

KONZEPT EINES STETIGEN BAHNREGLERS FÜR DEN VOLLSTÄNDIGEN FLUGBEREICH EINES KIPPFLÜGELFLUGZEUGES

P. Hartmann*, M. Schütt, D. Moormann, Institut für Flugsystemdynamik,
RWTH Aachen University, Wüllnerstr. 7 52062 Aachen, Deutschland

Zusammenfassung

Kippflügelflugzeuge vereinen die Vorteile von Dreh- und Starrflüglern. Dabei stellt das Transitionsmanöver zwischen Schwebeflug und Flächenflug eine große regelungstechnische Herausforderung dar. In dieser Arbeit wird ein Bahnreglerkonzept vorgestellt, welches keine scharfe Trennung zwischen Schwebeflug-, Transitions- sowie Flächenflugzustand erfordert. Das Konzept basiert auf einer Auswahl einheitlicher Führungsgrößen, bekannten Trimpunkt-Kennfeldern sowie einer expliziten Entkopplung der Steuergrößen. Das Konzept wird an einem Beispielfluggerät mit Hilfe ausführlicher Windkanaldaten umgesetzt. Erste Flugversuche weisen die Tauglichkeit des Konzeptes nach.

1. EINLEITUNG

Am Institut für Flugsystemdynamik werden im Rahmen verschiedener Vorhaben Kippflügelflugzeuge konzipiert. Ein Entwicklungsziel ist die vorteilhafte Verknüpfung der Eigenschaften eines Drehflüglers (Fähigkeit zum senkrechten Starten und Landen, Schwebefähigkeit) mit denen eines Starrflüglers (effizienter Vorwärtsflug) in einem Fluggerät. Die Fähigkeit zum Schwebeflug erhält der Kippflügler über die Möglichkeit, seinen Tragflügel samt Hauptantrieben um bis zu 90° nach oben zu kippen. Typischerweise werden bei Kippflüglern die Flugzustände Schwebeflug und Vorwärtsflug getrennt betrachtet. Ein Übergang zwischen den Flugzuständen findet durch ein zeitlich begrenztes Transitionsmanöver statt. Insbesondere dieses Transitionsmanöver ist aufgrund starker Nichtlinearitäten sowie Instabilitäten nur schwer kontrollierbar [1].

Die Nutzung des vollständigen Potentials der Kippflügler wird erst möglich, wenn der gesamte Bereich möglicher Vorwärtsgeschwindigkeiten stationär erfliegen werden kann [5]. Die Erschließung des gesamten Flugbereichs des Kippflüglers mit Hilfe von Regelkonzepten mit variabler Reglerstruktur wird bereits in [2], [3] sowie [4] beschrieben. Diese Herangehensweise führt allerdings typischerweise zu komplexen Reglerstrukturen.

In diesem Beitrag wird eine einheitliche, kaskadierte Reglerstruktur vorgestellt, welche keine scharfe Trennung von Schwebeflug und Vorwärtsflug sowie keine gesonderte Betrachtung eines dezidierten Übergangszustandes erfordert. Die Funktionsweise der Reglerstruktur basiert auf der Vorsteuerung durch ein bekanntes Trimpunkt-Kennfeld, einer expliziten Entkopplung der Regelstrecke im Lageregler und einem Bahnregler, welcher vom Flugzustand abstrahiert und vereinheitliche Führungsgrößen besitzt.

Neben der Reglerstruktur wird zusätzlich die Auslegung des Reglers für einen unbemannten Kippflügler beschrieben. Benötigte Kennfelder werden anhand umfangreicher Windkanal-Messdaten gewonnen und dargestellt. Abschließend wird das Regelungskonzept auf Basis erster Flugversuchsergebnisse bewertet.

2. KIPPFLÜGELFLUGZEUG

Die Basis des Kippflügelflugzeugs ist die Starrflügel-Flugzeugkonfiguration. Durch Positionierung von mindestens zwei Antrieben an der Tragfläche, sowie die Erweiterung um eine Kippmöglichkeit der Tragfläche bezüglich des Rumpfes entsteht die typische Kippflügelkonfiguration. Hiermit kann der Flugbereich der Starrflügelflugzeuge hin zu kleinen Vorwärtsgeschwindigkeiten, bis hin zum Schwebeflug, erweitert werden.

Im Flugbereich eines Kippflügelflugzeugs lassen sich zunächst die Grenzfälle Schwebeflugkonfiguration (im Folgenden: SFK) und Flächenflugkonfiguration (im Folgenden: FFK) unterscheiden. Die SFK ist dadurch gekennzeichnet, dass sich die Auftriebskraft maßgeblich aus einem nach oben gerichteten Schub der Antriebe ergibt. In der FFK wird der Auftrieb maßgeblich durch den aerodynamischen Auftrieb der Tragfläche erzeugt. Die FFK umfasst Flugbereiche hoher Vorwärtsgeschwindigkeiten und ermöglicht effizienten Streckenflug, die SFK ermöglicht u.A. senkrecht Starten und Landen. Der Übergangsbereich zwischen der SFK und FFK wird als Transition bezeichnet. Die Transition wird beim Betrieb von Kippflüglern häufig nur zum Zwecke des Übergangs betrachtet. Im vorgestellten Regelungsansatz soll jeder Bereich der Transition stationär fliegbar sein und somit als vollwertiger Teil des Flugbereichs erschlossen werden. Somit sind alle Geschwindigkeiten vom Schwebeflug bis zum Flächenflug stationär trimmbar.

Bevor das Konzept des Bahnreglers vorgestellt wird, sollen zunächst einige Besonderheiten der Flugmechanik von Kippflügelflugzeugen in Hinblick auf Trimpunkte, Steuergrößen der Lageregelung sowie der Bahnsteuerung zusammengefasst werden.

2.1. Trimpunkte

Vergleicht man die Trimpunkte von Starrflüglern und Kippflüglern für den stationären Geradeausflug, zeigt sich, dass bei einem Kippflügler der Trimpunkt einen zusätzlichen Freiheitsgrad besitzt.

*E-mail : hartmann@fsd.rwth-aachen.de

Unter Vorgabe einer Vorwärts- sowie Vertikalgeschwindigkeit kann beim Starrflügler ein Trimpunkt mit Hilfe der Steuergrößen Schub und Höhenruder (eventuell noch durch Klappen) eingestellt werden. Vereinfacht wird der Höhenruderausschlag so eingestellt, dass sich ein Nickmomentengleichgewicht bei dem Anstellwinkel einstellt, der für ein Kräftegleichgewicht in z-Richtung sorgt. Der Schub ergibt sich so, dass ein Kräftegleichgewicht in x-Richtung herrscht. Die zu dem Trimpunkt zugehörige Nicklage des Rumpfes ergibt sich ohne weiteren Freiheitsgrad aus dem Anstellwinkel durch die feste Montage des Rumpfes an der Tragfläche. [6]

Für den Kippflügler ist die Zuordnung von Anstellwinkel und z-Kräftegleichgewicht sowie Schub und x-Kräftegleichgewicht auch in erster Näherung nicht mehr allgemein gültig.

