

# VERBESSERTE PRÄDIKTOR-TUNNEL-KONFIGURATION FÜR 3-DIMENSIONALE FLUGFÜHRUNGSDISPLAYS

G. Sachs und I. Sturhan  
Lehrstuhl für Flugmechanik und Flugregelung  
Technische Universität München  
Boltzmannstr. 15, 85748 Garching

## ÜBERSICHT

Cockpit-Displays mit einer Tunnel-Prädiktor-Konfiguration zur Anzeige von Soll-Flugbahn und Position des Flugzeugs präsentieren Flugführungsinformationen in einem 3-dimensionalen Darstellungsformat. Dazu werden Verbesserungsmöglichkeiten für den Prädiktor betrachtet. Ausgehend von der ursprünglichen Funktion des Prädiktors als einer Positionsanzeige wird eine Erweiterung vorgelegt, die auf zwei Punkte ausgerichtet ist. Der erste Punkt ist regelungstechnischer Art. Dies betrifft den Prädiktor als Element des Gesamtsystems Pilot-Prädiktor-Flugzeug. Als zweiter Punkt wird die Relation zwischen Prädiktor und Tunnel behandelt. Dazu wird der Fall betrachtet, dass der Prädiktor eine Abweichung von der Soll-Flugbahn anzeigt, obwohl keine diesbezüglichen Fehler vorliegen. Um ein solches Verhalten zu vermeiden, wird die Relation zwischen Prädiktor und Tunnel in geeigneter Weise verbessert. Ergebnisse aus experimentellen Untersuchungen mit einem Flugsimulator werden zur Validierung vorgelegt.

## 1. EINLEITUNG

Neuartige Cockpit-Displays mit einem Tunnel zur Darstellung der Soll-Flugbahn (Bild 1) bieten eine erfolgversprechende Möglichkeit zur Unterstützung des Piloten bei der Flugzeugsteuerung und Flugführung. Sie erlauben eine Verbesserung in der visuellen Information des Piloten, die der manuellen Bahnsteuerung und dem Situationsbewusstsein zugute kommt. Der Tunnel hat hierbei die Funktion einer Kommandoanzeige.

Die Verbesserungsmöglichkeiten derartiger Tunnel-Displays können weiter gesteigert werden, wenn ein Prädiktor verwendet wird (Bild 2). Der Prädiktor besitzt die Funktion einer Statusanzeige, so dass mit dem Tunnel als Kommandoanzeige die Gesamtinformation vervollständigt werden kann. Der Prädiktor hat hierbei die Aufgabe, die Position des Flugzeugs zu einem künftigen Zeitpunkt, der geeignet zu wählen ist, anzuzeigen.

Forschungsarbeiten auf dem Gebiet von Cockpit-Displays mit einem 3-dimensionalen Darstellungsformat haben zu erfolgversprechenden Ergebnissen geführt [1-21]. Sie zeigen, dass deutliche Verbesserungen möglich sind, die die Präzision der manuellen Steuerung und die Reduzierung der Steueraktivität betreffen.

Ziel der vorliegenden Arbeit ist es, eine Erweiterung des Prädiktorkonzeptes in zwei Punkten vorzulegen. Der erste ist regelungstechnischer Art, bei dem der Prädiktor als Element des Gesamtsystems Pilot-Prädiktor-Flugzeug aufgefasst wird. Zur Erfüllung dieser Funktion ist ein Prädiktor-Steuergesetz mit einem geeigneten dynamischen Verhalten erforderlich. Dieses Prädiktor-Steuergesetz ist so zu gestalten, dass die Fähigkeiten des Piloten als Element des genannten Regelkreises in bestmöglicher Weise genutzt werden können und damit eine Maximierung der Leistung des Gesamtsystems Pilot-Prädiktor-Flugzeug erzielt wird. Weiter erlaubt es ein solch optimal gestaltetes Prädiktor-Steuergesetz, die Arbeitsbelastung des Piloten zu reduzieren.

Der zweite Punkt betrifft die Relation zwischen dem Prädiktor und dem Tunnel in ihren jeweiligen Funktionen als Status- bzw. Kommandoanzeige. Dabei kann es zur Anzeige von Abweichungen kommen, obwohl hierfür kein Grund vorliegt. Deshalb wird eine Erweiterung in der Relation zwischen Prädiktor und Tunnel vorgelegt, die ein derartiges Abweichungsverhalten verhindert.

Die Erweiterung des Prädiktorkonzeptes in den beiden Punkten wird im Folgenden für die Seitenbewegung vorgestellt. Eine analoge Erweiterung lässt sich auch für die Längsbewegung entwickeln, da hierfür äquivalente Überlegungen gelten.

## 2. PRÄDIKTOR ALS POSITIONSANZEIGE

Ausgangspunkt für die zu betrachtende Erweiterung ist die Funktion des Prädiktors als Anzeige einer Flugzeugposition zu einem zukünftigen,

geeignet zu wählenden Zeitpunkt, die als seine ursprüngliche Aufgabe angesehen werden kann. Zu diesem Zweck ist es erforderlich, die Flugbahn vorausbestimmen zu können. Hierfür gibt es Modelle unterschiedlicher Komplexität, mit denen dies möglich ist. Ein erfolversprechendes Modell basiert auf einer kreisförmigen Fortsetzung der Flugbahn (vgl. z.B. 1, 6 – 8, 12, 19). Mit den hier geltenden geometrischen und kinematischen Zusammenhängen lässt sich die Abweichung der Prädiktorposition von der Sollbahn folgendermaßen darstellen:

$$(1) \quad \Delta y_{PR} = \Delta y - y_C^* + \Delta \chi V T_{PR} + \Delta \dot{\chi} V T_{PR}^2 / 2$$

Führt man den Tunnelrahmen zur Prädiktorzeit ein und benutzt diesen als Referenz für das Prädiktorsymbol, so wird für den Piloten die Abweichung in präziser Weise erkennbar (vgl. hierzu auch Bild 2).

