

7.6.1.2 Reversible und irreversible Flugsteuerung

Im Bild 7.6.1 sind die Flugsteuerungssysteme hinsichtlich ihres Prinzips und ihrer technischen Realisierung gezeigt. Zunächst unterscheidet man reversible und irreversible Flugsteuerungssysteme:

- **Reversible Flugsteuerungssysteme** (*reversible flight control systems*) besitzen eine Verbindung, die Kräfte mit einem bestimmten Übersetzungsverhältnis von Steuerorganen zur Steuerfläche und umgekehrt überträgt.
- Als **irreversible Flugsteuerungssysteme** (*irreversible flight control systems, fully powered flight control systems*) werden solche bezeichnet, bei denen eine Kraft an den Steuerorganen eine Kraft an den Steuerflächen verursacht, jedoch eine Kraft an den Steuerflächen keine Kraft an den Steuerorganen.

Reversible Flugsteuerungssysteme können nach der Art der Kraftverstärkung weiter unterteilt werden. In Bild 7.6.1 sind die Methoden nach zunehmendem Kraftverstärkungspotenzial aufgelistet, dies geht einher mit zunehmender Komplexität:

- Ein **Scharniermomentenausgleich** kann z. B. durch einen großen Überhang der Profilvorderkante vor der Scharnierlinie der Stellfläche erreicht werden.
- Eine **aerodynamische Kraftverstärkung** kann mit einer Hilfsklappe oder mit einer Flettner-Klappe erreicht werden.
- Bei einer **hydraulischen Kraftverstärkung** wird die Luftkraft in einem definierten Verhältnis zwischen dem Piloten und einem hydraulischen Aktuator aufgeteilt. Pilot und Aktuator wirken gemeinsam auf das Ruder, greifen aber mit unterschiedlichem Hebelarm an einem Übertragungshebel an.

Die **Kräfte an den Steuerflächen** werden ursächlich bestimmt durch:

- die Rudergröße,
- die geforderten Fluggeschwindigkeiten,
- die geforderten Flugmanöver.

Das Verhältnis von erforderlicher Ruderkraft zu verfügbarer Pilotenkraft definiert den erforderlichen Verstärkungsfaktor und führt damit zur Auswahl bzw. zum Ausschluss bestimmter Prinzipien der Kraftverstärkung reversibler Flugsteuerungen.

Irreversible Flugsteuerungssysteme sind dadurch definiert, dass sie mit **Aktuatoren** ausgestattet sind, welche die Ruderkräfte unabhängig von der Pilotenkraft aufbringen. Es können daher nahezu beliebig große Ruderkräfte beherrscht werden. Aus diesem Grund werden heute große Passagierflugzeuge mit irreversiblen Flugsteuerungen ausgestattet. Da bei diesen Systemen von den Steuerflächen keine Kräfte auf die Steuerorgane zurückwirken, muss ein als „Künstliches Gefühl“ bezeichnetes Gerät die fehlenden Kräfte nachbilden, die der Pilot zum sicheren Führen des Flugzeugs benötigt.

Irreversible Flugsteuerungen können nach der Art der **Übertragung der Steuersignale** gemäß Bild 7.6.1 weiter unterteilt werden: Die **mechanische Signalübertragung** (*Fly-by-Cable*, FBC) wird heute im Rahmen der Einführung von Flugsteuerungsrechnern durch **elektrische Signalübertragung** (*Fly-by-Wire*, FBW) verdrängt. Die **optische Signalübertragung** (*Fly-by-Light*, FBL) hat durch ihre Unempfindlichkeit gegenüber elektromagnetischen Störungen (*electro-magnetic interference*, EMI) vor allem Vorteile im militärischen Bereich.

