Das A380 Flight Control System

FLY-BY-WIRE, FLIGHT CONTROL LAWS UND PROTECTIONS

Wenn Piloten über Vorteile und Nachteile der Fly-by-Wire-Steuerung von Airbus-Flugzeugen diskutieren, zeigen sich immer wieder Missverständnisse, wie die Steuerung dieser Flugzeuge eigentlich funktioniert. Am Beispiel des Airbus A380 möchte ich zeigen, wie weit sich die moderne Flugzeugsteuerung bereits entwickelt hat. Was hat es mit den Flight Control Laws und den „Protections" auf sich? Wie funktioniert die Steuerung des A380 im Vergleich zu konventionellen Flugzeugen wie der Boeing 737 oder der B747? Wie fliegt sich der A380 von Hand?

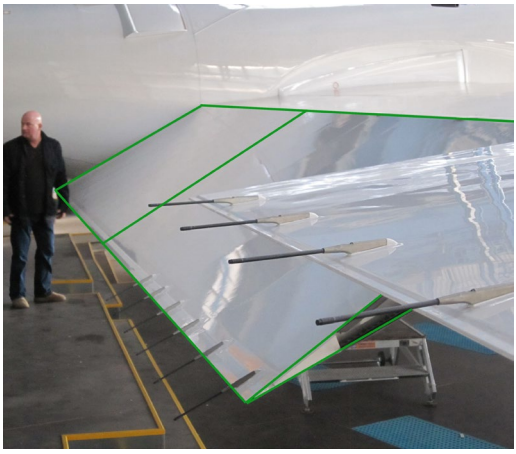
Captains Sidestick im Airbus A380. Der rote Knopf ist der Takeover Button, mit dem sowohl der Autopilot ausgeschaltet werden kann als auch die Inputs des anderen Sidesticks. Foto: Autor

Einführung

Als Airbus in den 1980er-Jahren den A320 entwickelt hatte, war ich noch Copilot auf Boeing 737. In unseren Boeing-Cockpits wurden die neuen Design-Features des neuen Airbus-Flugzeugs heftig diskutiert und kritisiert. Ganz oben auf der Liste der Kritikpunkte standen für uns die nicht überdrückbaren Schutzfunktionen (Protections) des Fly-by-Wire-Systems, die nicht miteinander verbundenen Steuerknüppel (Sidesticks) und die „Fixed Thrustlevers", also die Schubhebel, die sich nicht mit automatischen Schubänderungen bewegten, wie die der Boeing-Flugzeuge.

Heute, 30 Jahre nach Aufnahme des Linienflugverkehrs mit dem A320, muss ich zugeben, dass unsere damalige Kritik größtenteils unberechtigt war. Das Airbus Fly-by-Wire-Konzept hat sich bewährt. Es wurde inzwischen ständig verfeinert und weiterentwickelt. Inzwischen fliege ich seit 18 Jahren auf verschiedenen Airbus Fly-by-Wire-Flugzeugen, davon acht Jahre auf dem Airbus A380. Auf dem damals brandneuen A380 fand ich das beste Fly-by-Wire-Kontrollsystem vor, mit dem ich jemals geflogen bin. Ich finde, die Steuerung des A380 ist in ihrem Aufbau, ihrer enormen Redundanz, den Flight Laws und Protections der ganz anderen Steuerung z. B. der Boeing 747-

400 überlegen. Im Folgenden will ich die Steuerung des A380 beschreiben. In diesem Artikel will ich mich ausschließlich auf das manuelle Fliegen mit dem A380 beschränken.



Grün markiert: Die beiden riesigen rechten Höhenruder des A380, zugänglich von einer Werftplattform aus. Mit den Triebwerken abgeschaltet hängen sie in ihrer unteren Endlage, obwohl sie auch elektrisch bewegt werden können. Die Höhenruder bestehen – wie das gesamte Leitwerk – aus kohlefaserverstärktem Kunststoff. Die Gesamtfläche des A380-Höhenleitwerks entspricht etwa der Flügelfläche eines A320.
Foto: Autor

Die „Ruder" des A380

Zu jeder Vorflugkontrolle gehört es, Steuerflächen und Klappen des Flugzeugs zu kontrollieren. Bei meiner Piper PA28 Arrow ist das noch ganz übersichtlich:

- ein Pendelhöhenleitwerk,
- eine kleine Trimmklappe am Höhenleitwerk,
- zwei Querruder,
- ein Seitenruder,
- zwei Landeklappen.