Das Blockschaltbild in Bild 3 zeigt, dass die Abweichung von der Soll-Flugbahn mit Größen des momentanen Flugzustandes bestimmt werden kann. Mit dem im Display angezeigten Positionsfehler

$$(2) \quad e_{PR} = K_{PR} \Delta y_{PR}$$

gilt dann für die Übertragungsfunktion des Prädiktors nach Laplace-Transformation

$$(3) \quad Y_{PR} = \frac{e_{PR}(s)}{\Delta \phi(s)} = K_{PR} g \frac{(T_{PR}^2 / 2) s^2 + T_{PR} s + 1}{s^2}$$

### 3. PRÄDIKTOR ALS REGLERKREISELEMENT

Der Prädiktor kann als Element eines Regelkreises aufgefasst werden, der aus dem Gesamtsystem Pilot-Prädiktor-Flugzeug besteht. Das aus der Sicht des Piloten zu regelnde Teilsystem besteht aus dem Prädiktor und dem Flugzeug, bestimmt durch deren Übertragungsverhalten

$$Y_{PR}(s) Y_C(s)$$

Beste Ergebnisse hinsichtlich Leistung und Arbeitsbelastung können erzielt werden, wenn das Übertragungsverhalten die folgende Charakteristik in einem hinreichend großen Bereich um die Crossover-Frequenz aufweist (vgl. [23, 24]):

$$(4) \quad Y_{PR}(s) Y_C(s) = \frac{K}{s}$$

Geht man davon aus, dass das Übertragungsver-

halten des Flugzeugs als vorgegeben anzusehen ist, so kann durch eine geeignete Auslegung des Prädiktor-Steuergesetzes das gewünschte Verhalten entsprechend Gl. (4) erzielt werden. Erweitert man das Prädiktor-Steuergesetz gegenüber der Beziehung nach Gl. (3) durch eine Rückführung der Roll-Drehgeschwindigkeit, so gilt

$$(5) \quad Y_{PR}(s) = K_{PR} g \frac{(K_{\dot{\phi}} / g) s^3 + (T_{PR}^2 / 2) s^2 + T_{PR} s + 1}{s^2}$$

Zur Beschreibung des dynamischen Verhaltens des Flugzeugs im vorliegenden Fall bzw. für den in Betracht kommenden Frequenzbereich kann die folgende Übertragungsfunktion bezüglich der Rollbewegungsdynamik angesetzt werden

$$(6) \quad Y_C(s) = \frac{\Delta \phi(s)}{\delta_a(s)} = \frac{L_{\delta_a}}{s(s+1/T_R)}$$

Wählt man für den Verstärkungsfaktor der Rückführung der Roll-Drehgeschwindigkeit

$$(7) \quad K_{\dot{\phi}} \approx (g/2) T_R T_{PR}^2$$

so ergibt sich die folgende Beziehung für die aus der Sicht des Piloten zu regelnde Strecke

$$(8) \quad Y_{PR}(s) Y_C(s) = K_{PR} g L_{\delta_a} \frac{T_{PR}^2 s^2 + (2/T_{PR}) s + 2/T_{PR}}{2 s^3}$$

Mit dieser Beziehung ist bei geeigneter Wahl von  $T_{PR}$  ein Übertragungsverhalten gemäß Gl. (4) möglich, das für Frequenzen gilt, die größer sind als

$$\omega_{PR} = \sqrt{2} / T_{PR}$$

### 4. VERBESSERUNG DER RELATION VON PRÄDIKTOR UND TUNNEL

#### Verbesserungskonzept

Für die Konfiguration Prädiktor-Tunnel sind weitere Verbesserungen möglich. Hierfür wird eine Fortentwicklung des Prädiktor-Steuergesetzes vorgestellt, das die Relation zwischen Prädiktor und Tunnel verbessert.

Die Relation zwischen Prädiktor und Tunnel bestimmt sich durch die Zuordnung des Prädiktor-Symbols zum Referenzrahmen des Tunnels zur Prädiktorzeit (vgl. auch Bild 2). Aus dieser Relation ergibt sich eine genaue Anzeige der Abweichung von der Soll-Flugbahn, die der Pilot präzise und leicht wahrnehmen kann. Er kann dann mit

korrigierenden Steuereingriffen den angezeigten Fehler reduzieren.

Betrachtet man Flugzustände ohne Fehler in den Größen, die für die Bestimmung der Prädiktors verwendet werden, so soll das Prädiktorsymbol im Zentrum des Referenzrahmens des Tunnels sein. Dies gilt grundsätzlich für stationäre Flugzustände, wie in Bild 4 am Beispiel einer geradlinigen Flugbewegung dargestellt ist. In einem solchen Fall befindet sich das Prädiktorsymbol im Zentrum des Referenzrahmens, so dass kein korrigierender Steuereingriff des Piloten stimuliert wird.

Die Relation zwischen Prädiktor und Tunnel kann sich jedoch bei instationären Flugzuständen ändern. Ein Beispiel hierzu ist in Bild 5 dargestellt, das den Übergang von einem Geradeaus- zu einem Kurvenflug zeigt. Das Flugzeug befindet sich in einem Flugzustand ohne Fehler, so dass die Position des Prädiktorsymbols auf einer geradlinigen Verlängerung der momentanen Flugbahn liegt. Dadurch ergibt sich eine Abweichung zum Referenzrahmen des Tunnels.

