit Ratenbegrenzer im *VZW*, $R_{VZW}=25^\circ/\text{s}$

Diese Aussage kann wiederum anhand nichtlinearer Simulation bestätigt werden, vgl. Bild 9, wobei beide Ratenbegrenzer (*VZW* und *RFK*) mit berücksichtigt sind. Obwohl das Eingangssignal $u_C = \alpha_C$ des inneren Kreises infolge des vom Piloten geforderten Kommandos $u_{dem} = \alpha_{dem}$ schon nach wenigen Perioden in eine ausgeprägte Ratenbegrenzung läuft, bildet sich keine *PIO* aus, es resultiert kein Lagewinkelaufbau und das System kehrt nach Beendigung des äußeren Lagewinkelkommandos Θ_C zügig in seinen Ausgangszustand zurück, obwohl der Pilotenkreis dabei geschlossen bleibt.

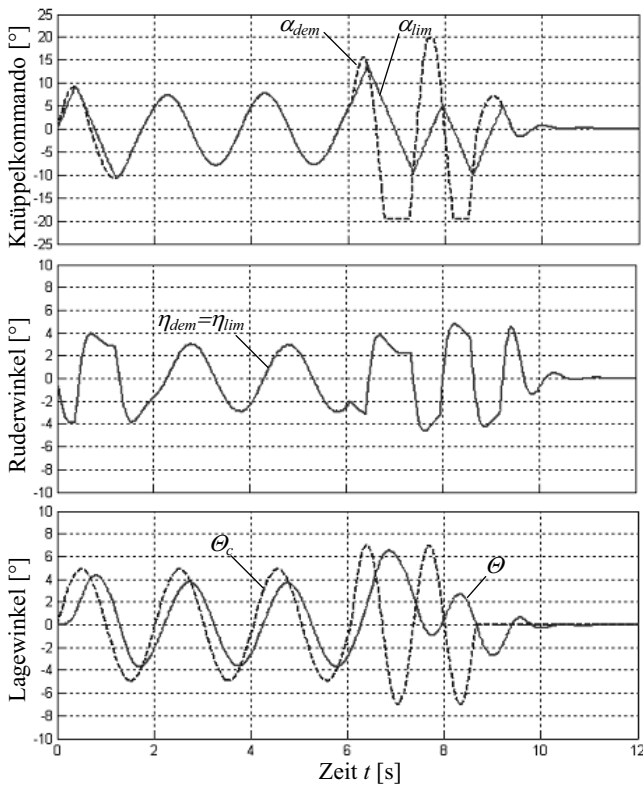


Bild 9: Nichtlineare Simulation des Referenzsystems mit Ratenbegrenzer im *VZW*, $\alpha_{C,max}=20^\circ$, $R_{RFK}=60^\circ/\text{s}$, $R_{VZW}=25^\circ/\text{s}$

Interessant ist hierbei, dass die Ratenbegrenzung des *RFK* (d.h. am Aktuator) dabei zu keinem Zeitpunkt aktiv wird. Dies bedeutet aber, dass offenbar die Eingangsamplitude am Ratenbegrenzeingang im *RFK* durch den Ratenbegrenzer im *VZW* derart abgemindert wird, dass in diesem Fall der *RFK*-Ratenbegrenzer nicht mehr aktiviert wird und demzufolge auch kein *OLOP*-Parameter mehr vorliegt.

Dieses Ergebnisse verdeutlichen, dass durch den Einsatz von Ratenbegrenzern im *VZW* ggf. der Basisregelkreis vor Instabilitäten infolge einer Ratenbegrenzung in diesem inneren Kreis geschützt werden kann. Auf eine Systematisierung der Auslegung von Ratenbegrenzern im *VZW* hinsichtlich der *PIO*-Anfälligkeit des *RFK* wird aus diesem Grund im folgenden Abschnitt näher eingegangen.

4. SYSTEMATIK ZUR *PIO*-PRÄVENTIVEN AUSLEGUNG DES RATENBEGRENZERS IM *VZW*

Im vorherigen Abschnitt ist exemplarisch gezeigt worden, dass durch Einbringen eines Ratenbegrenzers in den *VZW* u.U. die Aktivierung des Ratenbegrenzers im inneren Kreis (am Aktuator) und folglich eine damit einhergehende Destabilisierung des *RFK* verhindert werden kann. Die durch den Ratenbegrenzer im *VZW* induzierte Reduzierung der Eingangsamplitude des Ratenbegrenzers im geschlossenen Rückführkreis bewirkt, dass dieser erst bei einer höheren Frequenz oder bestenfalls gar nicht aktiviert wird, was i.a. zu einer Verbesserung der Cat. II *PIO*-Resistenz führt.

