

# RICHTLINIEN FÜR DEN ENTWURF UND BETRIEB EINES FLUGREGLERS FÜR VTOL-FLUGZEUGE

W. MÖLLER

*Entwicklungsleiter für das Luftfahrtgerätewerk  
Bodenseewerk Perkin-Elmer & Co., G.m.b.H.*

## AUSZUG

VTOL-Flugzeuge sind bei Start, Transition und Landung auf eine automatische Stabilisierung ihrer Lage angewiesen. Die an den Regler gestellten Forderungen in bezug auf Leistung und Zuverlässigkeit sind in diesen Flugphasen sehr hoch. Sie werden diskutiert und es wird ein Regler beschrieben, bei dem ein Höchstmass an Zuverlässigkeit durch eine Funktionsredundanz der einzelnen Steuerkreise sowie durch eine enge Bindung an den Piloten angestrebt wurde.

In einem Film wird der Regler in verschiedenen Betriebsarten auf dem Prüfstand und im Freiflug gezeigt.

VTOL-Flugzeuge sind während des Schwebefluges bei Start und Landung weder stabil noch gedämpft. Sie verlangen deshalb vom Piloten oder Regler eine Überwachung der Beschleunigungen um alle Achsen.

Müssen die Hubtriebwerke aus konstruktiven Gründen in grösseren Abständen vom Schwerpunkt angebracht werden, reichen die stabilisierenden Momente abzapflungsgespeister Steuerdüsen nicht mehr aus und man ist auf die unmittelbare Steuerung des Schubes angewiesen. Die mit der Schubänderung verbundene Zeitkonstante verlangt dann einen *zusätzlichen* Vorhalt der Steuerbewegung. Es hat den Anschein, dass dem Piloten die Stabilisierung der Fluglage unter diesen Bedingungen nicht mehr zuge-  
mutet werden kann. Das umso weniger, als auch die Seitenbewegung des Flugzeuges selbst wieder eine Beschleunigungsfunktion der Fluglage ist. Das Bild 1 zeigt den Einschwingvorgang sowie die dazu notwendigen Steuerbewegungen für eine Lageänderung von 10 Grad.

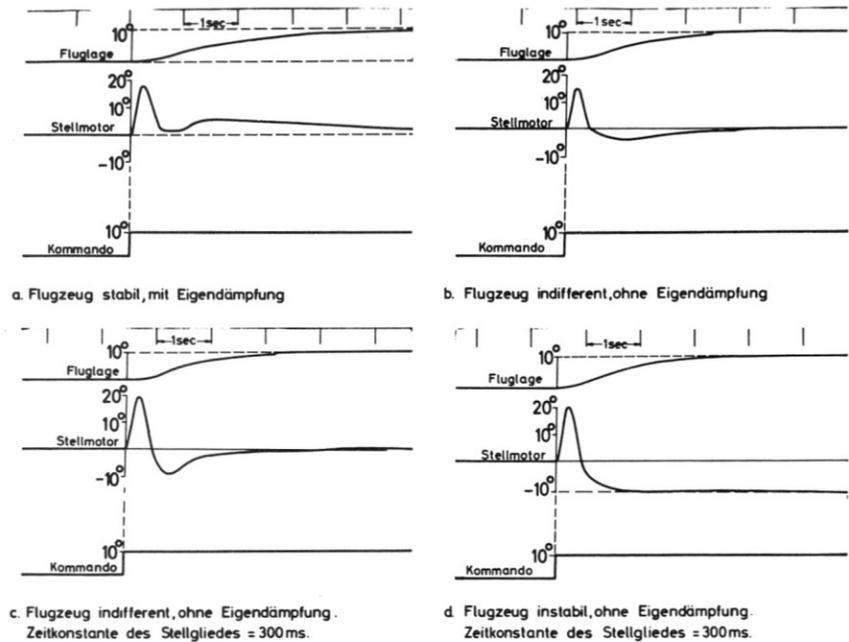


Bild 1. Steuerbewegung des Reglers für eine Lageänderung von  $10^\circ$ .

Wenn man noch berücksichtigt, dass der Schub der Triebwerke bei Start und Landung wegen der Rezirkulation der erwärmten Luft unregelmässigen Schwankungen unterworfen ist und dass endlich das Flugzeug selbst mit der Annäherung an den Boden aus dem gleichen Grund noch instabil werden kann, ergibt sich die Notwendigkeit einer automatischen Stabilisierung für diese Flugzeuge von selbst. Dabei treffen zwei Momente zusammen, die in dieser Form bislang nicht bekannt sind:

- (a) Der Flugzeugführer ist gerade in den zwei kritischen Phasen des Fluges (Start und Landung) ganz auf den Regler angewiesen. An seine Zuverlässigkeit müssen deshalb die höchsten Anforderungen gestellt werden.
- (b) Die vom Regler verlangten Leistungen sind ungewöhnlich gross—er muss ein instabiles, ungedämpftes Flugzeug bei kräftigen äusseren Störungen über verzögert ansprechende Stellglieder stabilisieren.

