

TUNNEL-DISPLAY ZUR VERBESSERUNG DER FLUGBAHNFÜHRUNG DURCH ANTIZIPATORISCHE VORSTEUERUNG

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

ÜBERSICHT

Manuelle Steuerungsmöglichkeiten bei Verwendung eines Tunnel-Displays mit Prädiktor werden behandelt, das Flugführungsinformationen in einem 3-dimensionalen Darstellungsformat auf einem Cockpit-Bildschirm präsentiert. Ein besonderer Aspekt betrifft hierbei eine antizipatorische Vorsteuerung aufgrund der Vorausschau auf die Soll-Flugbahn, die ein solches Display bietet. Ein Flugmanöver, bei dem die Möglichkeit zur manuellen Vorsteuerung besonders zum Tragen kommen kann, ist die Transition vom Geradeaus- zum Kurvenflug und umgekehrt. Überlegungen zur Gestaltung des Transitionsmanövers und zur bildlichen Darstellung im Tunnel-Display werden entwickelt mit dem Ziel, den Piloten bei der Vorsteuerung wirksam zu unterstützen. Ergebnisse aus experimentellen Untersuchungen mit einem Flugsimulator werden zur Validierung vorgelegt.

1. EINLEITUNG

Neuartige Cockpit-Displays, in denen die Soll-Flugbahn in Form eines Tunnels dargestellt wird (Bild 1), bieten eine erfolgversprechende Möglichkeit für die visuelle Information des Piloten zur Flugzeugsteuerung und Flugführung. Diese Verbesserungsmöglichkeit kann noch erweitert werden durch einen Prädiktor (Bild 1), der die Flugzeugposition zu einem geeigneten zukünftigen Zeitpunkt anzeigt. Die angesprochenen Displayfähigkeiten stellen eine Erweiterung gegenüber der derzeitigen Cockpit-Instrumentierung dar, die in den Primär-Informationen Anzeigen zur momentanen Situation des Flugzeugs präsentiert (Bild 2). Dementsprechend hat der Pilot hier die räumliche und zeitliche Situation mental zu rekonstruieren. Auch ist ein Scanning-Prozess erforderlich, um ein adäquates Situationsbewusstsein zu erlangen.

Neuere Forschungsarbeiten auf dem Gebiet von Tunnel-Displays haben zu erfolgversprechenden Ergebnissen geführt [1-20]. Sie zeigen, dass deutliche Verbesserungen möglich sind, die die Präzision der manuellen Steuerung und die Reduzierung der Steueraktivität betreffen.

Ein Tunnel-Display ist ein Instrumententyp antizipatorischer Art, der dem Piloten die zukünftige Flugbahn präsentiert. Dadurch wird ein System mit Vorsteuerung und Vorausschau ermöglicht. Es zeigt dem Piloten aufgrund der Vorausschau die zu fliegende Bahn an, so dass er Soll- und Istwert hinsichtlich der Flugbahn als unabhängige Größen wahrnehmen kann. Dies kann der Pilot zu einer Möglichkeit der Vorsteuerung der Flugbahn nutzen.

Ziel der vorliegenden Arbeit ist eine Betrachtung über Möglichkeiten, die ein Tunnel-Display mit Prädiktor für die visuelle Information des Piloten und für die manuelle Steuerung bietet. Von besonderem Interesse sind hierbei Vorsteuerung und Vorausschau hinsichtlich der Flugbahn.

2. GRUNDSÄTZLICHE ASPEKTE

Ein Cockpit-Display, das einen Tunnel zur Darstellung der Soll-Flugbahn und einen Prädiktor zur Anzeige der Flugzeugposition präsentiert, vermittelt dem Piloten Flugführungsinformationen mit den folgenden Eigenschaften:

– Sollwertinformation

Die Sollwertinformation wird dem Piloten in Form des Tunnels angezeigt, der die zu fliegende Bahn in einem 3-dimensionalen Darstellungsformat wiedergibt (Bild 1).