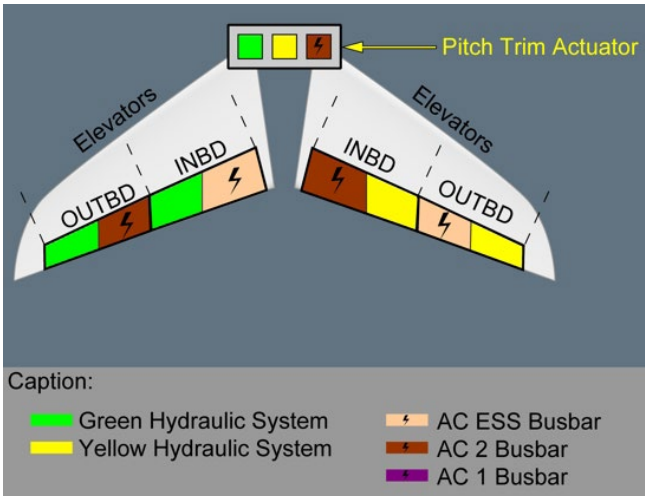
Wie sieht das im Vergleich beim A380 aus?

- Vier Höhenruder,
- ein trimmbares Höhenleitwerk,
- sechs Querruder,
- 16 Spoiler für Speedbrake und Groundspoiler, davon zwölf für die Roll-Kontrolle,
- zwei Seitenruder,
- 16 Vorflügel,
- sechs Landeklappen.

Die rechte Tragfläche des A380 von einer Werftplattform aus gesehen. Man erkennt die drei Landeklappen sowie die acht Spoiler. Zum Größenvergleich im oberen Bildrand das Fahrrad eines Mechanikers. Die Flügelfläche des A380 beträgt 846 m^2.
Foto: Autor

Bei meiner Arrow werden die Ruder über Stahlseile von der Steuersäule und den Pedalen angesteuert. Die Steuerflächen des A380 dagegen werden hydraulisch betätigt. Das verwundert nicht, sind doch dafür riesige Kräfte erforderlich. So könnte z. B. ein Actuator eines Höhenruders maximal 150 Tonnen Luftkraft wegdrücken, bevor er am Ende seiner Kraft ist.
Wie in der Einleitung erwähnt, ist in die Steuerung des A380 eine enorme Redundanz verbaut. Der A340 hat drei Hydraulik-Systeme, die Boeing 747-400 sogar vier.

Wie kann es dann sein, dass der A380 über lediglich zwei Hydrauliksysteme verfügt? Um die enormen Kräfte an den Steuerflächen bereitstellen zu können, aber gleichzeitig das Gewicht des Flugzeugs gering zu halten, wurde für den A380 ein neues Hochdruck-Hydrauliksystem entwickelt. Haben die „normalen“ Hydrauliksysteme von Airbus und Boeing 3.000 PSI Systemdruck (207 bar), so arbeiten die beiden A380-Systeme mit 5.000 PSI (345 bar). Und damit die Redundanz genauso hoch (oder gar höher) ist als bei anderen Flugzeugtypen, werden beim A380 erstmals elektro-hydraulische Actuators an den Steuerflächen verwendet. Jede einzelne Steuerfläche (außer den Spoilern) hat immer zwei Antriebe. So hat z. B. die Höhenleitwerkflosse (Trimmable Horizontal Stabilizer, THS) einen Antrieb verbunden mit dem grünen Hydrauliksystem und einen Antrieb, der am gelben Hydrauliksystem hängt. Jedes der vier Höhenruder hat sowohl einen normalen Hydraulic Actuator als auch einen sog. EHA, einen „electro-hydraulic-actuator“. Ein EHA ist eine kompakte Einheit aus einer elektrischen Hydraulikpumpe, einem integrierten Hydraulik-Reservoir und einem Hydraulic Actuator. Die EHAs der Höhenruder hängen zudem an zwei unterschiedlichen elektrischen Bus-Systemen. Damit ist die Betätigung der Höhensteuerung ebenso wie die der Boeing 747 vierfach redundant ausgelegt.