Der Verfasser ist der Ansicht, dass die notwendige Zuverlässigkeit vornehmlich durch einen einfachen Aufbau des Reglers und die Möglichkeit einer laufenden Kontrolle seiner Eigenschaften durch den Flugzeugführer erreicht werden kann.

Wenn wir davon ausgehen, dass die Ausfallmöglichkeit eines Gerätes mit der Zahl der Bauelemente sowie ihrer spezifischen Anfälligkeit steigt, und wenn wir den Menschen zunächst als ausfallsicher ansehen, haben wir zu prüfen:

- (a) Was muss dem Regler *unbedingt* übertragen werden?
- (b) Wie ist die Relation zwischen "Gewinn und Risiko" bei der Erweiterung der Aufgaben des Reglers auf Funktionen, die zwar nicht mehr unabdingbar sind, den Piloten jedoch wesentlich entlasten.

Die Beantwortung der ersten Frage ergibt sich zwanglos aus der Leistungsgrenze des Menschen durch seine natürliche Zeitkonstante. Zwar hat die Natur sie für alle festliegenden Handlungen, z.B. der Stabilisierung des Gleichgewichtes, dadurch herabgemindert, dass den zugehörigen Signalen der Umweg über das Bewusstsein erspart bleibt—Reflexbewegungen; doch ist gerade dies Verfahren beim Menschen zugunsten der Entwicklung seines Intellekts vernachlässigt.

Für die Stabilisierung des Gleichgewichtes werden vor allem die der Lage zugeordneten Differentiale benötigt. Nun ist aber bei einer gegebenen Zeitkonstante die noch mögliche Differenzierung abhängig von der Frequenz des Vorganges. Für alle Bewegungen *um* den Schwerpunkt liegt diese jedoch um fast eine Grössenordnung höher, als *in* seiner Richtung. Es ist deshalb einleuchtend, dass der Pilot zuerst bei der Stabilisierung der Fluglage eines VTOL-Flugzeuges auf Schwierigkeiten stossen wird, umso eher, wenn die Eigenschaft der Regelstrecke noch weitere Ableitungen erfordert. Hier zuerst muss der Regler das Defizit des Menschen ausgleichen—beginnend von der Ergänzung eines unzureichenden Vorhaltes, über die komplette Stabilisierung bis vielleicht zur vollständigen Bahnführung.

Von unten aufsteigend kommen wir damit zu folgenden Reglertypen:

- (a) Dämpfungsregler für VTOL-Flugzeuge mit Zentralschub und verzögerungsfreien Stellgliedern—er *erleichtert* dem Piloten die Stabilisierung. (Erforderlicher Vorhalt = 90 Grad; Autorität < 10 Prozent.)
- (b) Dämpfungsregler für VTOL-Flugzeuge mit dezentralisierten und zeitverzögerten Stellgliedern (Triebwerke)—hier *ermöglicht* der Regler dem Piloten erst die Stabilisierung. (Erforderlicher Vorhalt > 90 Grad; Autorität > 50 Prozent.)
- (c) Wenderegler (Dämpfungsregler mit Intergrationseinrichtung) für VTOL-Flugzeuge wie unter (b)—er gibt dem Piloten eine *wesentliche* Hilfe bei der Stabilisierung der *Fluglage* und ermöglicht ihm die Lenkung der *Flugbahn* bei Sicht.)

- (d) Lageregler (Wenderegler mit Lotkreisel) für Flugzeuge wie unter (b)—er *übernimmt* die Stabilisierung der Fluglage und erleichtert die Lenkung der Flugbahn.
- (e) Flugbahnregler—der Pilot fungiert nur noch als Monitor.

Bei VTOL-Flugzeugen mit dezentralisierten Triebwerken müssen wir noch zwischen den Bauarten mit einer *durch* den Schwerpunkt gehenden Schublinie und mit einem *um* den Schwerpunkt verteiltem Schubdreieck unterscheiden. Es ist vielleicht möglich, dass die erste Gruppe noch mit entsprechend zugeordneten Dämpfungsreglern auskommen kann, doch wird sich die zweite—mindestens für die Roll- und Nickachse—wegen der starken, von den Triebwerken ausgehenden Stör- und Koppelmomente auf Wenderegler abstützen müssen. Diese haben zum Ausgleich der Triebwerkszeitkonstante einen zusätzlichen Vorhalt der Stellmotoramplituden von etwa 30 Grad aufzubringen. Das ist nur durch die Einbeziehung der Drehbeschleunigung in den Signalkreis möglich. Hierzu bietet sich sowohl die Differenzmessung der Signale von zwei getrennt eingebauten linearen Beschleunigungsmessern als auch die unmittelbare Differenzierung der Wendegeschwindigkeit an.