Weiterhin ist die feste Montage des Tragflügels am Rumpf bei Kippflüglern nicht gegeben. Der Zustand des Kippflüglers muss also um die Zustandsgröße Kippwinkel σ erweitert werden. Die Kippwinkeländerungsrate wird aufgrund nur langsamer Kippwinkeländerungen als weitere Zustandsgröße vernachlässigt. Setzt man wie beim Starrflügler voraus, dass sich der Anstellwinkel abhängig von der Vorwärts- und Vertikalgeschwindigkeit ergibt, muss der Trimpunkt des Kippflüglers um die Nicklage des Rumpfes Θ erweitert werden. Zu dessen Einstellung dient ein entsprechender Trimm Ausschlag der Steuergröße Sollkippwinkel σ_{soll} . Für den stationären Geradeausflug sind also sowohl der Trimpunkt als auch die entsprechenden Trimm-Steuergrößen Ausschläge um eine Größe erweitert.

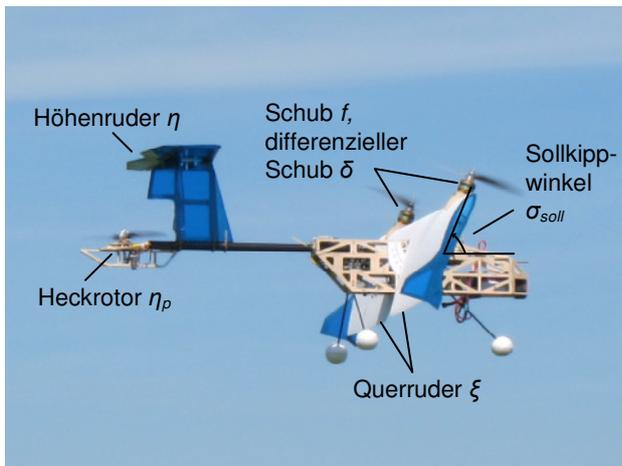


BILD 1. Steuergrößen des Kippflügelflugzeuges

2.2. Steuergrößen der Lageregelung

Wie die Trimpunkte unterscheiden sich auch die Steuergrößen bzgl. der Lageregelung vom Starrflügler. Für den Starrflügler können die primären Steuergrößen Höhen-, Quer- und Seitenruder in erster Näherung fest einer Momentenwirkung um eine der flugzeugfesten Achsen zugeordnet werden. Die einzelnen Lagekomponenten können näherungsweise entkoppelt durch je eine der primären Steuergrößen gesteuert werden. Die relevanten Steuergrößen eines Kippflüglers können anhand einer Beispielfigur der Abbildung 1 entnommen werden. Neben dem Querruder ξ und dem Höhenruder η steht die Blattverstellung η_p des horizontalen Heckrotors

zur Nickmomenterzeugung sowie differentieller Schub δ der Hauptantriebe zur Verfügung. Auf ein Seitenruder wird in diesem Beispiel verzichtet.

Im Grenzfall der FFK steuert das Querruder ein Roll-, das Höhenruder ein Nick- sowie der differentielle Schub ein Giermoment. Im Grenzfall der SFK steuert der differentielle Schub ein Roll- und das Querruder, weiterhin durch den Propellernachlauf angeströmt, ein Giermoment. Das Höhenruder ist mangels Anströmung ohne Wirkung, weshalb die Nickmomentensteuerung vom Heckrotor übernommen wird. Es ist erkennbar, dass eine feste Zuordnung der Steuergrößenwirkung zu den flugzeugfesten Achsen nicht möglich ist. Die Zuordnung hängt vom Kippwinkel ab und es ist gerade im Bereich zwischen der SFK und der FFK im Sinne einer komponentenweisen Lageregelung mit Kopplungen zu rechnen.

Soll die Lage auch in der Transition gesteuert werden können, müssen diese Kopplungen explizit berücksichtigt werden.

2.3. Bahnführung

Auch bei der Bahnführung müssen beim Kippflügler die möglichen Konfigurationen unterschieden werden. Beispielfhaft sei eine Änderung des Steuerkurses betrachtet: In der SFK ist hierzu eine reine Gierbewegung nötig. In der FFK muss zusätzlich durch eine Rolllage und somit geneigten Auftrieb eine Zentripetalkraft aufgebracht werden, um auch die Richtung der aktuellen Vorwärtsgeschwindigkeit zu ändern.

3. REGELUNGSKONZEPT

Für die einheitliche Regelung eines Kippflügelflugzeuges wird im Folgenden ein neues Konzept für eine Bahnregelung samt Lageregelung vorgeschlagen. Die Besonderheiten der SFK als auch der FFK werden in einem einheitlichen Ansatz berücksichtigt.

3.1. Ziele des Regelkonzeptes

In der zu entwickelnden Bahnregelung sollte die Unterscheidung zwischen den Grenzkonfigurationen SFK und FFK vermieden werden. Der gesamte Flugbereich vom Schwebeflug zum Flächenflug soll durch eine kontinuierliche Menge von Flugzeugkonfigurationen erschlossen werden. Entsprechend soll die Regelung für den gesamten Fluggeschwindigkeitsbereich eine einheitliche Struktur besitzen. Diese Struktur soll sich an die unterschiedlichen Flugkonfigurationen ausschließlich durch variable, aber über den Geschwindigkeitsbereich stetige Parametrisierung anpassen lassen.

Die einheitliche Regelstruktur soll sich auch in einheitlichen Führungsgrößen der Regelung ausdrücken. Die Führungsgrößen werden dabei so ausgewählt, dass von der expliziten Konfiguration abstrahiert wird. Gleichzeitig soll die Manövrierbarkeit in keiner der Konfigurationen eingeschränkt werden. Soll beispielsweise eine Seitenablage innerhalb der SFK angesteuert werden, soll dies durch Vorgabe einer körperfesten Seitwärtsgeschwindigkeit möglich sein, obwohl eine solche Geschwindigkeit in der FFK (Schieben) eher zu ver-

meiden ist. Eine von der Konfiguration abstrahierende Auswahl an Führungsgrößen ist erst ab der Reglerebene der Bahnregelung möglich. In den weiter innen liegenden Regelschleifen hängt die Wirkung der Führungsgrößen zu sehr von der Konfiguration ab.

Die einheitliche Reglerstruktur soll weiterhin sicherstellen, dass die Dynamik der Führgrößenfolge des geschlossenen Regelkreises qualitativ über den gesamten Flugbereich vergleichbar ist. So sollten Zeitkonstanten und Dämpfungen der Führgrößenfolge keinen zu großen Änderungen unterliegen.

3.2. Konzept

Um die im vorhergehenden Abschnitt beschriebenen Ziele zu erreichen, wurden zunächst vier Führungsgrößen für die Bahnregelung festgelegt. Die Größen sind:

- aerodyn. Vorwärtsgeschwindigkeit $U_{a,soll}$
- aerodyn. Seitwärtsgeschwindigkeit $V_{a,soll}$
- Höhenänderungsrate $H_{p,soll}$
- Kursänderungsrate $\Psi_{p,soll}$

Die Vorgabe der Höhenänderungsrate bzw. der Kursänderungsrate kann jeweils alternativ auch in Form der absoluten Größe Sollhöhe bzw. Sollkurs erfolgen. Die Entscheidung zu einer dieser Alternativen sollte abhängig von der Art des Bahnvorgabereglers geschehen.