– Istwertinformation

Als Istwertinformation wird dem Piloten die Flugzeugposition, die durch den Prädiktor generiert wird, zu einem geeigneten zukünftigen Zeitpunkt angezeigt (Bild 1). Die Relation zwischen der durch den Prädiktor angezeigten Position und der Tunnel-Darstellung stellt die Abweichung von der Soll-Flugbahn dar.

Ziel der vorliegenden Arbeit ist eine Betrachtung zu den Möglichkeiten, die ein Tunnel-Display mit Prädiktor für die visuelle Information des Piloten und für die manuelle Steuerung bietet. Von besonderem Interesse sind hierbei Vorsteuerung und Vorausschau hinsichtlich der Flugbahn.

Die visuellen Informationen in einem 3-dimensionalen Darstellungsformat, die auf dem Tunnel-Display mit Prädiktor angezeigt werden, erlauben die folgenden Möglichkeiten in der manuellen Steuerung und Regelung des Flugzeugs:

– Regelung

Aus der Relation zwischen der durch den Prädiktor angezeigten Flugzeugposition und der durch den Tunnel dargestellten Soll-Flugbahn ergibt sich der mögliche Fehler. Dies erlaubt es dem Piloten, aufgrund eines visuellen Eingangs mit einem manuellen Ausgang tätig zu werden.

Die Genauigkeit der Fehleranzeige wird durch die Verwendung eines Tunnel-Referenzrahmens und dessen Hervorhebung in der Display-Darstellung erhöht (Bild 1). Denn der Tunnel-Referenzrahmen, der die Position des Tunnels zur Prädiktionszeit anzeigt, ermöglicht einen präzisen Bezug für die durch den Prädiktor generierten bzw. angezeigten Flugzeugposition in Relation zum Sollwert.

- Vorsteuerung/Vorausschau

Das Tunnel-Display zeigt Sollwert-Information in Form der zu fliegenden Bahn in einem 3-dimensionalen Darstellungsformat an. Dementsprechend ist eine manuelle Steuerung antizipatorischer Art möglich. Daraus ergeben sich Vorteile für die Bahnsteuerung, die zu einer Verbesserung genutzt werden können.

Die beschriebene Struktur zu dem System Pilot-Flugzeug ist in Bild 3 dargestellt. Hierfür gelten die folgenden Beziehungen

$$(1) \quad \begin{aligned} \frac{m(s)}{i(s)} &= \frac{Y_C(Y_{Pi} + Y_{Pe})}{1 + Y_{Pe}Y_C} \\ \frac{e(s)}{i(s)} &= \frac{1 - Y_CY_{Pi}}{1 + Y_{Pe}Y_C} \end{aligned}$$

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

$$(2) \quad Y_{Pi} = \frac{1}{Y_C}$$

so folgt aus Gl. (1)

$$(3) \quad \begin{aligned} \frac{m(s)}{i(s)} &= 1 \\ \frac{e(s)}{i(s)} &= 0 \end{aligned}$$

Dieses Ergebnis besagt, dass die Vorsteuerung 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.

Um den genannten Vorteil zu nutzen, ist es erforderlich, dass das effektive Verhalten des Flugzeugs im Zusammenhang mit dem betreffenden Flugmanöver den Eigenschaften und Fähigkeiten des menschlichen Operators in geeigneter Weise angepasst ist. Dies gilt für folgende als relevant einzustufende Punkte:

- Eingangsgröße für Piloten
- Effektive Flugzeugdynamik
- Charakteristik des Flugmanövers

Die Eingangsgröße betrifft die visuelle Information, die im Tunnel-Display dargestellt wird. Der Pilot sollte in der Lage sein, eine Größe im komplexen visuellen Umfeld wahrzunehmen, die ein einfaches Vorsteuerverhalten ermöglicht. Besonders vorteilhaft ist es, wenn eine kommandierte Eingangsgröße dargestellt werden kann, die ein proportionales Verhalten im Hinblick auf den Ausgang erlaubt.