4.1. Einfluss der Ratenbegrenzung im *VZW* auf den *RFK*

Wie zuvor bereits heuristisch dargelegt, besteht der wesentliche Einfluss einer Ratenbegrenzung im *VZW* in Bezug auf die Cat. II Destabilisierung des *RFK* in einer Abminderung der effektiven Eingangsamplitude des *RFK*-Ratenbegrenzers, vgl. Bild 9. In welchem Ausmaß diese Abminderung erfolgt ist abhängig von der spezifizierten maximalen Rate R_{VZW} bzw. der entsprechenden Aktivierungsfrequenz $(\omega_{onset})_{VZW}$ des Vorwärtszweiges.

Bild 10 zeigt die Bestimmung der Aktivierungsfrequenz $(\omega_{onset})_{RFK}$ zum einen ohne und zum anderen mit der Berücksichtigung eines Ratenbegrenzers im *VZW*. Der Ratenbegrenzers im *VZW* ist in diesem Fall so eingestellt, dass der Ratenbegrenzer im *RFK* nicht mehr aktiviert werden kann und in Folge dessen auch keine Aktivierungsfrequenz $(\omega_{onset})_{RFK}$ *OLOP*-Parameter mehr vorliegt.

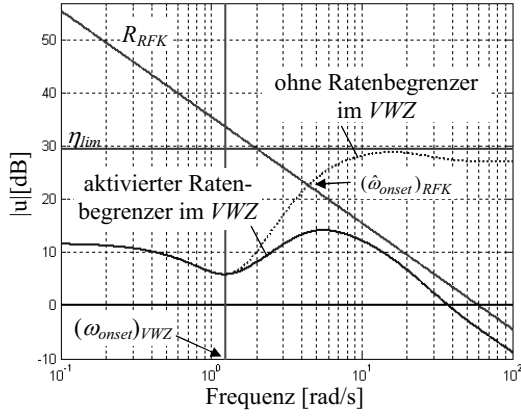


Bild 10: Einfluss der VZW-Ratenbegrenzung auf die Onset-Frequenz $(\hat{\omega}_{onset})_{RFK}$ des RFK

Bild 10 zeigt hierzu die in Abschnitt 2 erläuterte Systematik zur Bestimmung der Aktivierungsfrequenz $(\hat{\omega}_{onset})_{RFK}$, wobei zum einen die Übertragungsfunktion $F_{u_C}^u(j\omega)$ des geschlossenen Kreises ohne (strichlierte Linie) und zum anderen mit (durchgezogene Linie) Berücksichtigung der VZW-Ratenbegrenzung eingetragen ist. Der Ratenbegrenzer im VZW ist in diesem Fall derart spezifiziert, dass der Ratenbegrenzer im RFK nicht mehr aktiviert werden kann und folglich auch keine Aktivierungsfrequenz $(\hat{\omega}_{onset})_{RFK}$ sowie kein OLOP-Parameter mehr vorliegen. Der modifizierte Frequenzgang des geschlossenen inneren Regelkreises $N_{u_C}^u(j\omega)|_{RB,VZW}$, welcher den Ratenbegrenzer im VZW mit berücksichtigt, ergibt sich dabei unter Einbringung dessen Beschreibungsfunktion gemäß Gl. (1) und der Übertragungsfunktion des Knüppelsignals auf den Ratenbegrenzereingang des RFK zu:

$$(5) \quad F_{u_C}^u(j\omega)|_{RB,VZW} = F_{u_C}^u(j\omega)N_{VZW}(j\omega, (\omega_{onset})_{VZW}).$$

Die durch Gl. (5) beschriebene Reduktion der Verstärkung des inneren Kreises und die dadurch gewonnene Anhebung der Aktivierungsfrequenz $(\hat{\omega}_{onset})_{RFK}$ führt i.a. zu einer betragsmäßigen Verkleinerung des OLOP-Parameters und damit zu einer signifikanten Verbesserung der Cat. II PIO-Anfälligkeit (vgl. Bild 8 & 10). Dieser Sachverhalt kann zu einer gezielten „Optimierung“ der Cat. II PIO-Gesamt-Charakteristik genutzt werden. Hierzu ist die Ratenbegrenzung R_{VZW} so einzustellen, dass dadurch die Aktivierungsfrequenz $(\hat{\omega}_{onset})_{RFK}$ im RFK entsprechend erhöht wird, so dass der OLOP-Parameter im unkritischen Bereich liegt (oder im Extremfall nicht mehr vorhanden ist). Gleichzeitig muss aber beachtet werden, dass dabei durch die Ratenbegrenzung im VZW kein neues PIO-Problem initiiert wird.