Um den im ersten Fall sehr scharfen Bedingungen an die Nullpunktconstanz der beiden Beschleunigungsmesser und der natürlichen Störanfälligkeit jeder aufgelösten Bauweise zu entgehen, haben wir beim Regler des Bodenseewerkes die kompakte Bauweise eines Wendekreises mit einem zusätzlichen differenzierenden Abgriff als Signalquelle gewählt. Das war umso naheliegender, als unsere üblichen Flugregler mit Hilfe eines derartigen differenzierenden und integrierenden Wendekreises bereits in die Baugruppen "Stabilisierung" und "Lenkung" aufgetrennt sind (Bild 2).

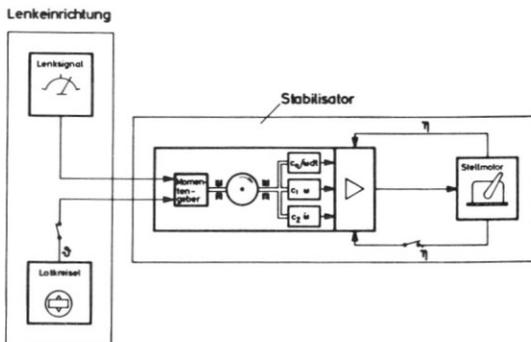


Bild 2. Stabilisator für VTOL Flugzeuge.

Von den PID-Kreiseln werden alle Bewegungen *um* den Schwerpunkt (Fluglage) kontrolliert, während ein den PID-Kreiseln vorgeschaltetes, unabhängiges Lenksystem die zur Führung der Flugbahn notwendigen Fluglagen ermittelt.

Die Untersuchung des Gesamtproblems der Flugführung zeigt für moderne Flugzeuge eine derart wachsende Divergenz dieser beiden Aufgaben, dass ihre getrennte Behandlung beim Aufbau eines Reglers sowieso nicht mehr zu umgehen ist. Während die Stabilität der Flugbahn mit steigender Geschwindigkeit zunimmt, gilt dies für die Fluglage durchaus nicht.

Die Konzentration der Massen um den Schwerpunkt vermindert eine natürliche Dämpfung der Drehbewegung; die wachsenden aerodynamischen Momente bei grossen Geschwindigkeitsspannen beeinflussen die Stabilitätseigenschaften in so weiten Grenzen, dass die Flugzeuge durch eine künstliche Stabilisierung für den Piloten wieder steuerbar gemacht werden müssen. Für alle VTOL-Flugzeuge kommt noch der grosse Sprung ihrer Flugeigenschaften zwischen dem Schweben- und dem aerodynamischen Flug hinzu.

Nun trifft natürlich die Variation der Flugeigenschaften, die dem Piloten die Stabilisierung so erschwert, auch den Flugregler—allerdings wirkt sie sich bei ihm auf einer anderen Ebene aus. Ist es bei dem Menschen seine naturbedingte Zeitkonstante, die der Vorhaltbildung seiner Steuerbewegungen eine Grenze setzt, so ist es bei dem üblichen Aufbau des Reglers mit signalzugeordneter Ruderstellung die gegenläufige Tendenz der Frequenzgänge vom Signal und Stellmotor, die ein optimales Verhalten nur in einem eng begrenzten Frequenzbereich ermöglicht. Unglücklicherweise liegt das Optimum seiner Stabilisierung sogar kurz vor dem Umschlag in die Instabilität (Bild 3 und 4).

Ein befriedigendes Verhalten derartiger Regler über einen grösseren Staudruckbereich ist nur durch eine kontrollierte Anpassung der Signalparameter möglich. Sie kann sowohl durch eine Messung der äusseren Bedingungen (Staudruck), als auch durch Kontrolle der Regeleigenschaften selbst erfolgen (selbstadaptierende Regler).

Es gibt aber noch einen anderen Weg! Wenn es gelingt, den natürlichen Frequenzgang des Reglers in seiner Phase und Amplitude den Flugbedingungen über das ganze Spektrum der Flugmöglichkeiten so anzugleichen, dass sich hieraus ein gleichbleibender Vorhalt und eine günstige Verstärkung ergibt, kommen wir zu einem sehr einfachen und natürlich adaptierenden Regler, der weder eine Überwachung der Signalparameter noch eine komplizierte Einstellautomatik benötigt. Das ist durch einen genügend grossen Signalvorhalt mit dem Einschluss der Sättigungsbereiche von der Stellgeschwindigkeit und Stellbeschleunigung des Stellmotors möglich. Der dann adäquate Phasengang vom Signal und Stell-