Die Charakteristik des Flugmanövers bestimmt zusammen mit der effektiven Streckendynamik, welche manuelle Steueraktivitäten erforderlich sind. Ziel hierbei ist es, durch eine geeignete Gestaltung des Flugmanövers einschließlich seines zeitlichen Ablaufs eine Charakteristik zu generieren, die aus der Sicht der manuellen Steuerung möglichst günstig ist.

3. TRANSITIONSMANÖVER

Ein Flugmanöver, bei dem die besprochenen Aspekte der manuellen Steuerung besonders zum Tragen kommen können, ist die Transition vom Geradeaus- zum Kurvenflug und umgekehrt. Kennzeichnend für dieses Flugmanöver sind Änderungen in den Sollwerten entsprechend der Darstellung in Bild 4.

Die Charakteristik des Transitionsmanövers bestimmt zusammen mit der dafür effektiven Flugzeugdynamik die erforderlichen manuellen Steuerbetätigungen. Das Transitionsmanöver wird auch im zeitlichen Ablauf der Darstellung von Soll-Flugbahn und Prädiktor im Tunnel-Display erkennbar. Diese Darstellung kann innerhalb gewisser Grenzen derartig gestaltet werden, dass damit eine antizipatorische Steuerung unterstützt wird. Eine geeignete Gestaltung des Transitionsmanövers im Hinblick auf die relevanten Steuer- und Zustandsgrößen kann als wichtig für eine effektive manuelle Vorsteuerungsmöglichkeit angesehen werden.

Als Kandidat für eine einfache Steueraktivität kommt eine Steuerbetätigung mit konstantem Querruderaus- schlag in Betracht. Hierbei gilt (vgl. Bild 4)

$$(4) \quad \delta_{ai}(t) = \delta_{a0} = \text{const}$$

für die Zeitspanne

$$(5) \quad t_{init} < t < t_{term}$$

wobei die Größen t_{init} und t_{term} den Beginn und das Ende der Steuerbetätigung kennzeichnen. Für die Gesamtlänge des Transitionsmanövers erhält man

$$(6) \quad T_{Trans} = 2T_R + (t_{term} - t_{init})$$

Aus Bild 4 folgt weiter, dass der folgende Zusammenhang mit dem kommandierten Hängewinkel $\Delta\phi_{C,Trans}$ besteht

$$(7) \quad t_{term} - t_{init} = \frac{\Delta\phi_{C,Trans}}{p_0}$$

Damit lässt sich für die Gesamtdauer des Transitionsmanövers schreiben

$$(8) \quad T_{Trans} = 2T_R + \frac{\Delta\phi_{C,Trans}}{p_0}$$

Diese Beziehung setzt die Gesamtdauer des Transitionsmanövers T_{Trans} in Relation zum kommandierten Hängewinkel. Weiter geht aus Gl. (8) hervor, dass T_{Trans} durch die Rollgeschwindigkeit p_0 beeinflusst wird. Dementsprechend kann hierfür ein Wert gewählt werden, der die manuelle Steuerung begünstigt. Außerdem können hier Forderungen hinsichtlich zulässiger Werte berücksichtigt werden, vgl. z.B. [21].

Für die Initiierung und Beendigung der manuellen Steuerbetätigung ist die Eigenschaft des Tunnel-Displays vorteilhaft, eine Vorausschau auf die kommende Flugbahn zu präsentieren. Damit kann der Pilot z.B. den Beginn der Steuerbetätigung antizipieren.

4. FORSCHUNGS-FLUGSIMULATOR

Das beschriebene Tunnel-Display ist Gegenstand einer umfangreichen Erprobung im Flugsimulator. Hierfür wird der Forschungs-Flugsimulator des Lehrstuhl für Flugmechanik und Flugregelung der TU München eingesetzt (Bild 5).

Der Flugsimulator, der ein Cockpit für eine zweiköpfige Besatzung besitzt, 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.

Agrund seiner modernen Ausstattung, insbesondere auch aufgrund des installierten Cockpits mit programmierbaren Displays, ist der Forschungs-Flugsimulator bestens für die Untersuchung des Tunnel-Displays mit Prädiktor geeignet.