Für die nachfolgenden Betrachtungen erfolgt die Berechnung der maximal zulässigen Rate R_{VZW} des Ratenbegrenzers im VZW (offener Kreis) jeweils über die geeignet zu bestimmende Aktivierungsfrequenz $(\omega_{onset})_{VZW}$ mittels der Beziehung:

$$(6) \quad R_{VZW} = (\omega_{onset})_{VZW} \hat{u}_C.$$

4.2. Definition einer Bandbreite für Ratenbegrenzer im VZW

Letztendliches Ziel ist es nun, einen Frequenzbereich (Bandbreite) für die Onset-Frequenz $(\omega_{onset})_{VZW}$ festzulegen und daraus eine adäquate Rate R_{VZW} abzuleiten, für die es bei vorgegebenen Parametern des inneren Kreises (maximale Rate R_{RFK} und Eingangsamplitude $u_{C,max}$) einerseits zu keiner Destabilisierung durch den VZW-Ratenbegrenzer kommt und andererseits der OLOP-Parameter des RFK geeignet modifiziert wird, so dass eine ausreichende PIO-Resistenz resultiert.

Dementsprechend kann zunächst die Aktivierungsfrequenz $(\hat{\omega}_{onset})_{RFK}$ des inneren Ratenbegrenzers als obere Grenzfrequenz $(\omega_{BB})_{max}$ der Bandbreite des Ratenbegrenzers im VZW festgelegt werden, da bei höheren Aktivierungsfrequenzen $(\omega_{onset})_{VZW} > (\hat{\omega}_{onset})_{RFK} = (\omega_{BB})_{max}$ der Ratenbegrenzer im RFK stets vor (d.h. bei niedrigeren Frequenzen) dem Begrenzer im VZW aktiviert würde:

$$(7) \quad (\omega_{BB})_{max} = \max\{(\omega_{onset})_{VZW}\} = \hat{\omega}_{onset}(R_{RFK})$$

Die letztlich noch verbleibende Frage ist dann, wie weit die maximale Rate R_{VZW} des Ratenbegrenzers im VZW und damit dessen Onset-Frequenz $(\omega_{onset})_{VZW}$ sinnvoll abgesenkt werden kann, womit die noch fehlende untere Grenzfrequenz $(\omega_{BB})_{min}$ festgelegt wäre und der Einfluss auf den RFK analysiert werden könnte. Um diese Problematik zu durchdringen, müssen zwei wesentliche Aspekte betrachtet werden:

- (i) Die Schnittfrequenz ω_S

Zunächst ist es von wesentlicher Bedeutung, bei welcher Frequenz ω_S der OLOP-Parameter des Ratenbegrenzers im VZW die Grenze zum Cat. II PIO-gefährdeten Bereich überschreitet, vgl. Bild 11. Da diese Frequenz im Nicholsdiagramm nicht erkennbar ist (die OLOP-Grenze ist in Nicholskoordinaten definiert) wird hier auf den Frequenzgang im Bodediagramm übergegangen, worin die Schnittfrequenz ω_S direkt abgelesen werden kann, vgl. [5] und Bild 11. Hierbei ist zu beachten, dass die Frequenz ω_S von der Pilotenverstärkung K_P abhängig ist (Verschiebung des OLOP-Frequenzganges im Nicholsdiagramm

nach oben bei steigender Pilotenverstärkung), weshalb hier auf den konservativsten Fall mit der kleinsten Durchtrittsphase von $\varphi_d = -130^\circ$ in der Längsbewegung übergegangen wird.