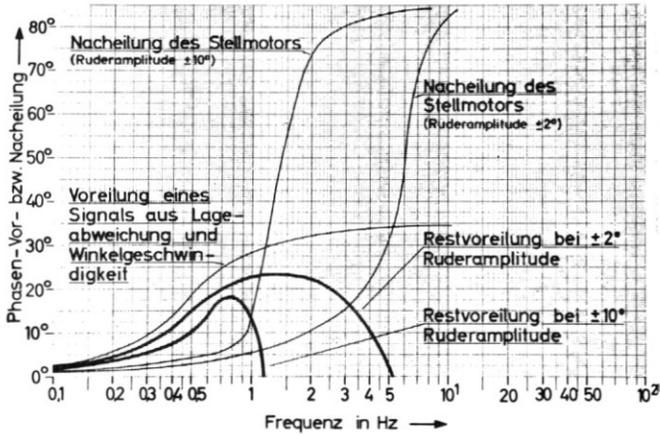


Bild 3. Restvoreilung der Ruderstellung gegenüber der Fluzeuglage in Abhängigkeit von Frequenz und Amplitude (max. 70°/sec.).

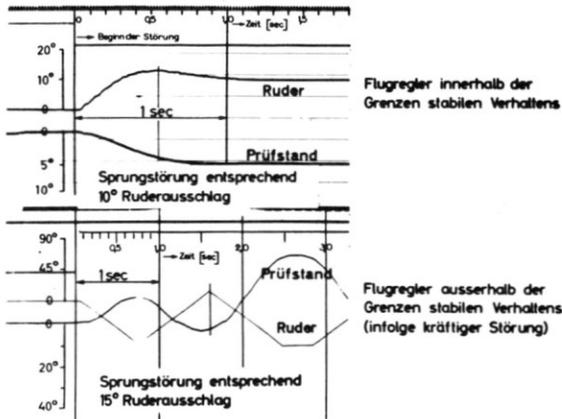


Bild 4. Antwort des Flugreglers auf eine Sprungstörung.

motor verbürgt—in Verbindung mit der zugehörigen frequenzabhängigen Amplitudenreduktion—Stabilität und konstante Dämpfung über einen grossen Fluggeschwindigkeitsbereich.

Durch die Anpassung der Übertragungsfunktion des Stellmotors mittels der Stellgeschwindigkeitsgegenkopplung ist ausserdem noch eine grosse Variation der Eigenschaften des Reglers möglich. *Der gleiche Regler* kann dann sowohl für den Schwebeflug, als auch für den aerodynamischen Flug bis in hohe Machzahlen eingesetzt werden.

Das Bild 5 zeigt, wie der für den aerodynamischen Flug abgestimmte Regler durch eine Reduktion der Stellgeschwindigkeitsgegenkopplung im Schwebeflug den hier benötigten Vorhalt von mehr als 50 Grad liefern kann.

Der Übergang der Reglercharakteristik wird in die Transition verlegt: davor (im Schwebeflug) arbeitet der Regler mit Stellungs-, danach mit Stellgeschwindigkeits—bzw. Stellbeschleunigungszuordnung. Mit nur drei Bausteinen (PID-Kreis, Verstärker und Stellmotor), ähnlich denen eines Dämpfers, lässt sich auf diese Weise ein VTOL-Flugzeug sowohl im Schwebeflug als auch im aerodynamischen Flug stabilisieren.

Das Bild 6 zeigt die Bauelemente für eine Achse und Bild 7 einen vollständigen Dreiaachsenstabilisator mit Leistungsendstufen von  $3 \times 140$  Watt.

Im Schwebeflug und während der Transition bei noch unzureichenden aerodynamischen Kräften ist eine automatische Stabilisierung für alle

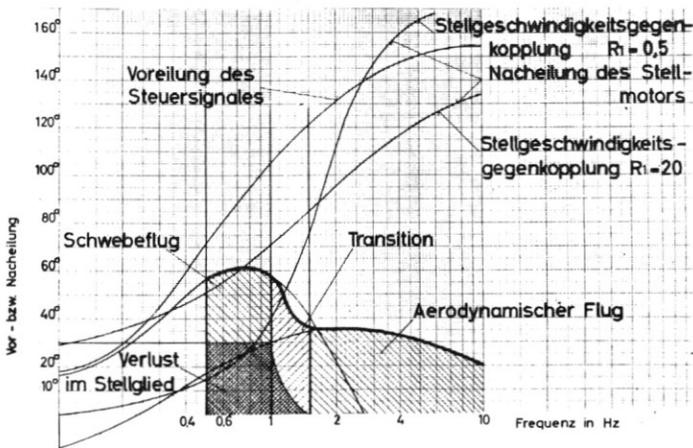


Bild 5. Verbleibende Voreilung des Stellmotors im Schwebeflug, Transition und Aerodynamischen Flug.