5. EXPERIMENTELLE ERGEBNISSE AUS SIMULATIONSVERSUCHEN

Der erste Teil der Simulationsversuche zielte darauf ab, eine Charakteristik für das Transitionsmanöver zu entwickeln, die zu einem einfachen Vorsteuerverhalten beiträgt. Zu diesem Zweck wurden Transitionsmanöver vom Geradeaus- zum Kurvenflug und umgekehrt mit konventioneller Instrumentierung oder bei guter Sicht im Sinne eines Referenzfalles durchgeführt. Ergebnisse hierzu sind in Bild 6 dargestellt, das Zeitverläufe von Steuereingaben des Piloten und relevanten Zustandsgrößen zeigt. Aus diesen Ergebnissen wird deutlich, dass die Rollsteuerung während des Transitionsmanövers aus einem annähernd konstanten Querruderausschlag besteht, dem am Anfang und am Ende jeweils kurze Phasen des Anstiegs und Rückgangs vorangehen bzw. nachfolgen. Der Hängewinkel zeigt während der Transition eine nahezu lineare Zu- bzw. Abnahme.

Die Ergebnisse in Bild 6 lassen eine einfache Steuercharakteristik erkennen. Dies ist auch für das Tunnel-Display nutzbar. Ziel hierbei ist ein entsprechend einfaches Vorsteuerverhalten. Dementsprechend wurde eine solche Charakteristik implementiert mit dem zugehörigen Verlauf der Soll-Flugbahn bzw. mit der diesen Verlauf repräsentierenden Form des Tunnels.

Ergebnisse aus den Simulationsversuchen mit der implementierten Tunnelform sind in Bild 7 dargestellt, hier als gradueller Übergang bezeichnet. Wie aus dieser Darstellung hervorgeht, zeigt sich im Querruderausschlag ein konstantes Niveau mit kurzen Phasen der Änderung am Anfang und Ende. Der Hängewinkel weist eine lineare Charakteristik auf, die sich sowohl beim Transitionsmanöver als Einleitvorgang zum Kurvenflug wie auch im umgekehrten Fall beim Ausleitvorgang aus der Kurve zeigt. Im Ergebnis bedeutet das beschriebene Verhalten, dass die Steueraktivität eine einfache Charakteristik in der Form gradueller Änderungen vom Geradeaus- zum Kurvenflug und umgekehrt aufweist.

Um die dargelegten Aspekte zu verdeutlichen, wurde auch ein Transitionsmanöver betrachtet, bei dem die Änderungen abrupt erfolgen, wie es einem unmittelbaren Übergang vom Geradeaus- in den Kurvenflug entspräche. Grundsätzlich besteht auch hier die Möglichkeit zu einer Vorsteuerung mit Vorausschau, da der Pilot die Soll-Flugbahn antizipatorisch wahrnehmen kann. Die Simulationsversuche zeigen jedoch deutliche Unterschiede gegenüber dem vorherigen Fall mit graduellen Änderungen (Bild 8). Diese Unterschiede äußern sich in größeren Abweichungen, die sowohl die Transitionsmanöver selbst als auch die darauf folgenden Flugphasen betreffen.

6. ZUSAMMENFASSUNG

Der vorliegende Beitrag ist mit Verbesserungen in der Flugbahnführung befasst, die ein Tunnel-Display mit Prädiktor dadurch ermöglicht, dass es dem Piloten die Soll-Flugbahn anzeigt und damit eine Vorausschau auf den künftigen Flugweg vermittelt. Damit wird eine antizipatorische Vorsteuerung möglich. Der Pilot kann die Änderungen der Flugbahn, die ihm in einem 3-dimensionalen Darstellungsformat angezeigt werden, vorausschauend erkennen und somit rechtzeitig die geeigneten Steuerbetätigungen vornehmen. Ein Flugmanöver, bei dem die Möglichkeit zur manuellen Vorsteuerung besonders zum Tragen kommen kann, ist die Transition als Einleitvorgang zum Kurvenflug und entsprechend auch als Ausleitvorgang. Zur Gestaltung des Transitionsmanövers und zur bildlichen Darstellung im Tunnel-Display werden Überlegungen entwickelt, die zu einer wirksamen Unterstützung des Piloten bei der manuellen Steuerung dieses Manövers beitragen. Ergebnisse aus experimentellen Untersuchungen mit einem Flugsimulator werden zur Validierung vorgelegt.