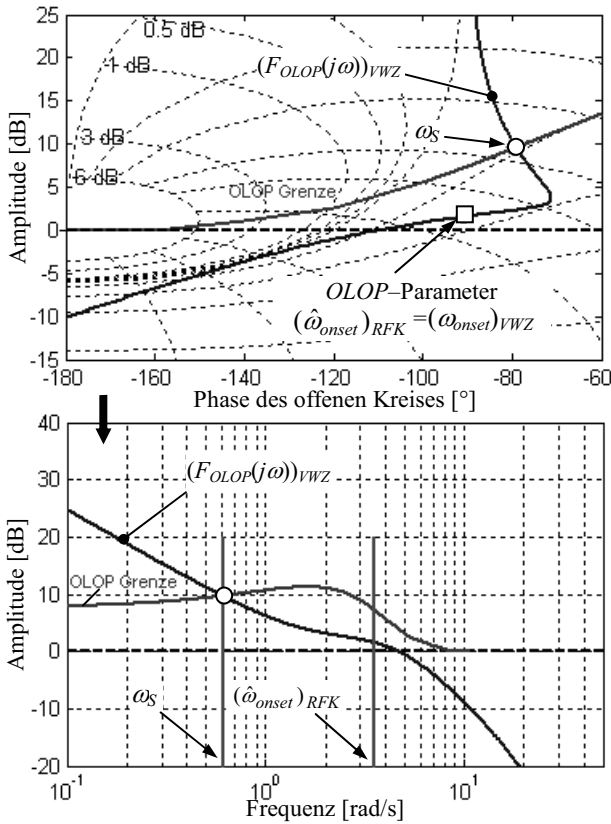


Bild 11: Übergang vom Nichols- ins Bode-Diagramm zur Bestimmung der Durchtrittsfrequenz ω_S

Die Übertragung der *OLOP*-Kennlinien vom Nichols- auf das Bodediagramm sowie die Bestimmung der Schnittfrequenz ω_S verdeutlicht Bild 11. Aufgetragen über der Frequenz sind darin der *OLOP*-Frequenzgang und der *OLOP*-Parameter des Referenz-Systems für einen Ratenbegrenzer im *VWZ* sowie die *PIO*-Grenzkurve. Dabei ist der Ratenbegrenzer im *VWZ* so ausgelegt worden, dass dieser bei derselben Frequenz aktiviert wird, wie derjenige im *RFK*, d.h. beide Begrenzer weisen hier die gleiche Aktivierungsfrequenz auf, was – wie zuvor beschrieben – der oberen Grenzfrequenz $(\omega_{BB})_{\max}$ der gesuchten Bandbreite entspricht, s. Gl. (7).

Die anschaulich ablesbare Schnittfrequenz ω_S mit der *OLOP*-Grenze definiert nun zunächst diejenige Grenzfrequenz, deren Unterschreitung zu einer Verletzung des *OLOP*-Kriteriums für den *VZW* führen würde und daher Cat. II *PIO*'s sehr wahrscheinlich wären. Deshalb stellt sie eine (vorläufige) untere Grenze für die Bandbreite des Ratenbegrenzers im *VWZ* dar.

- (ii) Die Frequenz ω_{KO}

Wie in Bild 10 bereits verdeutlicht, wird bei einer Absenkung der maximalen Rate des Ratenbegrenzers im *VWZ* ein Punkt (bzw. eine Frequenz) erreicht, bei dem die Eingangsamplitude am Ratenbegrenzer im *RFK* derart vermindert wird, dass die innere Begrenzung nicht mehr aktiviert werden kann, d.h. es existiert kein *OLOP*-Parameter mehr. Da ein weiteres Absenken der Aktivierungsfrequenz des Begrenzers im *VWZ* keinen weiteren positiven Einfluss auf den *OLOP*-Parameter des *RFK* mehr hätte, kann diese mit ω_{KO} bezeichnete Frequenz als weitere sinnvolle untere Grenze definiert werden.

Bild 12 veranschaulicht die Bestimmung der Grenzfrequenz ω_{KO} . Die Amplitude des inneren Ratenbegrenzer-Eingangs wird durch den Ratenbegrenzer im *VWZ* reduziert, s. Gl. (5), was bei einer entsprechend niedrigen Rate R_{VWZ} dazu führt, dass die Ratenbegrenzung im *RFK* nicht mehr aktiviert werden kann, da der Amplitudenverlauf unterhalb der Linie des Ratenbegrenzers im *RFK* verbleibt.