Eine Anzeige wie in Bild 5 stimuliert einen Steuereingriff seitens des Piloten mit dem Ziel, die Abweichung des Prädiktorsymbols vom Referenzrahmen des Tunnels zu reduzieren. Eine solche Steuerbetätigung wäre jedoch schädlich, da sie zu einem Flugzustand mit Fehlern führen würde. Um ein derartiges Verhalten zu verhindern, ist eine Erweiterung des Prädiktor-Steuergesetzes erforderlich, das das beschriebene Abweichungsverhalten berücksichtigt.

Zu diesem Zweck wird das Berechnungsverfahren zur Bestimmung der Position des Prädiktorsymbols dahingehend erweitert, dass sie bei Flugzuständen ohne Fehler dem Referenzrahmen des Tunnels zur Prädiktionszeit präzise folgt, unabhängig davon, ob es sich um stationäre oder instationäre Flugzustände handelt. Das Ergebnis hierfür ist in Bild 6 am Beispiel des betrachteten Übergangs vom Geradeaus- zum Kurvenflug dargestellt. Demnach stimmen die Soll-Flugbahn und die prädierte Flugbahn für den künftigen, bis zur Prädiktionszeit reichenden Zeitbereich überein.

Die beschriebene Verbesserung des Prädiktor-Steuergesetzes kann durch weitere Punkte unterstützt werden. Hierzu zählt einmal die Art der auszuführenden instationären Flugmanöver unter Einbeziehung der zugehörigen manuellen Steuereingaben. Die betreffenden Flugmanöver lassen sich in einer Weise konzipieren, dass die dafür erforderlichen manuellen Steuereingaben aus der Sicht des Piloten möglichst günstig sind mit dem Ziel einer einfachen und leichten Ausführung. Zum anderen ermöglicht die Vorausschau, die

eine inhärente Eigenschaft des Prädiktor-Tunnel-Displays ist, eine antizipatorische Steuerung und kann dadurch den Piloten unterstützen. Dies ist ein Vorteil auch für hier betrachteten Fall.

### **Konzipierung geeigneter manueller Steuereingaben zur Unterstützung des Piloten**

Die Konzipierung geeigneter manueller Steuereingaben zur Ausführung eines bestimmten Flugmanövers sei am Beispiel der Transitionsphase vom Geradeaus- zum Kurvenflug und umgekehrt behandelt. Ziel ist hierbei die Entwicklung einer Steuersequenz, die für den Piloten möglichst einfach und leicht ausführbar ist.

Die Transitionsphasen beim Kurvenflug zur Durchführung einer Richtungsänderung sind in Bild 7 schematisch dargestellt. Kernpunkt ist hierbei der Übergang vom Geradeausflug zum Kurvenflug und umgekehrt. Bei der Kurveneinleitung nimmt der Hängewinkel von Null kontinuierlich zu, bis er den für den Kurvenflug erforderlichen Wert erreicht hat. Ziel ist hierbei eine Steuereingabe, die aus der Sicht des Piloten möglichst günstig ist. Der Vorgang bei der Kurvenausleitung erfolgt in analoger Weise.

Die Konzipierung von geeigneten Steuereingaben für die Transitionsphasen war Gegenstand einer Versuchsreihe im Flugsimulator, um das angestrebte günstige Verhalten zu entwickeln. Hierbei wurden auch Erfahrungen über die Steuerung von Transitionsmanövern mit konventioneller Instrumentierung oder bei guter Sicht im Sinne eines Referenzfalles berücksichtigt. Ein Ergebnis hierzu ist in Bild 8 dargestellt, das Zeitverläufe von Steuereingaben des Piloten und relevanten Zustandsgrößen zeigt. Aus diesem Ergebnis wird deutlich, dass die Rollsteuerung während des Transitionsmanövers aus einem Querruderausschlag mit annähernd konstantem Niveau besteht, dem am Anfang und am Ende jeweils kurze Phasen des Anstiegs und Rückgangs vorangehen bzw. nachfolgen. Der Hängewinkel zeigt während der Transitionsphase eine Zu- bzw. Abnahme, die näherungsweise linear verläuft.

### **Antizipatorische Steuerungsaspekte**

Ein Prädiktor-Tunnel-Display gibt eine Vorausschau auf die künftige Flugbahn, so dass der Pilot die Änderungen vorher wahrnehmen und die erforderlichen Steuereingriffe antizipieren kann (vgl. hierzu auch Bild 2). Der Referenzrahmen des Tunnels sowie der Prädiktor befinden sich um eine Zeitspanne, die durch die Prädiktionszeit gegeben ist, vor dem momentanen Zeitpunkt. Um

die genannte Zeitspanne im Voraus ist eine Änderung der Soll-Flugbahn wahrnehmbar, sobald sie im Display den Ort des Tunnel-Referenzrahmens erreicht. Dies kann eine antizipatorische Steuerung unterstützen.

Ein Prädiktor-Tunnel-Display vermittelt Kommando- und Stausinformation. Deshalb bietet es die Möglichkeit zur Vorsteuerung. Eine derartige Struktur zum System Pilot-Flugzeug ist in Bild 9 schematisch dargestellt. Hierfür gelten die folgenden Beziehungen

$$(9) \quad \frac{m(s)}{i(s)} = \frac{Y_C(Y_{Pi} + Y_{Pe})}{1 + Y_{Pe}Y_C}$$

$$\frac{e(s)}{i(s)} = \frac{1 - Y_C Y_{Pi}}{1 + Y_{Pe}Y_C}$$

Geht man davon aus, dass für den interessierenden Frequenzbereich das Übertragungsverhalten  $Y_{Pi}$  des Piloten dem des Flugzeugs in der folgenden Weise entsprechen bzw. angepasst werden kann,

$$(10) \quad Y_{Pi} = 1/Y_C$$

so folgt aus Gl. (9)

$$(11) \quad \frac{m(s)}{i(s)} = 1, \quad \frac{e(s)}{i(s)} = 0$$

Dieses Ergebnis besagt, dass die Vorsteuerung sehr effektiv sein kann und prinzipiell einen Vorteil im Hinblick auf die Vermeidung von Abweichungen aufweist. Zu diesem Vorteil kommt noch hinzu, dass die Stabilitätseigenschaften des Systems Pilot-Flugzeug nicht beeinträchtigt werden.