Mit diesen Führungsgrößen ist eine vollständige Manövrierbarkeit sowohl in der SFK und der FFK als auch in allen Transitionsflugzuständen gegeben. Die Führungsgröße der Seitwärtsgeschwindigkeit wurde in Hinblick auf die Konfigurationen in der Umgebung der SFK in die Liste aufgenommen. In Umgebung der FFK verliert die Größe an Relevanz.

Die Führungsgröße der aerodynamischen Vorwärtsgeschwindigkeit wird als primäre Führungsgröße angesehen, weil sie den maßgeblichen Einfluss auf die geflogene Flugzeugkonfiguration besitzt. Ihr möglicher Wertebereich ist für eine Auslegung des Reglers konstant. Die übrigen, sekundären Führungsgrößen haben keinen oder nur geringen Einfluss auf die Konfiguration. Weiterhin kann ihr möglicher Wertebereich von der primären Führungsgröße abhängen.

Der Einfluss der Vorwärtsgeschwindigkeit auf die Konfiguration des Flugzeuges wird beim Betrachten von Trimpunkten des stationären Geradeausfluges ohne Höhenänderung deutlich. Wie in Abschnitt 2.1 gezeigt, definiert sich ein Trimpunkt über den Nickwinkel des Rumpfes, die Vorwärts- sowie über die Vertikalgeschwindigkeit. Die zugehörigen Steuergrößen sind der symmetrische Schub f , der Sollkippwinkel σ_{soll} sowie der Höhenruderausschlag η bzw. der Blatteinstellwinkel des Heckrotors η_p .

Entsprechend der Betrachtung von Trimpunkten ohne Höhenänderung sei die Vertikalgeschwindigkeit gleich null. Da keine weiteren Randbedingungen an die Fluglage geknüpft sind, wird der im Vergleich zu Starrflügelflugzeugen neue Freiheitsgrad der Rumpf-Nicklage naheliegenderweise zunächst konstant horizontal gehalten. Eine andere Wahl wäre hier ebenfalls erlaubt. Mit diesen Randbedingungen lassen sich die Trimmsteuerauslässe und damit die Flugzeugkonfiguration in alleiniger Abhängigkeit von der Vorwärtsgeschwindigkeit bestimmen.

Im Bahnregler sollen entsprechende Kennfelder der Trimmausschläge in Abhängigkeit von der Vorwärtsgeschwindigkeit vorgehalten werden. Mit Hilfe der Kennfelder soll die Soll-Vorwärtsgeschwindigkeit auf die Trimmsteuergrößen vorgesteuert werden. Eventuelle Abweichungen der sich einstellenden Vorwärtsgeschwindigkeit vom Sollwert können über einen PI-Regler ausgeglichen werden. Der PI-Regler sollte dabei nicht direkt auf die Steuergrößen sondern als Offset auf den Vorsteuereingang wirken (vgl. Abbildung 2). Eine Änderung der Vorwärtsgeschwindigkeit und damit die Veränderung der Flugzeugkonfiguration soll quasi-stationär erfolgen. Die Änderungen erfolgen also so langsam, dass sich durch die Veränderungen der Trimmsteuergrößen der Flugzustand nur wenig vom Trimpunkt entfernt und sich der Flugzustand stabil in Richtung Trimpunkt bewegt.

Die Soll-Vorwärtsgeschwindigkeiten führen im Rahmen des zulässigen Wertebereiches zu einer beliebigen Flugzeugkonfiguration. Die Fluglage ist je nach Konfiguration instabil, weshalb eine Lageregelung vorgesehen werden soll. Bereits in Abschnitt 2.2 wurde die Problematik der vom Trimpunkt abhängigen Steuerwirkung sowohl in Richtung als auch Größe erläutert. Daher soll für die Lageregelung im Rahmen des vorgestellten Bahnreglers der klassische Ansatz der Eingrößenregelung jeder Lagekomponente um eine explizite Entkopplung erweitert werden. Dazu werden die Momenten-Wirksamkeiten der einzelnen Steuergrößen in Abhängigkeit des Kippwinkels innerhalb eines Trimpunktes und damit in Abhängigkeit von der Vorwärtsgeschwindigkeit bestimmt.

Zur Begrenzung der Komplexität werden nur die statischen Wirksamkeiten, also die Endwerte der gesteuerten Momente nach andauerndem sprunghaftem Ausschlag der Steuergrößen betrachtet. Unter der Annahme von Linearität und Symmetrie der einzelnen Steuergrößenwirksamkeiten kann das gesteuerte Moment aller Steuergrößen wie folgt mit einer vom Kippwinkel σ abhängigen Wirksamkeitsmatrix M dargestellt werden:

$$(1) \quad \begin{pmatrix} L \\ M \\ N \end{pmatrix} = \underbrace{\begin{pmatrix} L_\xi & L_\zeta & L_\eta \\ M_\xi & M_\zeta & M_\eta \\ N_\xi & N_\zeta & N_\eta \end{pmatrix}}_{= M(\sigma)} \cdot \begin{pmatrix} \xi \\ \zeta \\ \eta \end{pmatrix}$$

Wird die Wirksamkeitsmatrix invertiert, lassen sich damit die zu steuernden Steuergrößen ausschläge in Abhängigkeit der neu eingeführten Ersatzsteuergrößen L_{ersatz} , M_{ersatz} und N_{ersatz} berechnen:

$$(2) \quad \begin{pmatrix} \xi \\ \zeta \\ \eta \end{pmatrix} = \underbrace{\begin{pmatrix} \xi_L & \xi_M & \xi_N \\ \zeta_L & \zeta_M & \zeta_N \\ \eta_L & \eta_M & \eta_N \end{pmatrix}}_{= M^{-1}(\sigma)} \cdot \begin{pmatrix} L_{ersatz} \\ M_{ersatz} \\ N_{ersatz} \end{pmatrix}$$

Mit diesen Ersatzsteuergrößen ist nun unabhängig von der aktuellen Flugzeugkonfiguration eine entkoppelte Steuerung von Momenten um die flugzeugfesten Achsen

möglich. Der klassische Eingrößen-Lagereger kann nun auf die Ersatzsteuergrößen statt direkt auf die Steuergrößen wirken. Die invertierte Wirksamkeitsmatrix wird im Regler in Kennfeldform vorgehalten. Die aktuelle Gestalt der Matrix wird abhängig vom Trimmkippwinkel der Vorwärtsgeschwindigkeitsregelung bestimmt. Bei der Umsetzung der Regelung ist darauf zu achten, dass die Matrix für jeden Flugzustand invertierbar und ausreichend gut konditioniert ist.