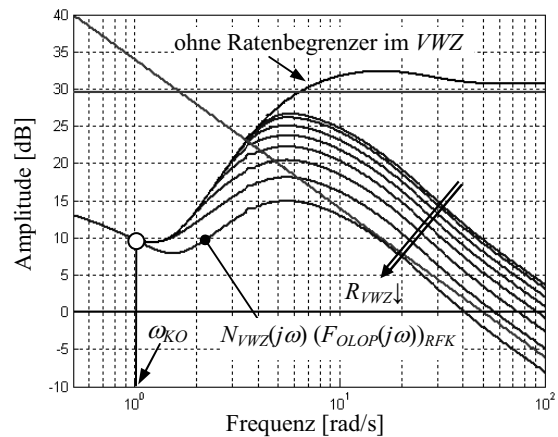


Bild 12: Bestimmung der Frequenz ω_{KO} durch Senken der maximalen Rate R im *VWZ*

Sind die Grenzfrequenzen ω_{KO} und ω_S bestimmt sowie $(\hat{\omega}_{onset})_{RFK}$ bekannt, kann abschließend die Bandbreite für eine sinnvolle Auslegung des *VZW*-Ratenbegrenzers spezifiziert werden zu:

$$(8) \quad \begin{aligned} (\omega_{BB})_{\min} &= \max\{\omega_S, \omega_{KO}\} \\ (\omega_{BB})_{\max} &= (\hat{\omega}_{onset})_{RFK} \end{aligned}$$

Die obere Grenzfrequenz $(\omega_{BB})_{\max}$ stellt dabei die Aktivierungsfrequenz $(\hat{\omega}_{onset})_{RFK}$ des Ratenbegrenzers des inneren Regelkreises dar. Die untere Grenzfrequenz $(\omega_{BB})_{\min}$ ist als die betragsmäßig größere der Frequenzen ω_{KO} und ω_S definiert, da ein Unterschreiten egal welcher der beiden nicht sinnvoll wäre. Denn im Falle von ω_{KO} bestünde kein Einfluss mehr auf den *RFK*-*OLOP*-Parameter und im Falle von ω_S würde eine Cat. II *PIO*-Anfälligkeit (Destabi-

lisierung) des Systems durch die Ratenbegrenzung im *VWZ* resultieren [5].

Bild 13 verdeutlicht die vorgeschlagene Systematik zur Bestimmung der Bandbreite für den Jet-Trainer im Referenzzustand sowie die zuvor eingeführten Kenngrößen. Die Bandbreite erstreckt sich hier von $\omega_{KO}=1.01s^{-1}$ bis zu $(\dot{\omega}_{onset})_{RFK} = 3.51s^{-1}$. Umgerechnet in die jeweils resultierenden Raten R_{VWZ} des Ratenbegrenzers im *VWZ* über Gl. (6) und dem gewählten maximalen Eingang von $\alpha_c=30^\circ$ ergibt dies einen entsprechenden Begrenzungsbereich von:

$$(9) \quad \begin{aligned} R_{\min} &= R((\omega_{BB})_{\min}) = 30^\circ/s \\ R_{\max} &= R((\omega_{BB})_{\max}) = 105^\circ/s \end{aligned}$$

Bei der *OLOP*-Validierung des Ratenbegrenzers im Vorwärtszweig in Kapitel 5 ist ein Wert von $25^\circ/s$ verwendet worden. Dieser Wert wurde in diesem Fall aus anderen Gründen – nicht im Hinblick auf die *PIO*-Optimierung – festgelegt, u.a. um in bestimmten Flugzuständen das maximal zulässige \dot{n}_z nicht zu überschreiten.