Für eine mögliche Vorsteuerung ist weiter bedeutsam, dass dazu die vorher betrachtete Konzipierung geeigneter Steuereingaben beitragen kann. Der Pilot kann hierbei eine gelernte bzw. eingeübte Abfolge von Steuereingaben ausführen, um die gewünschte Antwort im Flugzeugverhalten zu generieren.

## 5. EXPERIMENTELLE ERGEBNISSE AUS FLUGSIMULATIONSVERSUCHEN

Das beschriebene Tunnel-Display ist Gegenstand einer Erprobung im Flugsimulator. Hierfür wird der Forschungs-Flugsimulator des Lehrstuhl für Flugmechanik und Flugregelung der TU München eingesetzt.

Der Flugsimulator besitzt ein Cockpit für eine zweiköpfige Besatzung. Er verfügt über programmierbare, großformatige Displays, Side-Sticks für

die Roll- und die Nicksteuerung sowie Pedale für die Giersteuerung. Die Außensicht wird von einer leistungsfähigen Sichtsystem-Software generiert und mittels dreier Projektoren auf einer gekrümmten Bildschirmfläche mit 150° Öffnungswinkel präsentiert. Das bei der Erprobung des Tunnel-Displays verwendete simulierte Flugzeug, dessen Dynamik über ein 6-Freiheitsgrad-Modell nachgebildet wurde, entspricht einem modernen Regionalflugzeug mit zwei Strahltriebwerken.

Gegenstand einer vorgeschalteten Versuchsreihe war die Konzipierung geeigneter manueller Steuereingaben für die Transitionsphasen vom Geradeaus- zum Kurvenflug und umgekehrt. Ziel war die Entwicklung einer Steuercharakteristik, die zu dem beschriebenen günstigen Verhalten für den Piloten sowie zu einem einfachen Vorsteuerverhalten beiträgt. Zu diesem Zweck wurden Transitionsmanöver mit konventioneller Instrumentierung oder bei guter Sicht im Sinne eines Referenzfalles durchgeführt. Ergebnisse hierzu sind in dem bereits behandelten Bild 8 dargestellt, das Zeitverläufe von Steuereingaben des Piloten und relevanten Zustandsgrößen zeigt.

Ergebnisse aus den Flugsimulationsversuchen, die mit der Relation zwischen Prädiktor und Tunnel befasst sind, zeigen die Bilder 10 bis 12. Hierbei werden verschiedene Fälle betrachtet. Die dabei durchzuführende Flugaufgabe bestand aus einem Flugmanöver mit einem Wechsel von einer Kurve zu einer anderen.

Ausgangspunkt ist der Fall abrupter Übergänge zwischen Geradeaus- und Kurvenflug, der als Bewertungsreferenz dient. Hier schließt sich der kurvenförmige Bahnteil unmittelbar an den geradlinigen an. Die Ergebnisse hierzu in Bild 10 zeigen, dass signifikante Bahnabweichungen an den Übergängen auftreten. Auch aus dem Verlauf des Hängewinkels geht hervor, dass deutliche Abweichungen zum Sollwert vorhanden sind. Dabei zeigt sich, dass der Steuereingriff vor dem Beginn der jeweiligen Kurvenflugphase erfolgt. Ursache hierfür ist die oben beschriebene Diskrepanz in der Relation von Prädiktor und Tunnel.

Eine Verbesserung ist bereits mit einem Transitionsmanöver möglich, bei dem geeignete Steuereingaben für die Übergänge zwischen geradlinigem und kurvenförmigen Bahnteilen entsprechend den Überlegungen zu Bild 8 konzipiert und entwickelt wurden. Für die Relation zwischen Prädiktor und Tunnel wurde die ursprüngliche Konfiguration ohne eine Verbesserung verwendet. Ergebnisse hierzu sind in Bild 11 dargestellt. Daran geht hervor dass die Abweichungen gegenüber dem vorherigen Fall verringert werden konnten.

Weitere Verringerungen in den Abweichungen von den Sollwerten ergeben sich für den Fall, dass die Relation von Prädiktor und Tunnel gemäß der obigen Darstellung verbessert worden ist. Ergebnisse hierzu zeigt Bild 12. Die Abweichungen von der Sollbahn sind erheblich vermindert. Auch im Verlauf des Hängwinkels zeigen sich Verbesserungen sowohl im Hinblick auf den Betrag der Abweichungen als auch in der zeitlichen Zuordnung zum Sollwert.

## 6. ZUSAMMENFASSUNG

Verbesserungen für die Prädiktor-Tunnel-Konfiguration von Flugführungsdisplays mit 3-dimensionalem Darstellungsformat werden vorgelegt. Dies betrifft zwei Punkte. Einmal wird für den Prädiktor in seiner regelungstechnischen Funktion ein Steuergesetz entwickelt, das auf die Fähigkeiten des Piloten zugeschnitten ist. Hiermit kann ein Verhalten des Gesamtsystems Pilot-Prädiktor-Flugzeug mit maximaler Leistung erzielt werden. Zum anderen wird eine Verbesserung in der Relation zwischen Prädiktor und Tunnel vorgelegt. Dadurch kann das Problem vermieden werden, dass Abweichungen in der Position des Prädiktorsymbols vom Referenzrahmen des Tunnels auftreten können, obwohl keine diesbezüglichen Fehler vorliegen. Im Hinblick auf die Verbesserung in der Relation zwischen Prädiktor und Tunnel werden weiter zwei Punkte aufgenommen, die eine unterstützende Wirkung haben. Dies bezieht sich einmal auf die Konzipierung geeigneter manueller Steuereingaben, mit denen die betreffenden Flugmanöver ausgeführt werden. Der andere Punkt unterstützender Art betrifft die Möglichkeit zur antizipatorischen Steuerung. Ergebnisse aus experimentellen Untersuchungen mit einem Flugsimulator werden vorgelegt, die die erreichten Verbesserungen zeigen.