7.6.1.3 Funktionsprinzip und Energieversorgung

Die Aktuatoren der irreversiblen Flugsteuerungen können unterteilt werden nach:

- ihrem Funktionsprinzip in **Linearantriebe** und **Rotationsantriebe**,
- ihrer **Energieversorgung**. Die an Bord vorhandenen Energiesysteme können Aktuatoren mit hydraulischer, elektrischer oder pneumatischer Energie versorgen. Heute kommt größtenteils noch die hydraulische Energieversorgung der Aktoren zur Anwendung. Beim Einsatz einer elektrischen Energieversorgung der Stell-

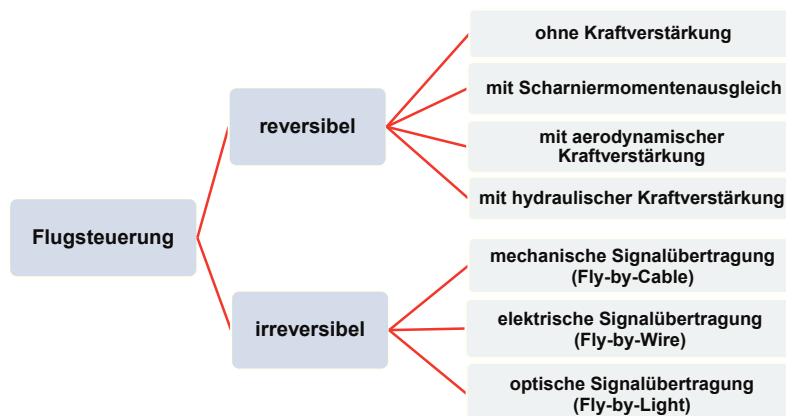


Bild 7.6.1: Einteilung der Flugsteuerung nach technischen Merkmalen.

systeme (*Power-by-Wire*, PBW) ist eine Umschaltung der Versorgung der Stellsysteme auf Energie von anderen redundanten Systemen besonders einfach. Pneumatische Stellsysteme spielen in der Luftfahrt nur noch eine untergeordnete Rolle. Der Antrieb der Vorflügel der **Boeing 747** durch pneumatische Motoren ist ein solches seltenes Beispiel.

7.6.2 Steuern, Trimmen, Stabilität

Zur Veränderung der Lage des Flugzeugs im Raum um die drei Achsen werden die **primären Steuerflächen** verwendet. Bild 7.6.2 zeigt die drei Achsen eines Flugzeugs und die primären Steuerflächen (s. auch Bild 3.2.1).

Aufgaben der Steuerflächen sind:

- das **Steuern** (*control*) des Flugzeug,
- das **Trimmen** (*trim*) des Flugzeugs.

Weiterhin muss das Flugzeug so gebaut sein, dass es auf äußere Störungen (möglichst) so reagiert, dass es von allein den ausgetrimmten Flugzustand wieder einnimmt. Das Flugzeug fliegt dann stabil. **Stabilität** (*stability*) wird durch die gesamte Flugzeugbauart erreicht, also durch die Positionierung der Flügel, die Wahl von V- und Pfeilwinkel sowie die Größe und Bauform der Leitwerke (s. a. Kapitel 2.6).

Ein Flugzeug ist getrimmt, wenn

1. um die jeweilige Achse **Momentengleichgewicht** herrscht (das wird i. d. R. durch Ruderausschläge erreicht),
2. das **Ruder** für diese Achse **kraftfrei** ist, der Pilot also keine Steuerkräfte aufbringen muss und das Steuerorgan somit auch loslassen könnte.