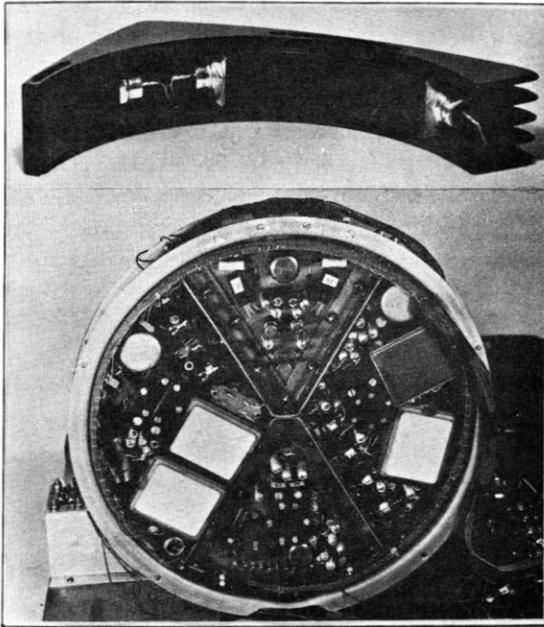


Bild 6. Verstärker für eine Achse (140W Ausgang).

VTOL-Flugzeuge mit dezentralisierten Triebwerken lebenswichtig. Ein Ausfall, ja selbst eine nur kurzzeitige Störung würde in dieser Flugphase verhängnisvolle Folgen haben. Zwar ist die kritische Zeit, in der man ganz auf dem Regler angewiesen ist, immer nur kurz, aber doch entscheidend. Die beste Sicherheitsgewähr scheint uns ein Regler zu geben, der bis zu diesem Augenblick ständig der Kontrolle des Flugzeugführers unterworfen ist. Das ist besonders für die Landung wichtig. Einen Start kann man bei einer überraschenden Fehlleistung des Reglers immer noch frühzeitig genug abbrechen, bevor das Flugzeug eine gefährdende Höhe erreicht, nicht aber eine Landung. Hier liegt die relativ unkritische Zeit für eine Kontrolle *vor* der Transition. Vor ihr muss dem Flugzeugführer schon im konventionellen Flug die bestmögliche Form für eine Kontrolle geboten werden. Das ist aber nur durch seinen Einsatz möglich. Eine entscheidende Rolle spielt dabei die Art der Anlenkung des Stellmotors an das Rudergestänge.

Während die Stellmotoren im allgemeinen direkt an die Ruder angeleitet werden, entstand später im Dämpfer eine vereinfachte Reglervariante, die über eine Differentialanlenkung parallel zum Flugzeugführer auf das Rudergestänge wirkt.

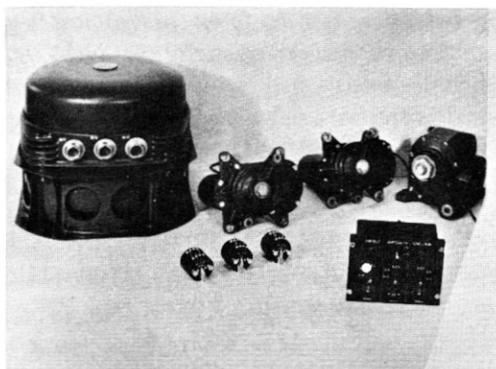


Bild 7. Breiachsen-Stabilisator mit Stellmotoren u. Kommandog.

Damit waren zwei Arten der Anlenkung entstanden:

- (a) Regler mit direkter Anlenkung und uneingeschränkter Autorität. (Ein unmittelbarer Eingriff ist dem Piloten nur nach dem Auskuppeln oder durch Überdrücken möglich.)
- (b) Regler mit Differentialanlenkung:
  - ( $\alpha$ ) Dämpfungsregler mit eingeschränkter Autorität.
  - ( $\beta$ ) Stabilisierende Regler mit erweiterter bzw. voller Autorität, die "gleichberechtigt" neben dem Flugzeugführer auf des Steuergestänge wirken.

Zweifellos ist es dem Piloten erwünscht, die gewohnten Steuerorgane durch die Differentialanlenkung auch beim geregelten Flug in der Hand zu behalten; sei es als Kommandogeber, sei es, um im Notfall unmittelbar und wirkungsvoll eingreifen zu können. Diese, zunächst so verlockende Anordnung hat jedoch Folgen, die beachtet werden müssen, wenn die Aufgabe des Reglers über eine reine Dämpfung hinausgeht.

Der Dämpfungsregler ist ein Hilfsregler, der dem Flugzeugführer das Steuern von Flugzeugen mit ungenügender Eigendämpfung erleichtern soll. Seine Amplituden sind den Steuerbewegungen des Flugzeugführers überlagert und brauchen für den konventionellen Flug nicht grösser als 10 Prozent der Gesamtbewegung des Ruders zu sein. Dadurch wird auch sein vollkommener Ausfall (Hartlage) in einer Differentialanlenkung unkritisch. Durch seine ergänzende Funktion bleibt er stets ein *Partner des Flugzeugführers*.