## 7. LITERATUR

- [1] Theunissen, E.: Integrated Design of a Man-Machine Interface for 4-D Navigation. PhD Dissertation, TU Delft, The Netherlands, 1997.
- [2] Theunissen, E., Mulder, M.: Availability and Use of Information in Perspective Flightpath Displays. *Proceedings of the AIAA Flight Simulation Technologies Conference*, 1995, pp. 137-147.
- [3] Grunwald, A.J., Robertson, J.B., Hatfield, J.J.: Experimental Evaluation of a Perspective Tunnel Display for Three-Dimensional Helicopter Approaches. *Journal of Guidance, Control, and Dynamics*, Band 4, Nr. 6, 1981, pp. 623-631.
- [4] Grunwald, A.J.: Tunnel Display for Four-Dimensional Fixed-Wing Aircraft Approaches. *Journal of Guidance, Control, and Dynamics*, Band 7, Nr. 3, 1984, pp. 369-377.
- [5] Grunwald, A.J.: Predictor Laws for Pictorial Flight Displays. *Journal of Guidance, Control, and Dynamics*, Band 8, Nr. 5, 1985, pp. 545-552.
- [6] Grunwald, A.J.: Improved Tunnel Display for Curved Trajectory Following: Control Considerations. *Journal of Guidance, Control, and Dynamics*, Band 19, Nr. 2, 1996, pp. 370-377.
- [7] Grunwald, A.J.: Improved Tunnel Display for Curved Trajectory Following: Experimental Evaluation. *Journal of Guidance, Control, and Dynamics*, Band 19, Nr. 2, 1996, pp. 378-384.
- [8] Haskell, I.D., Wickens, C.D.: Two- and Three-Dimensional Displays for Aviation: A Theoretical and Empirical Comparison. *The International Journal of Aviation Psychology*, 3(2), pp. 87-109, 1993.
- [9] Wickens, C.D., Fadden, S., Merwin, D., Ververs, P.M.: Cognitive Factors in Aviation Display Design. *Proceedings of the 17<sup>th</sup> AIAA/IEEE/SAE Digital Avionics Systems Conference*, Bellevue WA, 31. October – 6. November 1998.
- [10] Helmetag, A., Mayer, U., Kaufhold, R.: Improvement of Perception and Cognition in Spatial Synthetic Environment. *Proceedings of the 17<sup>th</sup> European Annual Conference on Human Decision Making and Manual Control*, pp. 207-214, 1998.
- [11] Lenhart, P.M., Purpus, M., von Viehbahn, H.: Flug-erprobung von Cockpitdisplays mit synthetischer Außensichtdarstellung. DGLR-JT98-060, 1998.
- [12] Funabiki, K., Muraoka, K., Terui, Y., Harigae, M., Ono, T.: In-Flight Evaluation of Tunnel-in-the Sky Display and Curved Approach Pattern. *AIAA Guidance, Navigation, and Control Conference Proceedings*, pp. 108-114, 1999.
- [13] Mulder, M.: Cybernetics of Tunnel-in-the-Sky Displays. Delft University Press, Delft, The Netherlands, 1999.
- [14] Jennings, C., Alter, K.W., Barrows, A.K., Enge, P., Powell, J.D.: 3-D Perspective Displays for Guidance and Traffic Awareness. ION99, 1999.
- [15] Barrows, A.K., Powell, J.D.: Flying a Tunnel-in-the Sky Display within Current Airspace System. *AIAA-2000-1059*, 2000.
- [16] Sachs, G.; Möller, H.: Synthetic Vision Flight Tests for Precision Approach and Landing. *AIAA Guidance, Navigation and Control Conference Proceedings*, 1995, pp. 1459-1466.
- [17] Sachs, G., Dobler, K., Hermle, P.: Flight Testing Synthetic Vision for Precise Guidance Close to the Ground. *AIAA Guidance, Navigation, and Control Conference Proceedings*, 1997, pp. 1210-1219.
- [18] Sachs, G., Dobler, K., Theunissen, E.: Pilot-Vehicle Control Issues for Predictive Flightpath Displays. *AIAA Guidance, Navigation, and Control Conference Proceedings*, 1999, pp. 574-582.
- [19] Sachs, G.: Perspective Flightpath Predictor for Minimum Pilot Compensation. *Aerospace Science and Technology*, Vol. 3, No. 4, 1999.
- [20] Sachs, G.: Perspective Predictor/Flight-Path Display with Minimum Pilot Compensation. *Journal of Guidance, Control, and Dynamics*, Vol. 23, No. 3, pp. 420-429, 2000.
- [21] Sachs, G., Dobler, K.: Predictor/Flight-Path Display for Manual Longitudinal Control Improvement. *Journal of Guidance, Control, and Dynamics*, Vol. 25, No. 3, pp. 494-501, 2002.
- [22] Federal Aviation Regulation Sec 23.157, Federal Aviation Administration, Washington D.C.
- [23] McRuer, D.T.: Pilot Modeling. *AGARD-LS-157*, pp. 2-1 - 2-30, 1988.
- [24] Hess, R. A.: Feedback Control Models – Manual Control and Tracking. *Handbook of Human Factors and Ergonomics*, 2<sup>nd</sup> ed., Wiley, New York, 1997, pp. 1249-1294.