Zur Regelung der Höhenvorgabe muss, ausgehend von den Trimpunkten des stationären Geradeausflugs ohne Höhenänderung, eine Möglichkeit zum Eingriff in das Kräftegleichgewicht in Richtung der z-Achse geschaffen werden. Bei Starrflügelflugzeugen wird dies typischerweise durch Änderung des Anstellwinkels bzw. der Nicklage erreicht. Die Wirkung einer Anstellwinkeländerung auf die z-Kraft kann jedoch beim Kipplügler nicht bei jeder Konfiguration vorausgesetzt werden. Sowohl die Variation des Anstellwinkels, als auch des symmetrischen Schubs kann eine Änderung der Kraft in z- und x-Richtung zur Folge haben. Es besteht also die gleiche, von der Flugzeugkonfiguration abhängige Kopplungsproblematik wie bei den Steuergrößen des Lagereglers. Dem entsprechend werden Kennfelder für die Steuergrößenwirkungen Schub und Anstellwinkel (bzw. Kippwinkel wg. $\Theta = 0$) bezüglich der Kraftkomponenten bestimmt. Mit Hilfe der Kennfelder können wiederum Ersatzsteuergrößen, $\Delta F_{x,ersatz}$ und $\Delta F_{z,ersatz}$, eingeführt werden. Der Höhen- bzw. Höhenänderungsrate regler kann damit als PI- oder PID-Regler entkoppelt eine z-Kraft mit Hilfe der Ersatzsteuergröße $\Delta F_{z,ersatz}$ steuern.

Für die Regelung der aerodynamischen Seitwärts-geschwindigkeit sowie des Kurses sind keine neuen Ersatzsteuergrößen erforderlich. Beide Regelungen nutzen innerhalb einer Kaskadenstruktur den Lagereger als Folgereger und damit die Führungsgrößen des Lagereglers als Steuergrößen. Diese Steuergrößen sind bereits durch den Aufbau des Lagereglers entkoppelt. Die Seitwärtsgeschwindigkeit wird durch einen PI-Regler mit Vorsteuerung geregelt. Als Steuergröße dient der Rolllagewinkel. Über den Rolllagewinkel kann die Richtung der Auftriebskraft verdreht und somit eine Seitenkraft erzeugt werden. Um die Vorgabe einer Seitwärtsgeschwindigkeit in der FFK zu verhindern, wird diese Führungsgröße in Abhängigkeit von der Vorwärtsgeschwindigkeit begrenzt. Die Regelung der Kursänderungsrate muss sowohl den Azimut des Fluggerätes einstellen als auch die Kurvenkoordinierung in Abhängigkeit von der Vorwärtsgeschwindigkeit sicherstellen. Für das Einstellen des Azimuts kann der Kursregler direkt auf die Gierratenregelung des Kursreglers zurückgreifen. Für die Kurvenkoordinierung muss proportional zur aktuellen erdfesten Vorwärtsgeschwindigkeit und zur aktuellen Gierrate eine Seitenkraft aufgebracht werden. Die Seitenkraft wird durch einen Rolllagewinkel gesteuert.

Eine Übersicht über das Reglerkonzept ist in Abbildung 2 zu finden. Aus Gründen der Übersichtlichkeit wurde auf die Darstellung von Rückführungsgrößen auf Ebene der Eingrößenregelungen verzichtet.

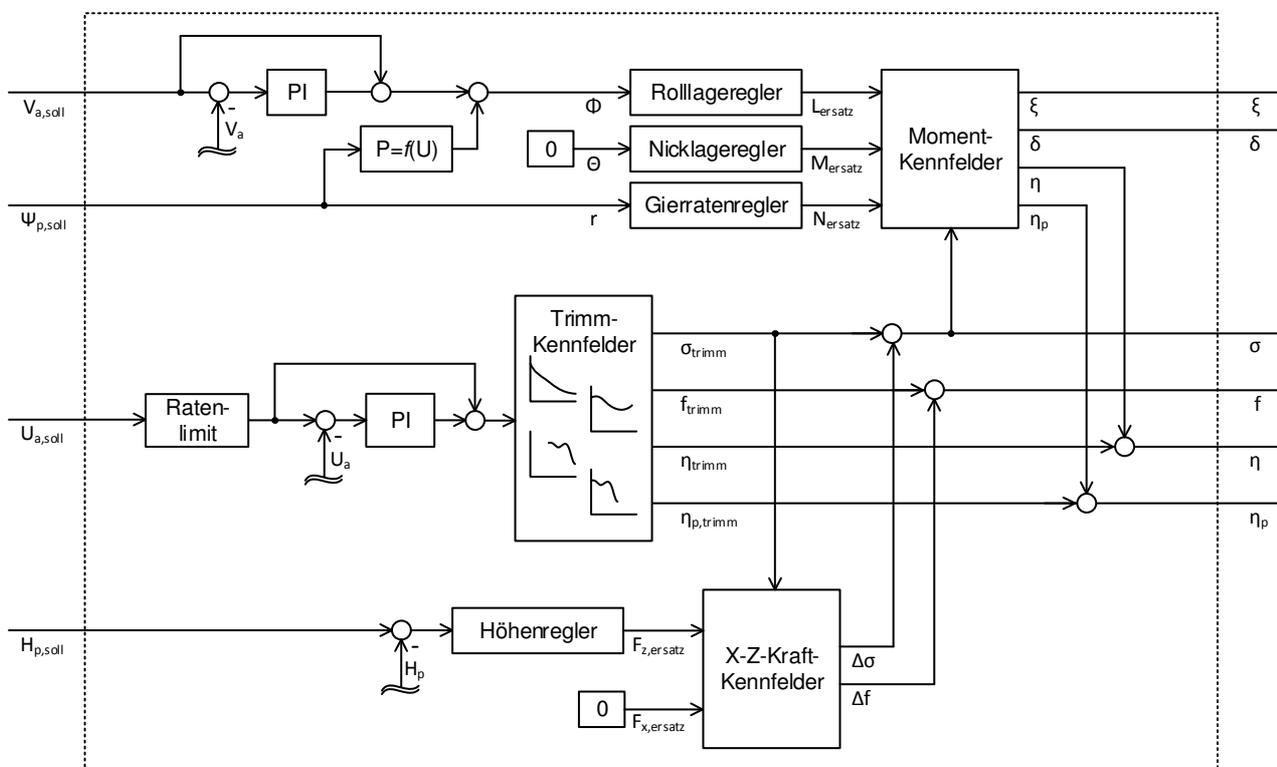


BILD 2. Übersicht über die Struktur des Bahnreglers

4. BEISPIELHAFT UMSETZUNG

Um die Eignung des vorgestellten Konzeptes zu erproben, wurde ein entsprechender Bahnregler für ein Beispiel-Kippflügelflugzeug ausgelegt. Die nötigen Schritte der Reglerauslegung sowie Anpassungen, welche aufgrund praktischer Einschränkungen nötig waren, werden im Folgenden beschrieben.

4.1. Fluggerät

Das verwendete Kippflügelflugzeug ist in Abbildung 1 dargestellt und besitzt eine Spannweite von 0,96 m, eine Masse von 1,7 kg und wird durch 2 Elektromotoren angetrieben. Zur Erzeugung von Nickmomenten im Schwebeflug besitzt es einen Heckrotor mit Verstellpropeller, welcher mit einer konstanten Drehzahl von 7300 min^{-1} betrieben wird. Es besitzt kein Seitenruder. Für die Implementierung des Reglers steht ein Autopilot mit einer Regelfrequenz von 200 Hz zur Verfügung. Der Regler wurde innerhalb einer MATLAB Simulink Umgebung entwickelt und über automatische Quellcode-Generierung auf den Autopiloten portiert.