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 17th 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 17th 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 Predictor/Flight-Path Display with Minimum Pilot Compensation. *Journal of Guidance, Control, and Dynamics*, Vol. 23, No. 3, pp. 420-429, 2000.
- [20] 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.
- [21] Federal Aviation Regulation Sec 23.157, Federal Aviation Administration, Washington D.C.

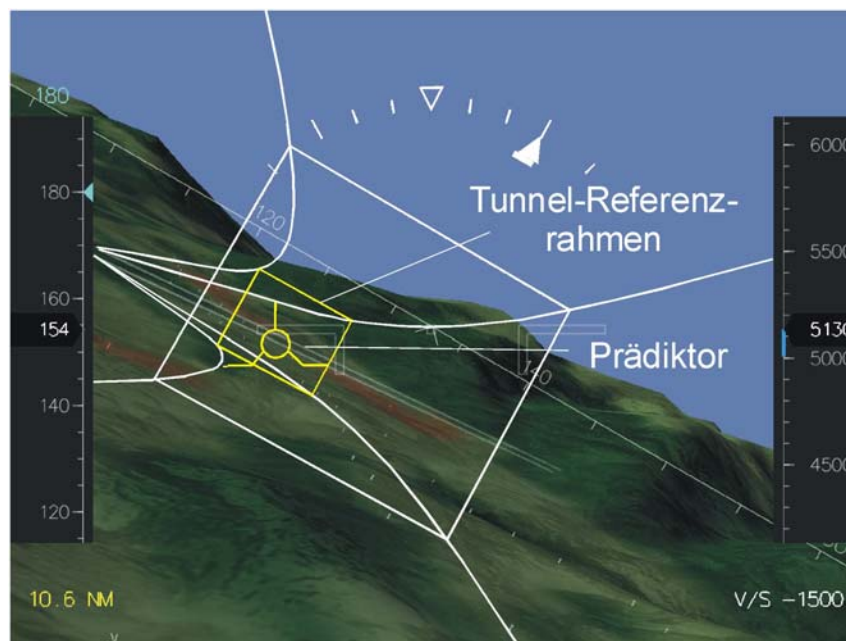
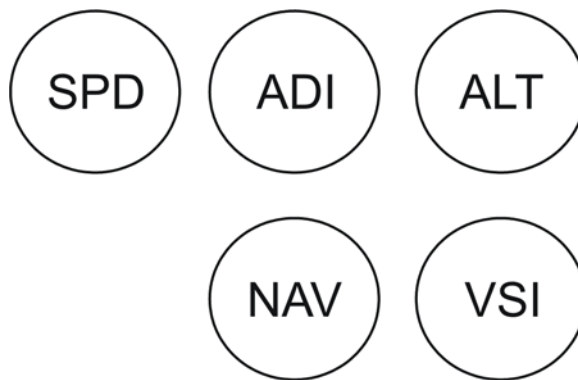