Es war deshalb durchaus naheliegend, die gleiche Anlenkung auch für Wende—bzw. Lageregler vorzusehen—besonders, weil man sich von ihr noch eine zusätzliche Sicherung gegen einen evtl. Ausfall des Reglers

erhoffte. Es zeigt sich aber, dass die Dinge hier anders liegen. Im Schwebflug sollen diese Regler den Flugzeugführer nicht ergänzen, sondern müssen an seine Stelle treten, weil er in dieser Zeit überfordert ist. Jedem Steuerversuch des Piloten wird sich deshalb über die Differentialanlenkung nur als eine Störung für den Regler auswirken.

### **PILOT UND REGLER WERDEN DURCH EINE DIFFERENTIALANLENKUNG IM VTOL-FLUGZEUG ZU KONKURRENTEN**

Zu Konkurrenten, von denen der Pilot durch seine Stabilisierungsversuche nur negative Beiträge zu liefern vermag. Die Differentialanlenkung verpflichtet den Flugzeugführer bei der Kommandogabe zu einer strengen Disziplin seiner Steuerbewegungen.

Während des Schwebefluges sind seine gewohnten Steuerorgane ihrer ursprünglichen Aufgabe entfremdet und werden zu Kommandogebern, mit denen er über angelenkte Signalgeber dem Regler seine Befehle übermittelt. Damit erhalten sie eine nicht ungefährliche Doppelfunktion, die in kritischen Situationen zu Fehlleistungen führen muss. Selbst wenn man unterstellt, dass ein talentierter Flugzeugführer die aus dem Rahmen fallenden Schwierigkeiten der Stabilisierung eines VTOL-Flugzeuges erlernen kann, so bedarf er dann zur Pflege dieser Fähigkeiten eine ständige Übung. Start und Landung müssen ihm dann *immer* überlassen bleiben. Es wäre eine Illusion, von einem nicht laufend trainierten Flugzeugführer erwarten zu wollen, dass er eine vom Regler doch einmal verpfuschte Situation in dem kurzen Augenblick des Starts oder der Landung noch retten könnte, zumal er seine Steuerfunktion dabei gleichzeitig von "Kommandogabe" auf "Stabilisieren" umstellen müsste. Es wäre unklug einer Sicherheitsillusion zuliebe eine für stabilisierende Regler denkbar ungeeignete Anlenkung des Stellmotors zu wählen, wie sie das Blockschaltbild 8 zeigt, zumal mit ihr noch eine Reihe anderer Missstände verbunden sind.

Bei einem Differential sind die Kräfte aller Anlenkpunkte stets im Gleichgewicht. Bei einem nicht rückwirkungsfreien Summengestänge werden die Momente des Stellmotors auf den Steuerknüppel übertragen und stören den Piloten bei der Lenkung des Flugzeuges. Jede Differentialanlenkung verlangt deshalb einen dem Summengestänge nachgeschalteten Booster—auch wenn die Kräfte des Piloten und des Reglers an sich vollkommen ausreichen würden.

Aber selbst mit einem nachgeschalteten Booster bleiben dem Piloten unangenehme Überraschungen nicht erspart, weil der Steuerknüppel ein

doppelte Funktion hat; er greift sowohl unmittelbar in das Steuergerüst ein und gibt gleichzeitig dazu über den angelenkten Signalgeber Kommandos an den Regler. Wegen der Zeitkonstante der Triebwerke ist die Reaktion des Stellmotors zunächst mit der Steuerbewegung des Piloten gleichgerichtet. Sobald nun der Booster wegen seiner begrenzten Laufgeschwindigkeit dieser summierten Bewegung nicht mehr zu folgen vermag, wird der Stellmotor des Reglers den Steuerknüppel über den "Boosterpunkt" zurückstossen und dem Piloten damit jede Kontrolle über das Flugzeug entziehen. Ein Booster mit grosser Stellgeschwindigkeit wird dagegen das Summengestänge bei jeder energischen Steuerbewegung des Piloten bis zum Anschlag fahren und damit das Gleiche bewirken. Das Oszillogramm (a) vom Bild 8 zeigt einen solchen Fall.