4.2. Windkanaldaten

Zur Gewinnung der in Abschnitt 2.1 und 2.2 beschriebenen Kennfelddaten bezüglich Trimpunkten und Steuergrößenwirksamkeiten konnten mit dem Beispielfluggerät Messungen im Windkanal durchgeführt werden. Das Fluggerät wurde vollmaßstäblich und funktionsfähig auf einer 6-Komponentenwaage montiert und mit 23 Geschwindigkeiten im Bereich von 0-17 m/s angeströmt. Zunächst wurden für jede Strömungsgeschwindigkeit die Trimmsteuerauslässe und anschließend in den Trimpunkten die Steuergrößenwirksamkeiten bzgl. der Lageregelung bestimmt. Eine Messung der Steuergrößenwirksamkeit bzgl. Höhenregelung konnten leider nicht durchgeführt werden. Eine detaillierte Beschreibung der Windkanalmessreihe findet sich in [7].

Die für die Reglerauslegung relevanten Ergebnisse werden im Folgenden in knapper Form zusammengefasst. Die Abbildungen 3-5 zeigen zunächst die Trimm-Steuergrößenauslässe in Abhängigkeit von der Vorwärtsgeschwindigkeit. Neben den Messpunkten finden sich zu jeder Messreihe Ausgleichspolynome verschiedener Ordnungen.

Abbildung 3 zeigt den nötigen Kippwinkel σ . Dieser entspricht dem Anstellwinkel, weil der Rumpf mit $\Theta = 0$ konstant horizontal gehalten wird. Wie zu erwarten nimmt mit steigender Vorwärtsgeschwindigkeit der zur Trimmung nötige Kippwinkel ab. Der Kippwinkel, welcher für die SFK (0 m/s) nötig ist, hat einen etwas kleinen Wert als 90° . Durch ein tragendes Profil am Tragflügel und Anströmung durch den Propellernachlauf muss der Flügel für ein Kräftegleichgewicht in x-Richtung leicht nach vorne gekippt werden. In der FFK, also bei hohen Geschwindigkeiten, liegt der Kippwinkel im Bereich typischer Anstellwinkel eines Starrflügelflugzeugs.

Abbildung 4 zeigt den Trimm-Schub f . Der Schub wurde in Form einer Drehzahlsteller-Sollwertvorgabe ermittelt und wird, um eine Einordnung der Werte zu erlauben, in Form der entsprechend gemessenen Drehzahl angegeben. In der SFK ist ein hohes Schubniveau nötig, da der Schub

die alleinige Quelle für Auftrieb darstellt. Der nötige Schub nimmt mit steigender Geschwindigkeit bis ca. 12 m/s ab, da der Tragflügel immer größere Anteile des Auftriebs bereitstellen kann. Mit weiter steigender Geschwindigkeit nimmt der Schubbedarf wieder zu, da ein größer werdender Widerstand ausgeglichen werden muss.

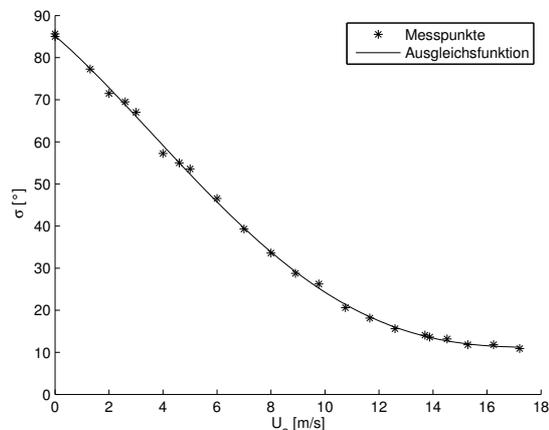


BILD 3. Trimmgrößen für den Kippwinkel

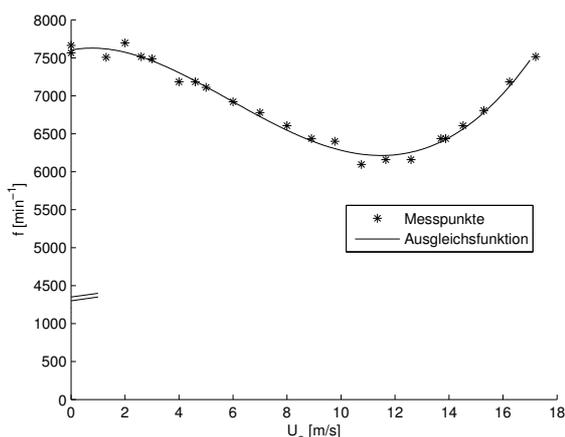


BILD 4. Trimmgrößen für den Schub

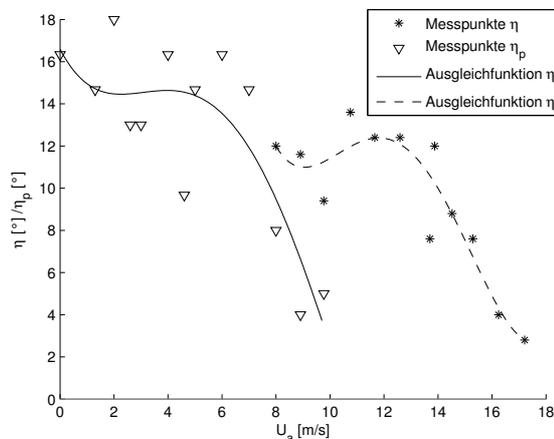


BILD 5. Trimmgrößen für das Höhenruder und den Heckrotor

In Abbildung 5 ist sowohl der Trimm Ausschlag des Höhenruders η als auch der des Heckrotors η_p dargestellt. Aufgrund von Nickschwingungen während der Messung zeigen die Messwerte leider eine größere Streuung. Das Höhenruder hat bei kleinen Geschwindigkeiten mangels Anströmung keine Wirkung, weshalb bis ca. 10 m/s das