Bild 1 Tunnel-Display mit Prädiktor

Schematische Darstellung



Ausgeführtes Primary Flight Display



Bild 2 Konventionelle Instrumentenanordnung

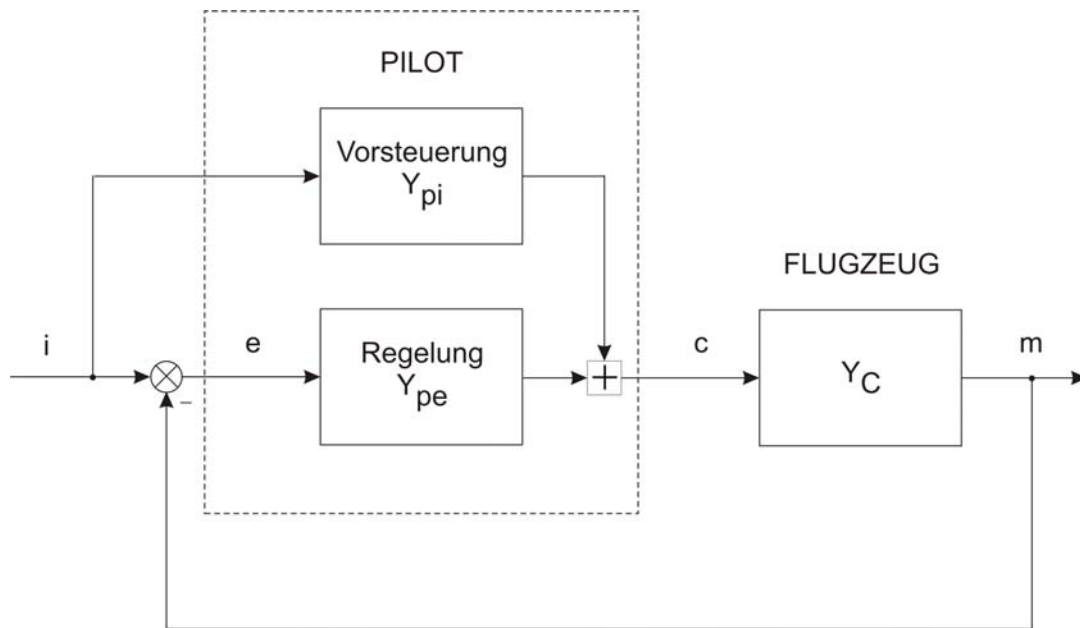


Bild 3 Modell für System Pilot-Flugzeug mit Vorsteuerung