Mehrfach redundante Ansteuerung von Höhenrudern und Stabilizer. Die Abbildung ist von 2005, der elektrische Pitch Trim Actuator hat sich als überflüssige Redundanz erwiesen und wurde inzwischen ausgebaut.

A380-800 Flight Deck and Systems Briefing for Pilots, 2005

Die Ansteuerung der Steuerflächen: „Fly-by-Wire“

Eine konventionelle Ansteuerung der Hydraulic Actuators und der EHAs über Steuerseile, wie z. B. bei der Boeing 747-400 oder beim Airbus A310, kam beim A380 aufgrund der enormen Größe des Flugzeugs schon allein aus Gewichtsgründen nicht in Frage. Außerdem kann ich mir nicht vorstellen, wie so ein mechanisches System dieselbe Zuverlässigkeit und Redundanz hätte bereitstellen können wie das seit fast 20 Jahren bewährte Fly-by-Wire-System.

„Fliegen über Draht“ bedeutet beim A380 natürlich nicht, dass die Actuators der Ruderflächen direkt „per Draht“ mit den Sidesticks im Cockpit verbunden sind. Zwischen Sidesticks und Actuators sitzen Computer.

Der A380 hat insgesamt sechs Flight-Control-Computer, drei sog. Primary Flight Control Computer (PRIM) und drei Secondary Flight Control Computer (SEC). Natürlich hängen die Computer an unterschiedlichen Stromschienen

(Busses) und sie unterscheiden sich: Die SECs laufen mit einer komplett anderen Software, so dass Softwarefehler in den PRIMs oder den SECs nicht zu einem Totalausfall der Steuerung führen. Außerdem gibt es ein vom elektrischen Bordnetz völlig unabhängiges Backup Control Modul (BCM).
Jeder der beiden Sidesticks ist mit jedem der sechs Flight-Control-Computer verbunden, außerdem mit dem Backup Control Modul. Der Speed Brake Lever ist nur mit den PRIMs verbunden und der Rudder Trim Selector nur mit zwei der SECs. Um das Flugzeug sicher zu steuern, reicht ein einziger dieser insgesamt sieben Computer.

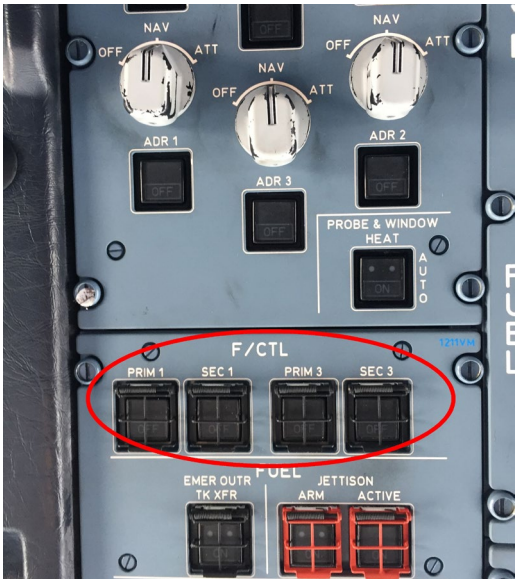
Blick in eines der drei Avionic-Compartments des A380. Unten rechts einer der SEC Flight-Control-Computer. Foto: Autor

Die Flight-Control-Computer haben unterschiedliche Funktionen. Die drei PRIM:

- berechnen das Normal, Alternate und Direct Law,
- steuern sämtliche Steuerflächen,
- berechnen Entlastungsausschläge (load allevation) für g-Loads und Böen,
- enthalten die Funktionen für Autopilot, Flight Director und Auto-Thrust,
- enthalten die Schutzfunktionen (flight envelope protections),
- berechnen die Limit-Geschwindigkeiten für Anzeige, Warnungen und Schutzfunktionen,
- enthalten (eine dritte) Funktion zum Schutz vor Reverser-Betätigung in der Luft.

Die drei SEC:

- berechnen das Direct Law,
- steuern sämtliche Steuerflächen,
- steuern den Rudder Trim.