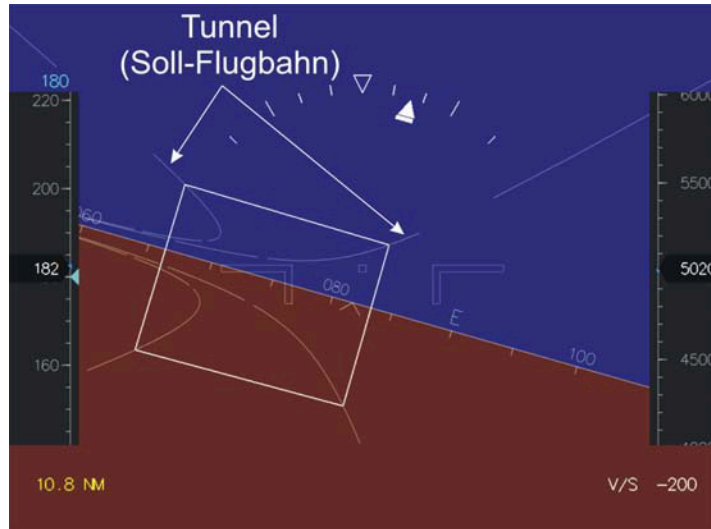


Bild 1: Tunnel-Display (ohne Prädiktor)

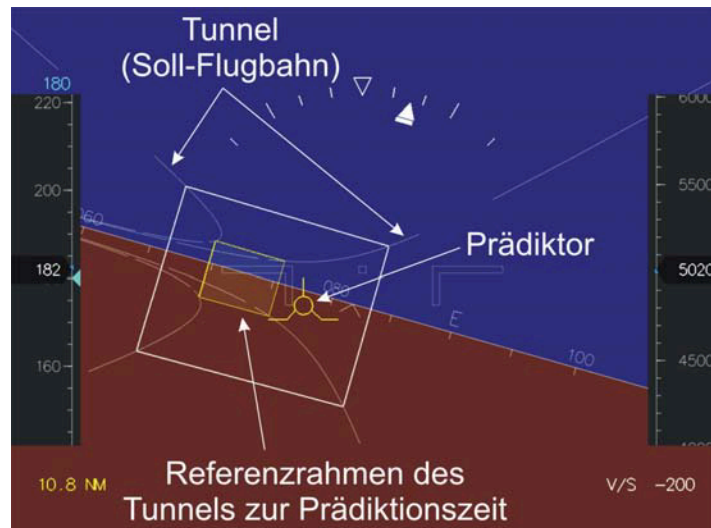


Bild 2: Tunnel-Display mit Prädiktor

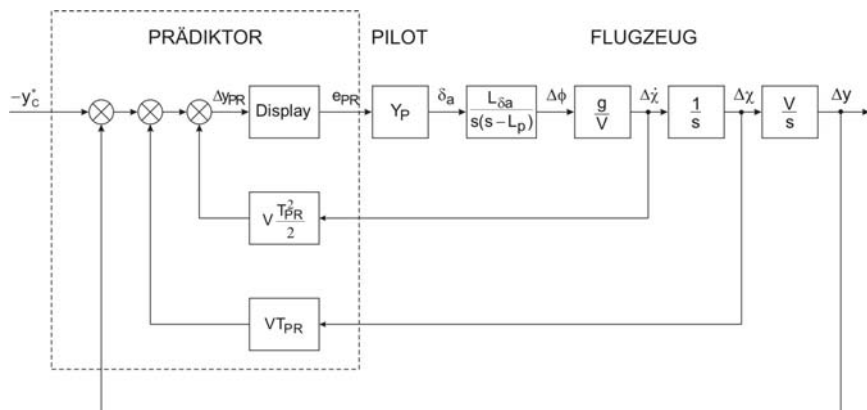


Bild 3: Blockschaltbild für Prädiktor

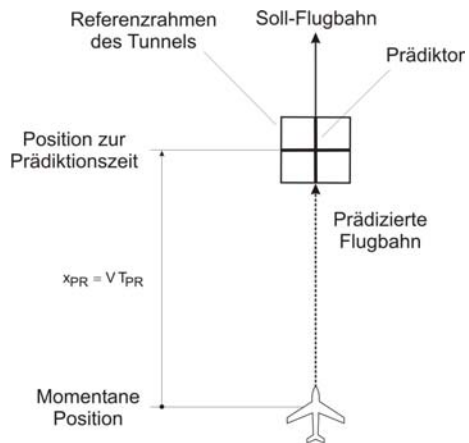


Bild 4: Relation zwischen Prädiktor und Referenzrahmen des Tunnels für stationären Flugzustand ohne Fehler (Geradausflug)

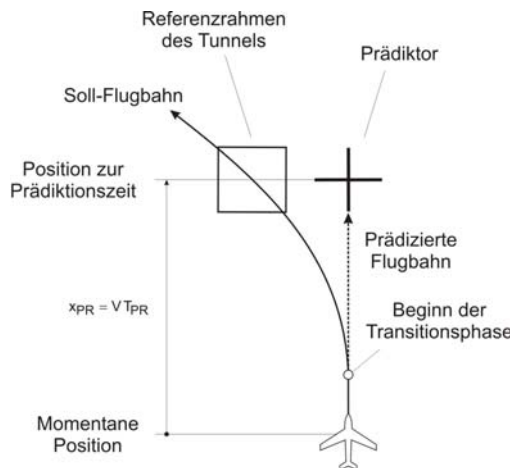


Bild 5: Relation zwischen Prädiktor und Referenzrahmen des Tunnels für instationären Flugzustand ohne Fehler (Transition Geradaus-/Kurvenflug)