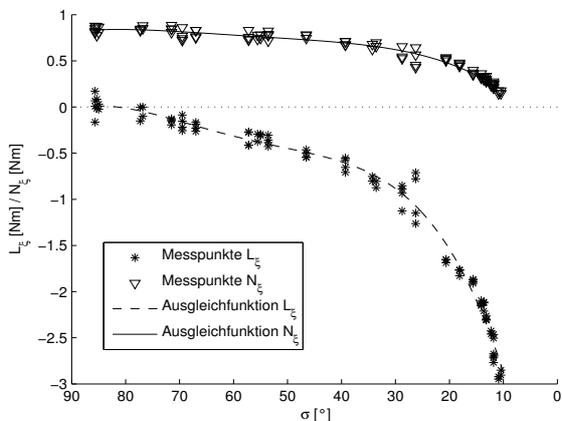


BILD 6. Momentenwirkung des Querruders

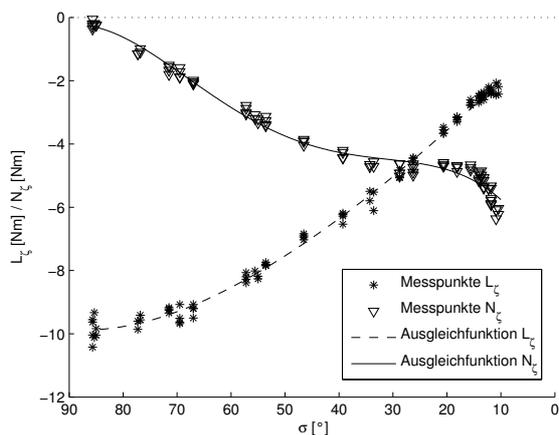


BILD 7. Momentenwirkung des differentiellen Schubs

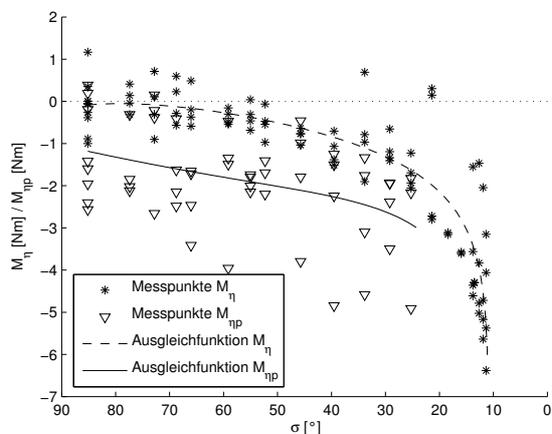


BILD 8. Momentenwirkung des Höhenruders und des Heckrotors

nötige Trimm-Nickmoment vom Heckrotor aufgebracht wird. Bei 10 m/s wird die Nickmomentensteuerung auf das Höhenruder übergeben. Mit steigender Geschwindigkeit nimmt die Wirksamkeit des Höhenruders zu, weshalb sich der Trimm Ausschlag reduziert.

Die Abbildungen 6-8 zeigen die gemessenen Steuergrößenwirksamkeiten der für die Lageregelung relevanten Steuergrößen. Im Hinblick auf den zu implementierenden Regler wurden die Messwerte in Abhängigkeit vom Kippwinkel σ aufgetragen. Die Verknüpfung zur Vorwärtsgeschwindigkeit ist entsprechend Abbildung 3. In jedem Trimpunkt wurde die Steuergrößenwirksamkeit in zwei Richtungen und je zwei Amplituden gemessen und auf einen Ausschlag von +1 normiert aufgetragen. Die Anzahl der Messpunkte ist daher deutlich größer verglichen mit Abbildung 3-5. Die Wirkung vom Höhenruder und Heckrotor auf das Gier- bzw. das Rollmoment, sowie die Wirkung des Querruders und des differentiellen Schubs auf das Nickmoment wurden aufgrund sehr geringen Einflusses vernachlässigt.

Die Wirkung des Querruders ξ ist in Abbildung 6 dargestellt. Wie erwartet zeigt sich eine Richtungsänderung der Wirkung von Gier- zu Rollmoment beim Übergang von der SFK zur FFK. Auffällig ist eine im Vergleich zum Rollmoment sehr eingeschränkte Giermoment-Steuerbarkeit.

Die Wirkung des differentiellen Schubs δ , dargestellt in Abbildung 7, zeigt wie beim Querruder einen Austausch der Wirkrichtungen. In SFK wird ein Roll-, in FFK ein Giermoment gesteuert. Die Änderung der Wirkungsamplitude ist verglichen mit dem Querruder weniger ausgeprägt. Die Gesamtmomentwirkung nimmt mit zunehmender Anströmung etwas ab.

In den Messwerten zur Wirksamkeit des Höhenruders η und des Heckrotors η_p , Abbildung 7, sind wieder deutliche Streuungen zu erkennen. In der SFK ist keine Wirkung des Höhenruders vorhanden, in Richtung FFK nimmt die Wirkung stetig zu. Die Heckrotorwirkung wurde nur bis zu einer Geschwindigkeit von 10 m/s gemessen, die Messwerte enden entsprechend bei $\sigma = 20^\circ$.

4.3. Auslegung und Implementierung

Auf Basis dieser Windkanaldaten wurde der Bahnregler implementiert. Für die Vorsteuerkenfelder (vgl. Abschnitt 3.2) wurden die in den Abbildungen 3-5 gezeigten Ausgleichskurven übernommen. Die maximal zulässige Änderungsrate des Kennfeldeinganges wurde auf -5 m/s^2 bis $+3 \text{ m/s}^2$ begrenzt. Da die alleinige Vorsteuerung durch die Kennfelder schon gute Ergebnisse bzgl. Führgrößenfolge zeigte, wurde auf die Umsetzung des PI-Reglers zunächst verzichtet. Weiterhin wurde auf das Abschalten des Heckrotors ab einer Geschwindigkeit von 10 m/s verzichtet. Für erste Flugversuche bot dies die Möglichkeit einer schnelleren Rücktransition in die SFK, ohne dass der Heckrotor zunächst wieder anlaufen muss. Um einen Einfluss des noch laufenden Heckrotors zu minimieren, wurde die Propellerverstellung ab dem Abschaltzeitpunkt auf null gesetzt. Um eine Kommandierung kleiner negativer Vorwärtsgeschwindigkeiten zu ermöglichen und den Fluggeschwindigkeitsbereich etwas zu erweitern, wurden die Kennfelder bis -2 m/s bzw. 20 m/s extrapoliert. Der aus den Kennfeldern vorgesteuerte Kippwinkel σ ist die Grundlage für die Bestimmung des jeweiligen Betriebspunktes der übrigen Regler.

Für die Lageregelung wurden die Elemente der Wirksamkeitsmatrix (vgl. Gleichungen 1, 2) entsprechend den Ausgleichsgeraden der Abbildungen 6-8 bestimmt. Aufgrund der vernachlässigten Kopplungen sind die Elemente L_{η} , N_{η} , M_{ξ} , M_{ζ} nicht besetzt. In Folge sind die Elemente η_L , η_N , ξ_M , ζ_M der Inversen ebenfalls unbesetzt.

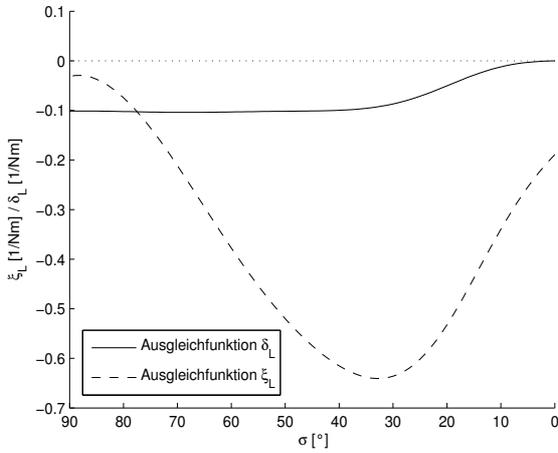


BILD 9. Steuerausschläge für die Rollmomentenerzeugung

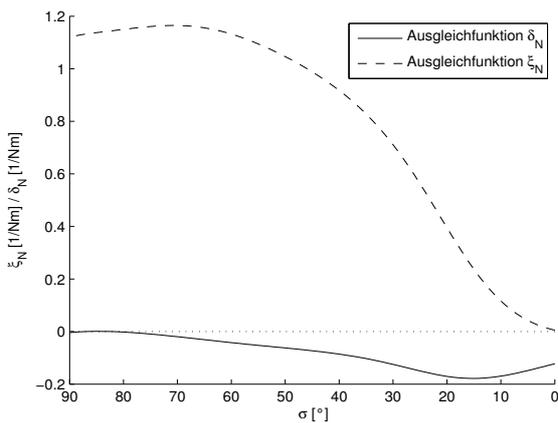


BILD 10. Steuerausschläge für die Giermomentenerzeugung

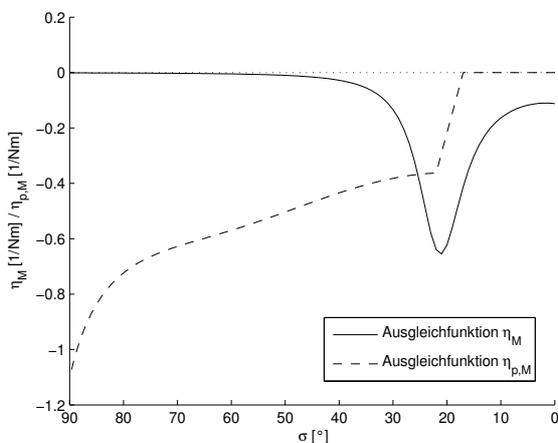


BILD 11. Steuerausschläge für die Nickmomentenerzeugung

Die besetzten Einträge der Inversen sind in den Abbildungen 9-11 in Abhängigkeit vom Kippwinkel σ aufgetragen.