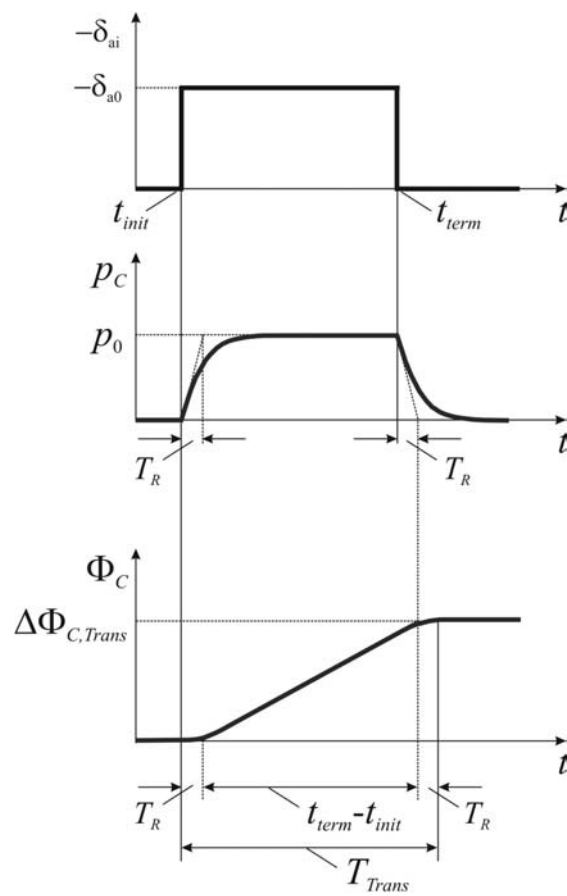


Bild 4 Transitionsmanöver



Bild 5 Forschungs-Flugsimulator

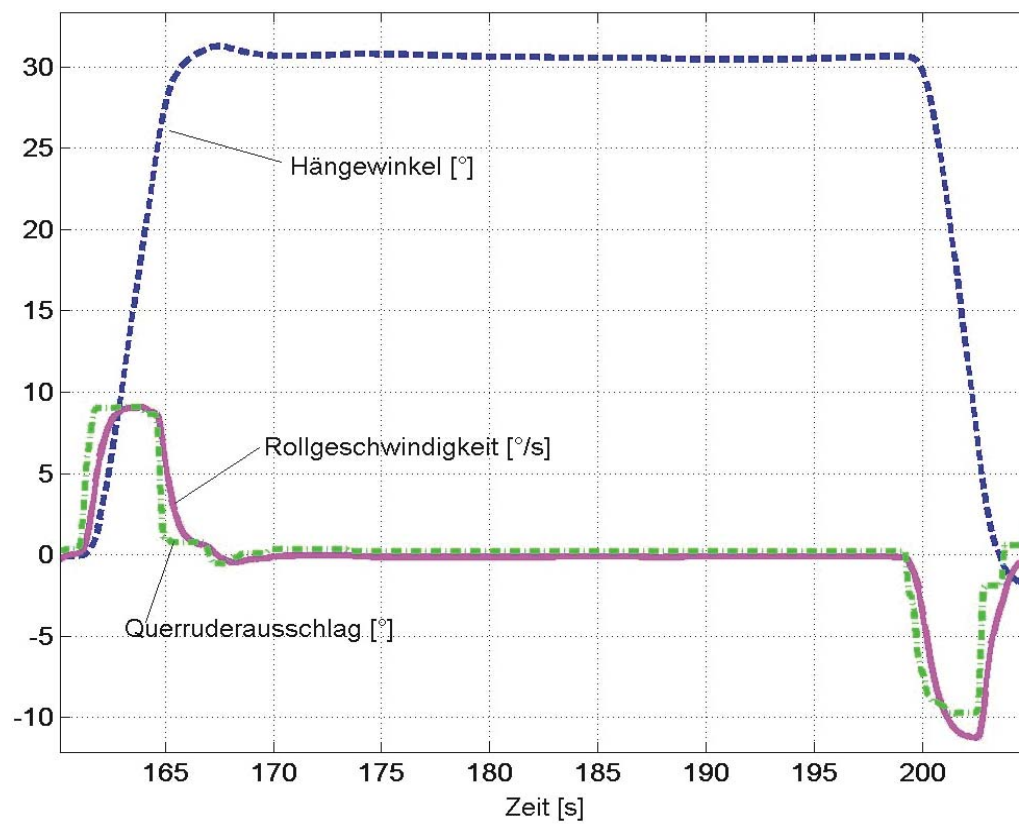


Bild 6 Transitionsmanöver bei konventioneller Instrumentierung