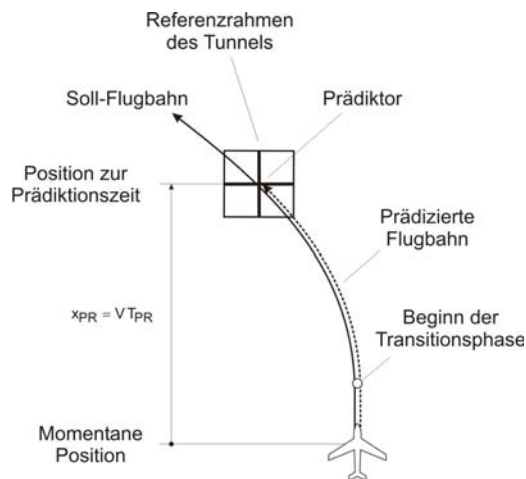


Bild 6: Relation zwischen Prädiktor und Referenzrahmen des Tunnels für instationären Flugzustand bei Erweiterung des Prädiktor-Steuergesetzes

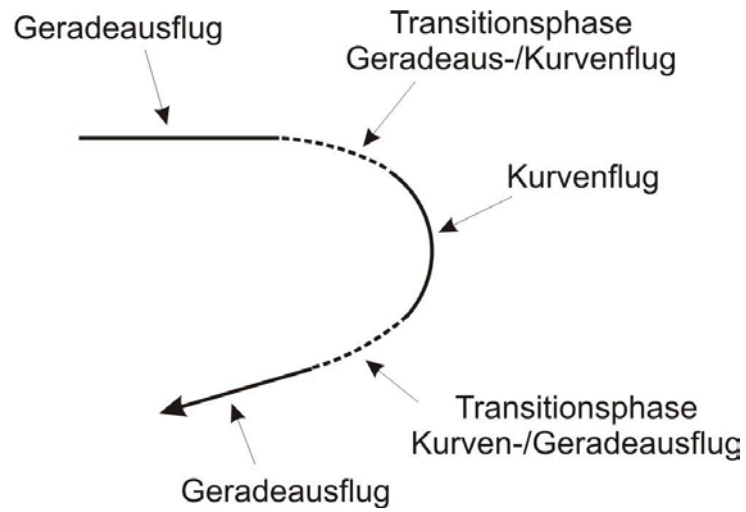


Bild 7: Transitionsphasen

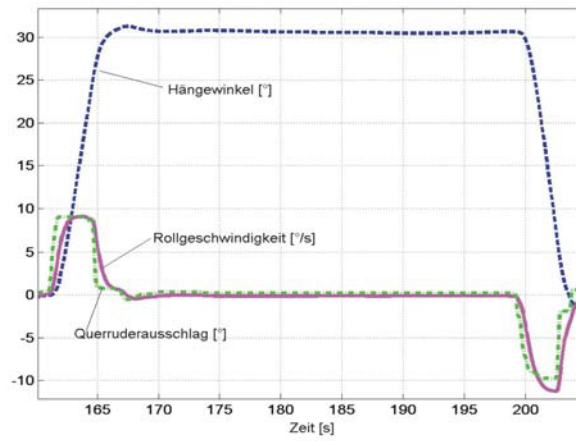


Bild 8: Ergebnis aus Flugsimulationsuntersuchungen zur Entwicklung eines Transitionsmanövers mit möglichst einfachen Steuereingaben