Die Abbildungen zeigen den benötigten normierten Ausschlag der jeweiligen Steuergrößen pro zu steuerndem Moment. In Abbildung 10 ist gut zu erkennen, dass die nötigen Querruderausschläge für ein Giermoment aufgrund geringer Giermomentenwirkung des Querruders in der SFK sehr groß sind.

In Abbildung 11 ist, ähnlich zum Verhalten in Abbildung 5, ein Überblenden der Nickmomentensteuerung vom Heckrotor auf das Höhenruder bei 10 m/s ($\sigma = 20^\circ$) zu erkennen. Der nötige Höhenruderausschlag nimmt ab dem Punkt des Überblendens hin zur FFK deutlich ab.

Mit der derart bestimmten und invertierten Wirksamkeitsmatrix wurden die drei Eingrößenregler der Lageregelung eingestellt. Das Einstellen geschah auf einem Prüfstand experimentell in der SFK. Die Regelparameter wurden anschließend für den gesamten Flugbereich übernommen.

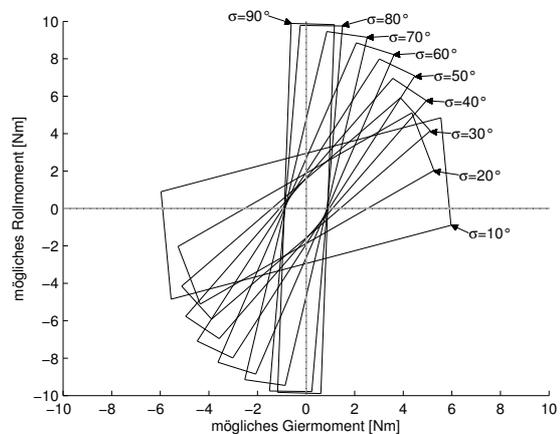


BILD 12. Maximal steuerbare Roll- und Giermomente

Zu Problemen in Zusammenhang mit den entkoppelten Ersatzsteuergrößen kann es kommen, wenn die realen Stellglieder ihre Begrenzung erreichen. Die normierten realen Stellglieder sind auf einen Bereich von ± 1 begrenzt. Transformiert man den Steuerbereich der realen Steuergrößen Querruder und differentieller Schub mit der Wirksamkeitsmatrix auf die Rollmoment-Giermoment-Ebene, so ergeben sich die maximal steuerbaren Momente als innere Punkte der in Abbildung 12 dargestellten Bereiche. Liegt ein vom Lageregler gesteuertes Moment außerhalb dieser zulässigen Bereiche, werden also die Grenzen eines oder beider realen Stellglieder erreicht, sollte nicht einfach auf Stellgliedseite begrenzt werden. Bei einer Begrenzung auf Stellgliedseite wäre die Funktionsweise der Entkopplung nicht mehr sichergestellt. Infolgedessen werden schon die Ersatzsteuergrößen so begrenzt, dass ein Gesamtmoment außerhalb des Steuerbereichs auf den Rand des steuerbaren Bereichs verschoben wird. Die Verschiebung geschieht linear in Richtung des Ursprungs. Damit bleibt die Richtung des gesteuerten Gesamtmomentes und somit die Entkopplungswirkung erhalten.

Der Kursregler wurde in Form des Kursänderungsratenreglers umgesetzt. Für die Kurvenkoordinierung abhängig von der erdfesten Vorwärtsgeschwindigkeit U und der Gierrate r wird unter Annahme der Kleinwinkel-

näherung ein Rollagewinkel von

$$(3) \quad \phi_{\text{koord.}} = \frac{U}{9,81 \text{ m/s}^2} \cdot r$$

vorgesteuert.

Aufgrund der fehlenden Windkanaldaten bezüglich der Ersatzsteuergrößen $\Delta F_{X, \text{ersatz}}$ und $\Delta F_{Z, \text{ersatz}}$ konnten die nötigen Kennfelder für die Höhenregelung nur in Form einer groben Abschätzung genutzt werden. Entsprechend konnte der zugehörige PI-Regler wegen noch deutlich vorhandener Kopplungen nur sehr konservativ eingestellt werden.

Das Kennfeld, mit welchem die Parameter der Entkopplung bestimmt werden, wird ausschließlich mit Hilfe des Kippwinkels σ ausgewertet, welcher durch die Vorwärtsgeschwindigkeitsvorgabe vorgesteuert wird. Die Änderung des Kippwinkels durch die Höhenregelung selbst bleibt unberücksichtigt, um innere Rückführungen innerhalb des Höhenreglers zu vermeiden (vgl. Abbildung 2).

4.4. Flugversuchsergebnisse

Der Bahnregler konnte mit Hilfe des Beispielfluggerätes im Rahmen erster manueller als auch vollautomatischer Flüge evaluiert werden. Die Flüge umfassten alle Flugbereiche von der SFK bis zur FFK sowie Konfigurationsänderungen in beide Richtungen. Da die Flugerprobung noch nicht abgeschlossen ist, werden nur ausgewählte Ergebnisse diskutiert.

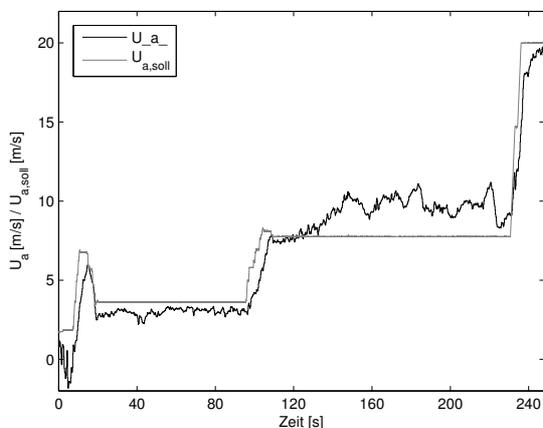


BILD 13. Folgeverhalten des Reglers für die Vorwärtsgeschwindigkeit

Abbildung 13 zeigt das Folgeverhalten des Vorwärtsgeschwindigkeitsreglers (genauer: nur der Vorsteuerung). Die Ist-Vorwärtsgeschwindigkeit wurde mit Hilfe einer Staudrucksonde ermittelt. Die Vorgabe wird zwischen 2 und 20 m/s variiert. Die durchschnittliche Abweichung der Regelgröße liegt trotz ausschließlicher Vorsteuerung im Bereich kleiner 2 m/s.