Nun lässt sich diese Übersteuerung zwar durch eine der Triebwerkszeitkonstante angepasste Verzögerung des Knüppelsignals unterdrücken, doch

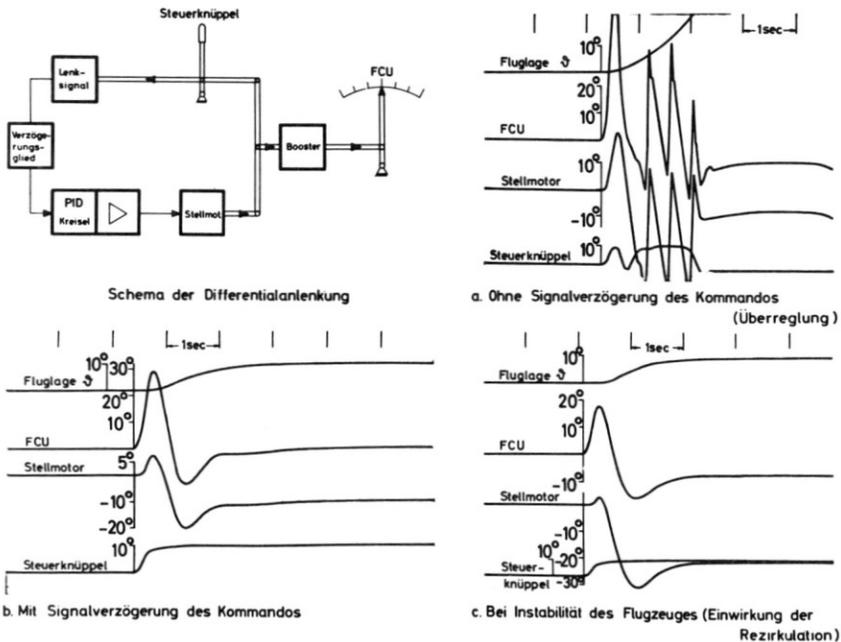


Bild 8. Flugregler in Differentialanlenkung Stellbewegung von Steuerknüppel, Regler und FCU für Lageänderung von 10° Stellglied (Hubtriebwerk) mit einer Zeitkonstante von 300ms.

sind damit die Unzulänglichkeiten der Differentialanlenkung keinesweg behoben. Jeder stationäre Flugzustand verlangt ein Momentengleichgewicht aller Triebwerke: Ein Knüppelkommando von beispielsweise  $+10$  Grad muss stationär durch eine gegenläufige Stellmotoramplitude von  $-10$  Grad kompensiert werden. Ein solches vom Piloten gegebene Kommando würde demnach bei einer Gesamtautorität des Stellmotors von  $\pm 20$  Grad einen 50 prozenten einseitigen Autoritätsverlust des Reglers bedeuten. Das kann im Schwebeflug schon kritisch werden, weil jede Stabilisierung über zeitverzögerte Stellglieder nicht nur einen grossen Vorhalt sondern dazu noch grosse Steueramplituden erfordert, um genügend wirksam zu sein [Osz. (b)]. Im besonderem Mass gilt dies, wenn in Bodennähe das tieferliegende Triebwerk durch die verstärkte Rezirkulation der erwärmter Luft einen grösseren Schubverlust als das höhergelegene erleidet [Osz. (c)]. Nur eine erdrückende Autorität des Reglers gegenüber dem Steuerknüppel kann in diesem Fall ein Abkippen des Flugzeuges verhindern. Damit wäre aber zugleich die als Sicherung gedachte unmittelbare Eingriffsmöglichkeit des Piloten bei der Differentialanlenkung illusorisch.

Bei allen bisherigen Betrachtungen wurde vorausgesetzt, dass der Mittelstellung des Summengestänges auch ein Momentengleichgewicht der Triebwerke zugeordnet ist. Das ist aber keineswegs der Fall, denn bei dem geringen Schubüberschuss während des Schwebefluges genügen schon sehr kleine Leistungsdifferenzen der einzelnen Triebwerke, um grosse Unsymmetrien im Schwebeschub hervorzurufen, die vom Regler durch entsprechende Amplituden kompensiert werden müssen. Davon merkt der Flugzeugführer bei der Differentialanlenkung jedoch nichts, weil die Regelung sozusagen "hinter seinem Rücken" erfolgt, bis er nach dem Erreichen der Autoritätsgrenze durch den unerwarteten Ausfall des Reglers überrascht wird. Die Anonymität eines Reglers in Differentialanlenkung entzieht ihm weitgehend der notwendigen Kontrolle durch den Piloten. Wenn die volle Funktion des Reglers auch nur in kurzen Flugabschnitten lebenswichtig wird, dürfen sich Pilot und Regler nicht mehr als Fremdkörper gegenüberstehn (*black boxes*), sondern müssen eine organische Einheit bilden. Dazu gehört die denkbar beste Kontrollmöglichkeit des Piloten, die am wirksamsten durch die direkte Anlenkung des Stellmotors an sein Steuergestänge erreicht werden kann. [Die benötigten Lenksignale liefert dann ein getrennter Kommandogeber (Bild 9) oder sie folgen—wie z.B. beim Start—einem festgelegten Programm.]

Es ist erstaunlich, wie schnell ein Flugzeugführer durch das Mitfühlen der Steuerbewegungen des Reglers einen zuverlässigen Überblick über seinen Zustand erhält. Wie überall im Leben, ist auch hier die Beurteilung einer Leistung leichter als die eigene Ausführung—und mehr wird von ihm zunächst auch nicht verlangt.