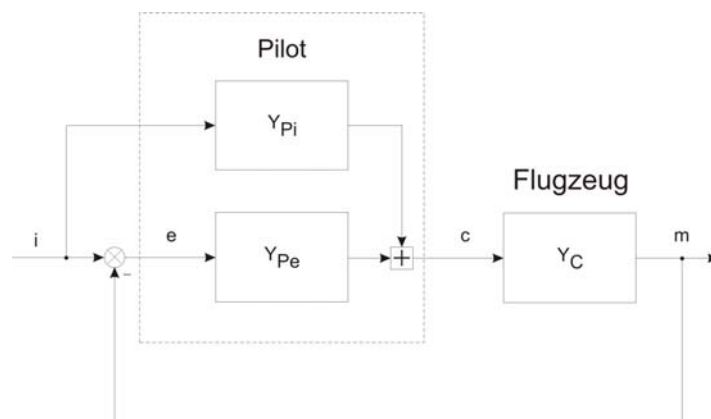


Bild 9: Modell für System Pilot-Flugzeug



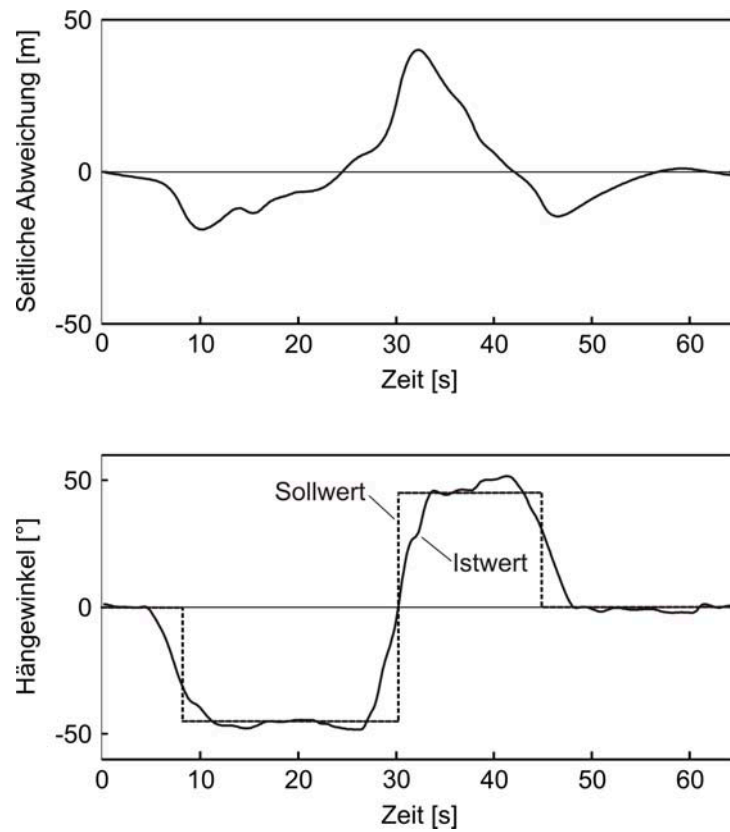


Bild 10: Kurvenflugmanöver ohne verbesserte Relation zwischen Prädiktor und Tunnel mit abruptem Übergang vom Geradeaus- zum Kurvenflug und umgekehrt (ohne Transitionsphase)

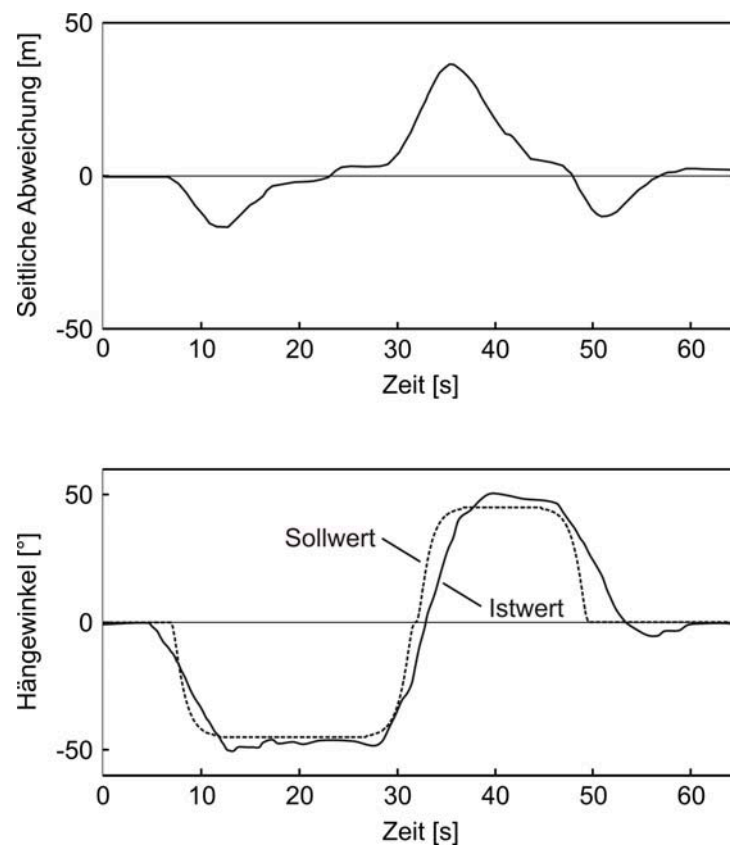


Bild 11: Kurvenflugmanöver ohne verbesserte Relation zwischen Prädiktor und Tunnel und mit Transitionsphase vom Geradeaus- zum Kurvenflug und umgekehrt (gradueller Übergang)

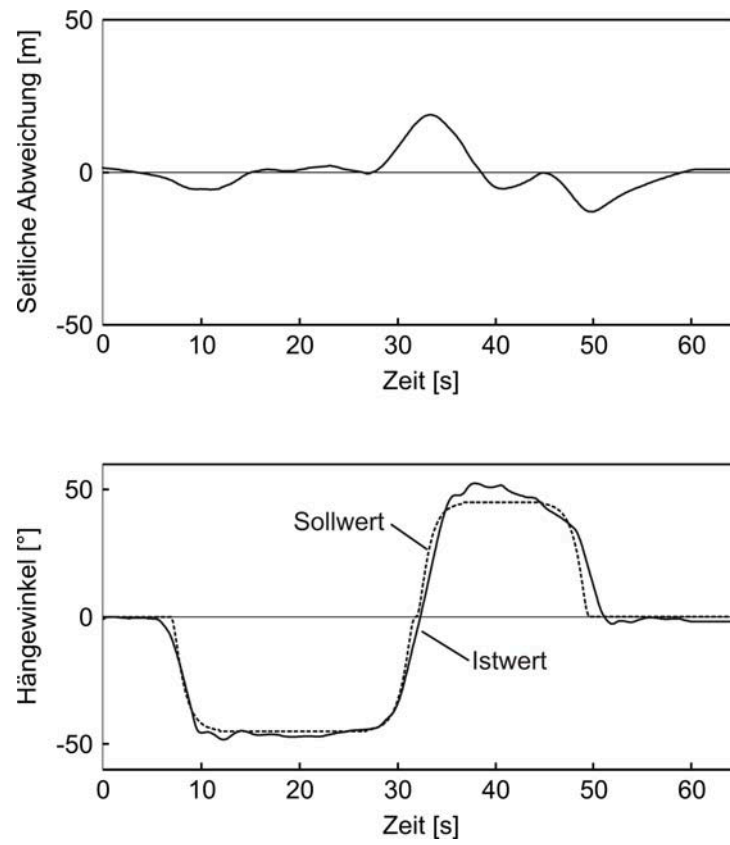


Bild 12: Kurvenflugmanöver mit verbesserter Relation zwischen Prädiktor und Tunnel und mit Transitionsphase vom Geradeaus- zum Kurvenflug und umgekehrt (gradueller Übergang)