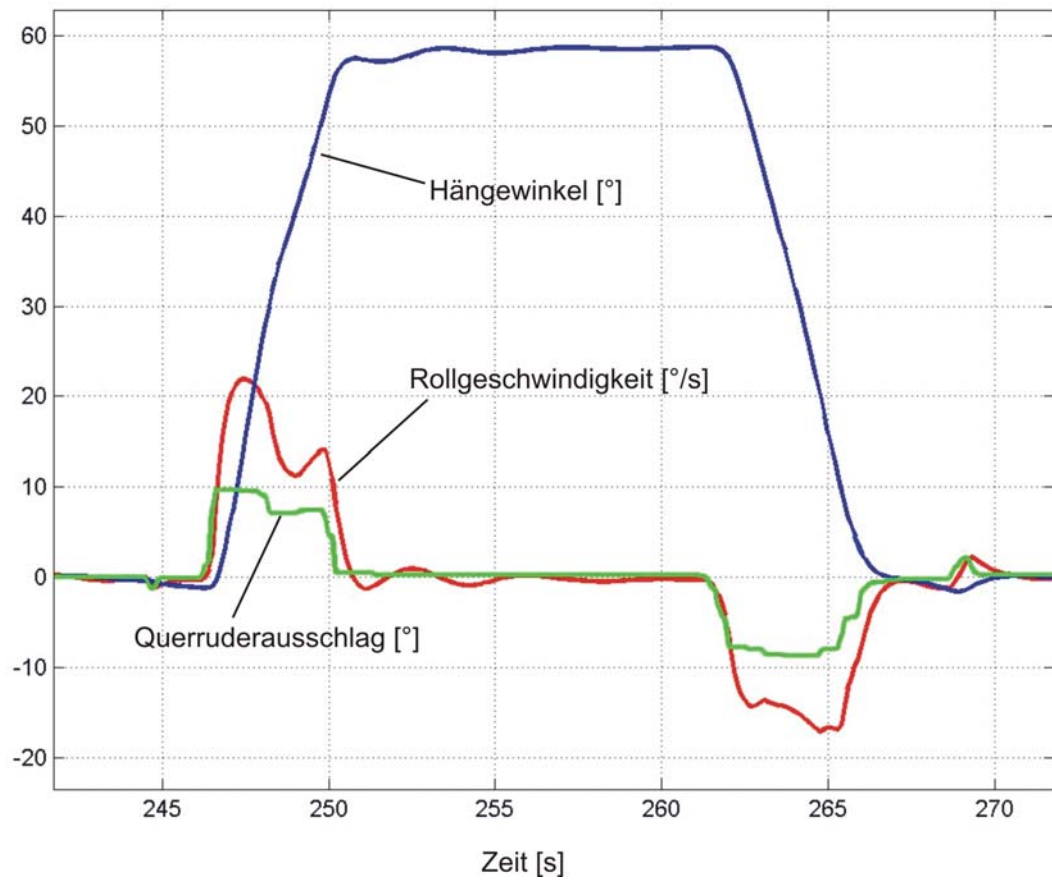


Bild 7 Transitionsmanöver mit Tunnel-Display (gradueller Übergang)

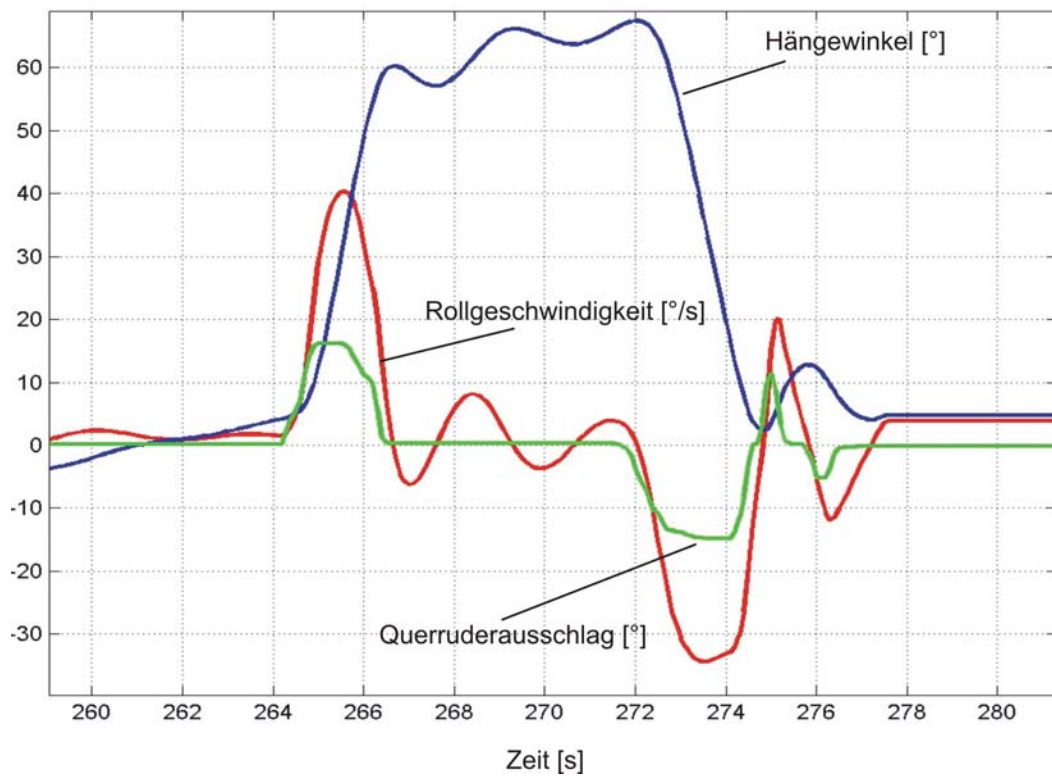


Bild 8 Transitionsmanöver mit Tunnel-Display (abrunder Übergang)