Wie das Ruder kraftfrei gestellt wird, hängt von der Art der Flugsteuerung ab:

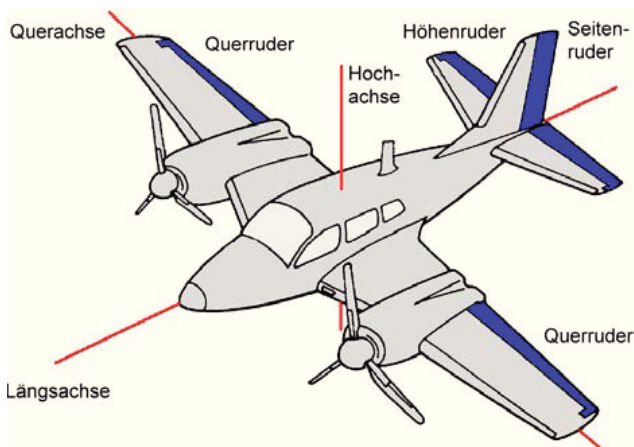


Bild 7.6.2: Die Achsen des Flugzeugs und die primären Steuerflächen (FAA 1993).

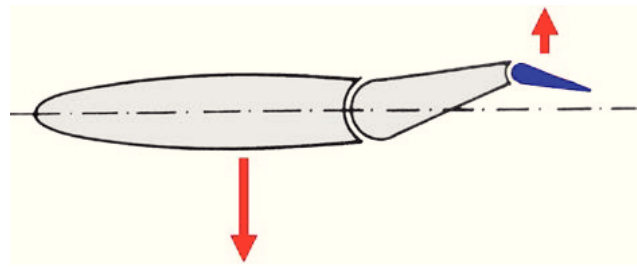


Bild 7.6.3: Ausschlag von Ruder und Trimmklappe (nach [7.6.1]).

Reversible Flugsteuerung

- a) Eine **Trimmklappe** wird (Bild 7.6.3) vom Piloten über das Bedienorgan für die Einstellung der Trimmung verstellt. Wird die Trimmklappe entgegengesetzt zum Winkel des Ruders ausgeschlagen, dann bewirkt das im Bildbeispiel eine kleine Kraft nach oben, die das Ruder gegen die Luftkräfte nach oben ausschlagen lässt, obwohl diese das Ruder eigentlich nach unten zurückdrücken wollen. Das Ruder hat also einen Ausschlagwinkel angenommen, der bewirkt, dass auf die ganze Fläche jetzt eine größere Kraft nach unten wirkt. Eine Pilotenkraft ist für den Ruderausschlag nicht mehr erforderlich. Die Pilotenkraft wird von **aerodynamischen Kräften** übernommen.
- b) Das Ruder wird durch eine **Feder** gehalten. Der Pilot muss gegen die Luftkräfte und gegen die Feder arbeiten. Der Punkt, an dem die Feder strukturseitig befestigt ist, wird vom Piloten über das Bedienorgan für die Einstellung der Trimmung verschoben. Die Pilotenkraft wird von der **Federkraft** übernommen.

Irreversible Flugsteuerung mit künstlichem Gefühl

Die Flugsteuerung ist mit kraftvollen Aktuatoren ausgestattet, die das Ruder in die erforderliche Position drücken. Dazu ist keine Pilotenkraft mehr erforderlich. Der Pilot kann das Flugzeug aber nur fliegen, wenn er Rückmeldungen vom Flugzeug bekommt. Die Sicht nach außen, die Information vom künstlichen Horizont und die Beschleunigungskräfte am Pilotensitz reichen dafür allein nicht aus. Es müssen auch Kräfte am Steuerorgan zu spüren sein, die möglichst denen einer reversiblen Steuerung entsprechen. Diese Kräfte werden durch das **künstliche Gefühl** (*artificial feel unit*) erzeugt. Der Pilot arbeitet im Prinzip nur gegen eine Feder. **Trimmen** bedeutet jetzt lediglich, die vom künstlichen Gefühl bereitgestellte Kraft auf null zu setzen.

Irreversible Flugsteuerung mit FBW und EFCS

Herkömmliche Flugzeuge sind aus Gründen der Fliegbarkeit und Sicherheit so gebaut, dass sie „von allein den ausgetrimmten Flugzustand wieder einnehmen“. Das bedeutet, dass das Flugzeug immer dann, wenn ein anderer Flugzustand eingenommen werden soll, auch neu getrimmt