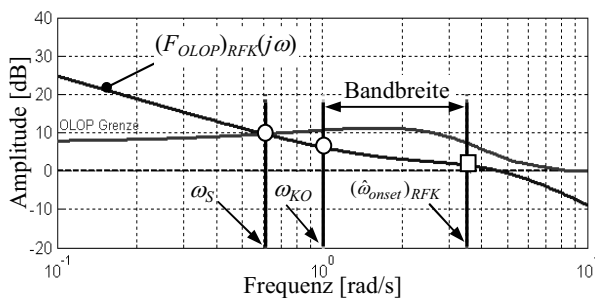


Bild 13: Darstellung der Bandbreite im Bodediagramm

Dieser Wert bedeutet jedoch entsprechend der vorherigen Betrachtungen, dass die Ratenbegrenzung im *RFK* nicht aktiviert werden kann, da $R_{VWZ}=25^\circ/s$ unterhalb der minimalen Rate R_{\min} und damit die entsprechende Aktivierungsfrequenz $(\omega_{onset})_{VWZ}$ unterhalb der Frequenz ω_{KO} liegt, womit für den *RFK* kein *OLOP*-Parameter mehr existiert. Dennoch ist $(\omega_{onset})_{VWZ}$ für $R_{VWZ}=25^\circ/s$ größer als die für eine mögliche Ausbildung einer *PIO* weitaus gefährlichere Grenzfrequenz ω_S . Anders ausgedrückt, das hier vorliegende Referenzsystem wird durch die Verwendung des Ratenbegrenzers $R_{VWZ}=25^\circ/s$ im *VWZ* vor Cat. II *PIO*'s wirksam geschützt, wobei dies hier aber nur einen Nebeneffekt der aus anderen Gründen festgelegten *VWZ*-Ratenbegrenzung darstellt.

5. ZUSAMMENFASSUNG

Eine durchgängige Systematik zur Analyse, Evaluierung und Prävention des nichtlinearen Cat. II *PIO*-Phänomens infolge Ratenbegrenzung bei modernen Hochleistungsflugzeugen wird präsentiert und anhand eines flugdynamischen Modells für einen projektierten Jet-Trainer vali-

diert.

Basierend auf dem für die Cat. II *PIO*-Vorhersage spezifisch zugeschnittenen *OLOP*-Kriterium werden zunächst die grundlegenden Zusammenhänge erläutert und durch Anwendung auf das Referenzmodell des Jet-Trainers veranschaulicht. Mittels systematischer Parametervariation kann anschließend der Control Anticipation Parameter *CAP* bzw. die Eigenfrequenz der geregelten Anstellwinkelschwingung als ein maßgeblicher Systemparameter des Flugsteuer- und Regelsystems bzgl. der Cat. II *PIO*-Tendenz für derartige, hochgradig reglerunterstützte Fluggeräte identifiziert werden.

Eine Erweiterung der *OLOP*-Methodik auf eine Ratenbegrenzung im Vorwärtszweig des Flugreglers verdeutlicht den wechselwirkenden Einfluss auf den inneren Basisregelkreis. Ein wesentlicher Aspekt betrifft hierbei die Analyse der Kritikalität des Ratenbegrenzers im Vorwärtszweig in Bezug auf die Ratenbegrenzung im Rückführkreis, wodurch letztlich eine Auslegungsstrategie für eine „sichere“ Bandbreite des Vorwärtszweig-Ratenbegrenzers vorgeschlagen und anhand des Referenzmodells validiert werden kann. Da der hierdurch bestimmte Ratenbegrenzungsbereich für den Vorwärtszweigbegrenzer aber ausschließlich auf die Cat. II *PIO*-Charakteristik abzielt, sind übergeordnete Kriterien, wie z.B. die für den Piloten verfügbare Steuerautorität oder der zulässige Lastfaktoraufbau in die Systematik noch mit einzuarbeiten bzw. nachträglich zu verifizieren.

6. LITERATUR

- [1] MIL-STD-1797A. Flying Qualities of Piloted Aircraft, Mil Standard and Handbook, Air Force System Command/ENESS, Wright-Patterson Air Force Base AFB, 1990.
- [2] Duda, H: Fliegebarkeitskriterien bei begrenzter Stellgeschwindigkeit. Deutsche Forschungsanstalt für Luft und Raumfahrt, Forschungsbereich Flugmechanik/Flugführung, Institute für Flugmechanik, Abteilung Flächenflugzeuge, Braunschweig 1997.
- [3] Duus, Gunnar: SCARLET 3 - A Flight Experiment Considering Rate Saturation. DLR Institutsbericht IB 111-2001/09, Braunschweig 2001.
- [4] Heller, Matthias: Skripten der Vorlesungen Regelungstechnik und Flugregler, sowie Flugmechanik und Flugleistungen, FH Joanneum Graz, 2004/2005.
- [5] Ossmann, Daniel: Untersuchung zu Kriterien für höhere Flugeigenschaftsbewertung und *PIO*-Prävention. FH-Joanneum Graz, 2006
- [6] Arthur Gelb, Wallace E Vander Velde: Multiple-Input Describing Functions and Nonlinear System Design. McGraw-Hill Book Company, New York, 1968