Der Lageregler funktioniert mit den in der SFK eingestellten Parametern der Eingrößenregelungen im gesamten Flugbereich. Exemplarisch ist das Folgeverhalten

des Rollagereglers in Abbildung 14 für verschiedene Flugeschwindigkeiten (= Konfigurationen) dargestellt. Das Folgeverhalten ist gut und darf als weitgehend unabhängig von der Konfiguration betrachtet werden. Die schon in Zusammenhang mit Abbildung 6 diskutierte, im Vergleich zur Rollsteuerbarkeit schwache Giersteuerbarkeit konnte während der Flugversuche in der SFK beobachtet werden. Bei dieser Problematik handelt es sich jedoch um eine Kippflügler-immanente flugdynamische Besonderheit und nicht um ein Problem des Bahnreglers. Die Giersteuerbarkeit sollte bei der Auslegung einer Bahnvorgabe Berücksichtigung finden.

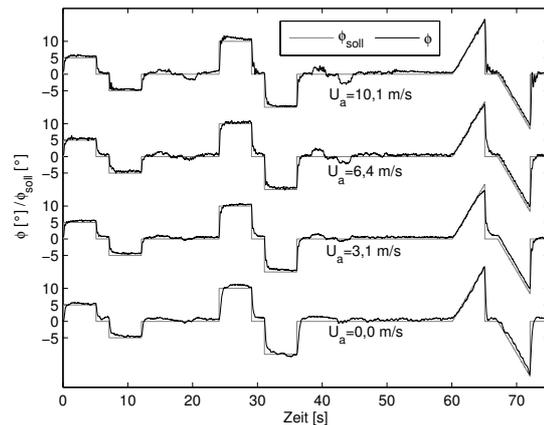


BILD 14. Folgeverhalten des Reglers für die Rolllage

5. ZUSAMMENFASSUNG & AUSBLICK

In dieser Arbeit wurde ein neues Konzept für eine Bahnregelung eines Kippflügelfluggerätes vorgestellt. Für den Bahnregler wurden mit der aerodynamischen Vorwärts- und Seitwärtsgeschwindigkeit, der Höhe sowie der Kursänderungsrate vier Führungsgrößen ausgewählt, welche eine Bahnführung des Fluggerätes in allen Flugzuständen vom Schwebeflug bis zum Flächenflug erlauben.

Das Konzept baut in großem Umfang auf Trimpunkt-Kennfeldern und entkoppelten Ersatzsteuergrößen auf. Die Trimpunkt-Kennfelder erlauben eine Auswahl der Flugzeugkonfiguration abhängig von der geforderten Vorwärtsgeschwindigkeit. Die Ersatzsteuergrößen helfen, das Folgeverhalten des Bahnreglers über den gesamten Flugbereich durch explizit entkoppelte Steuergrößenwirkung zu vereinheitlichen.

Zur Erprobung des Konzeptes wurde ein entsprechender Bahnregler für ein Beispiel-Kippflügelflugzeug ausgelegt. Nötige Kennfelder wurden in Windkanalversuchen bestimmt. Erste Flugversuche weisen eine Tauglichkeit des Konzeptes nach. Die Vorwärtsgeschwindigkeit lässt sich mit Hilfe der Trimm-Kennfelder innerhalb des gesamten Flugbereichs vorgeben. Die Lageregelung liefert unabhängig von der Flugeschwindigkeit gute Ergebnisse.

Die zukünftigen Arbeiten werden sich zunächst auf weitere Untersuchungen des Höhenreglers und dessen Führungsverhalten im Flugversuch konzentrieren. Ziel

weiterer Entwicklungen ist die Erweiterung der Fähigkeiten des Kippflüglers hin zu höherdynamischen Änderungen der Flugzeugkonfiguration. Dazu müssen insbesondere die Grenzen der gemachten Annahme zur quasistationären Zustandsänderung genauer betrachtet werden.

6. NOMENKLATUR

Formelzeichen:

f	Schub
H	Höhe
H_p	Höhenänderungsrate
L_{ersatz}	Ersatzsteuergröße Rollmoment
L_ξ	Rollmomentenwirkung des Querruders
M	Wirksamkeitsmatrix
M_{ersatz}	Ersatzsteuergröße Nickmoment
N_{ersatz}	Ersatzsteuergröße Gierrmoment
r	Gierrate
U	Vorwärtsgeschwindigkeit (erdfest)
U_a	Vorwärtsgeschwindigkeit (aerodyn.)
V_a	Seitwärtsgeschwindigkeit (aerodyn.)
x	Richtung flugzeugfest nach vorne
z	Richtung flugzeugfest nach unten
$\Delta F_{x,\text{ersatz}}$	Ersatzsteuergröße x-Kraft
$\Delta F_{z,\text{ersatz}}$	Ersatzsteuergröße z-Kraft
η	Höhenruderausschlag
η_p	Heckrotor-Blattverstellung
Θ	Nicklagewinkel (Rumpf)
ξ	Querruderausschlag
ξ_L	Querruderausschlag pro Rollmoment
σ	Kippwinkel
σ_{soll}	Soll-Kippwinkel
Φ	Rolllagewinkel
$\Phi_{\text{koord.}}$	für Kurvenkoordinierung nötiger Rolllagewinkel
Ψ	Kurswinkel
Ψ_p	Kursänderungsrate

Abkürzungen:

SFK	Schwebeflugkonfiguration
FFK	Flächenflugkonfiguration

7. LITERATUR

- [1] L. P. Thomas III. A flight study of the conversion maneuver of a tiltwing vtol aircraft. *Technical note d-153, NASA, 1959.*
- [2] T. Ostermann, J. Holsten, Y. Dobrev and D. Moormann. Control Concept of a Tiltwing UAV During Low Speed Manouvering. *Congress of the International Council of the Aeronautical Sciences, 28:1–10, 2012.*
- [3] J. J. Dickeson, D. Miles, O. Cifdaloz, V. L. Wells and A. A. Rodriguez. Robust LPV H^∞ Gain-Scheduled Hover-to-Cruise Conversion for a Tilt-Wing Rotorcraft in the Presence of CG Variations. *Proceedings of the 2007 American Control Conference, pages 5266–5271, 2007.*
- [4] K. Muraoka, N. Okada, D. Kubo and M. Sato. Transition Flight of Quad Tilt Wing VTOL UAV. *Congress of the International Council of the Aeronautical Sciences, 28:1–10, 2012.*
- [5] J. Holsten, T. Ostermann, Y. Dobrev, and D. Moormann. Model validation of a Tiltwing UAV in Transition Phase applying Windtunnel Investigations. *Congress of the International Council of the Aeronautical Sciences, 28:1–10, 2012.*
- [6] R. Brockhaus, W. Alles, and R. Luckner. Flugregelung. *Springer-Verlag, 2011.*
- [7] M. Schütt, P. Hartmann and D. Moormann. Fullscale Windtunnel Investigation of Actuator Effectiveness during Stationary Flight within the Entire Flight Envelope of a Tiltwing MAV. *International Micro Air Vehicle Conference and Competition, pages 77-83, 2014.*