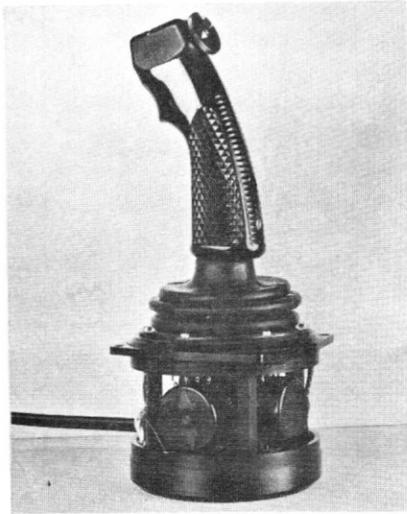


Bild 9. Steuerknüppel.

Bei einem Regler mit Elementenredundanz wird man keinesfalls mit einem plötzlichen und vollständigen Versagen zu rechnen haben, sondern es wird sich der Ausfall einzelner Bauelemente zunächst durch eine Variation in den Steuerbewegungen äussern. Diese werden immer zuerst durch das Mitfühlen entdeckt. Der Beurteilung des Piloten bleibt es dann anheimgestellt, ob er den Flug in der beabsichtigten Form planmässig fortsetzen will oder ob er zu erleichterten Flugbedingungen übergehen muss, die es ihm ermöglichen, die Mängel des Reglers auszugleichen.

Als Beispiel sei eine beabsichtigte Vertikallandung angenommen, für die von den Piloten—durchaus verständlich—eine Lageregelung gefordert wird. Nun lässt sich aber der gleiche Regler auch nach dem Ausfall der dazugehörigen stabilisierten Plattform noch als Wenderegler weiterbenutzen. Das verlangt zwar von den Piloten jeweils eine Steuerbewegung mehr, aber wie gut ihnen das nach einer kurzen Schulung gelingt, wird der folgende Film zeigen.

Selbst der Ausfall einzelner Signale des PID-Kreisels gestattet immer noch eine Landung oder den Übergang zu Flugbedingungen, die eine All-round-Funktion des Flugreglers nicht mehr erfordern. Gerade die gegenseitige Überlappung der verschiedenen Reglersignale trägt eine solche Funktionsredundanz in sich selbst, dass eine vollständige Anlagenredundanz nicht nur überflüssig, sondern wegen der damit verbundenen Komplikation, der Wartungs- und Kontrollschwierigkeiten sogar unzumutbar sein

dürfte. Wir glauben vielmehr, dass sich mit *einer* Regeleinheit und mit Bauelementen- und Funktionsredundanzen die grösste Zuverlässigkeit erreichen lässt.

Zur Funktionsredundanz gehört auch die Symbiose Pilot/Regler, in der Regler in steigendem Mass die Exekutive, der Pilot die Legislativ und Kontrolle übernimmt. Daneben sollte er in der Lage sein, den Flu bei Teilausfällen des Reglers in beabsichtigter Weise weiter fortzusetzen oder ihn bei einem Totalausfall in Flugbedingungen zu überführen, in denen er auf die Hilfe des Reglers nicht mehr angewiesen ist. Zu eine Entwicklung in dieser Richtung treiben nicht nur die zunehmenden Schwierigkeiten der Stabilisierung der Fluglage, sondern ebenso die mit der wachsenden Fluggeschwindigkeit und Verkehrsdichte kommenden Schwierigkeiten der Bahnführung, die sich in nicht allzu weiter Ferne nur noch durch eine zeitliche und örtliche automatische Regelung der Flugbahn genügend genau koordinieren lassen.

### COMMENTARY

F. O'HARA (*Royal Air Establishment, Bedford, England*): With advanced type of control systems, it appears necessary to consider either the possibility of reversion from, for example, an attitude demand control law, to a more basic control law, in the event of some failure in the system, or of providing sufficient multiplication to safeguard against complete failure. What policy did Mr. Möller think should be followed in an operational aircraft application?

### REPLY

In bemannten Flugzeugen sollte die Anwesenheit des Piloten nicht ignoriert, sondern ausgenutzt werden—zur Überwachung des Reglers und als Reserve. Die Kontrolle eines vervielfachten oder vermaschten Regelsystems während des Fluges ist dem Piloten aber nur bedingt möglich.

Wir glauben deshalb, dass die erforderliche Zuverlässigkeit in den kritischen Augenblicken des Starts oder der Landung am besten über einen präzise kontrollierbaren Einkanalregler mit genügender Funktionsreserve in der Stabilisierung und einer im Einzelfall erforderlichen Elementenredundanz (z.B. vervielfachter Stellmotor) zu erreichen ist, dem für die kritischen Achsen ein einfacher Dämpfer oder Wenderegler als Reservekanal zur Seite gestellt wird.