Vier der sechs gesicherten Schalter für die Flight-Control-Computer. Kein Pilot käme auf die Idee, einen dieser Computer im Flug auszuschalten. Die Schalter sind nur für Computer-Resets gedacht. Für das Backup-Control-Modul BCM gibt es keine Schaltmöglichkeit im Cockpit. Wie bei konventionellen Flugzeugen ist es auch im A380 nicht möglich, die Steuerung vom Cockpit aus abzuschalten. Foto: Autor

Damit es an den Steuerflächen kein Gedrängel gibt, wer denn nun die Kontrolle hat, ist für jede einzelne Steuerfläche genau festgelegt, welcher Computer zuständig ist und in welcher Reihenfolge die anderen Computer beim Ausfall die Kontrolle übernehmen. Außerdem steuert immer nur einer der beiden Actuators. Fällt ein Actuator oder das zugehörige Hydrauliksystem aus, übernimmt sofort der andere Actuator. Auch der steuernde Computer wird dann sofort umgeschaltet.
Immer nur ein PRIM ist der sog. Master, der den anderen Computern mitteilt, wie gesteuert werden soll. Bei Fehlern wird er abgeschaltet und gibt den Job an einen anderen Computer ab.

Wir steuern den A380 im „Normal Law“

Anders als im Simulator, wo immer was kaputt geht, steuern wir im täglichen Flugbetrieb den A380 in einem Kontroll-Modus, der „Normal Law“ genannt wird. Die Flight Control Laws kann man sich als eine Art Regel-Sets vorstellen. Sie geben vor, wie die Flight-Control-Computer die Steuerflächen bewegen, um zu einem bestimmten Steuerausschlag am Sidestick eine bestimmte Reaktion des Flugzeugs zu erzeugen. Das Normal Law gibt der Steuerung je nach Flugphase andere Eigenschaften. Man unterscheidet z. B. für die Pitch-Kontrolle drei Flugphasen:

- am Boden (Rotation Law),
- im Flug (5 Sekunden nach dem Abheben: Flight Law),
- beim Abfangen zur Landung und während des Absenkens des Bugrads: (unter 100 Fuß: Flare + Derotation Law).

Auch die laterale Kontrolle ändert sich je nach Flugphase. Schauen wir uns nun die Flugphasen etwas genauer an:

Am Boden – vor dem Abheben – Pitch Control: Bis kurz nach dem Abheben sind die Elevators mehr oder weniger in „Direct Law“, mit einigen Dämpfungen durch die PRIMs. Die Höhenruder-Ausschläge folgen direkt dem Sidestick. So lässt sich der A380 wie ein konventionelles Flugzeug zum Start rotieren und abheben. Wenige Sekunden nach dem Abheben wechseln dann die Elevators in das weiter unten beschriebene Flight Law. Trotz der manuellen Kontrolle des Starts fühlt sich jede Takeoff-Rotation gleich an: Anders als andere Flugzeugen liegt der Schwerpunkt des A380 beim Start immer an derselben Position. Das wird durch die Treibstoffverteilung erreicht. Nachdem die Schwerpunktlage des „Zero Fuel Weights“ bekannt ist, wird entsprechend viel Treibstoff in den Trimtank im Höhenleitwerk gepumpt. Normalerweise sind das ca. 12 Tonnen.

Am Boden – vor dem Abheben – Roll Control: Auch die Querruder und Spoiler sind am Boden im Direct Law, d. h., sie folgen exakt den Sidestick-Ausschlägen. Nur so ist z. B. überhaupt ein Flight Control Check vor dem Flug möglich. Es gibt aber am Boden eine Besonderheit, die den Start bei Seitenwind und/oder Turbulenz sehr vereinfacht: Lässt man den Sidestick beim Start in der Mittelposition („stick free“), dann kommandiert der Sidestick „Wings Level“. Ohne den Finger und den Sidestick krumm zu machen, hält also der A380 im Startlauf (wie auch im Rollout nach der Landung) die Flügel gerade. Egal also, wie böig der Wind weht und wie stark der Seitenwind ist:

Beim A380 macht man beim Start keinerlei Querruderausschlag am Sidestick. Auch nicht bei maximaler Seitenwindkomponente (35 Knoten). Kann man sich schnell dran gewöhnen und funktioniert zuverlässig. Ein „Knüppel in den Wind halten“ würde beim A380 zwar auch funktionieren, hat aber nur Nachteile: Zum einen würden dann auf der Windseite die Spoiler rausfahren. Damit würde dort der Widerstand erhöht und das Drehmoment des Seitenleitwerks in den Wind noch verstärkt. Zum anderen aber würde mit einem solchen Griff zum Sidestick eine besondere Funktion abgeschaltet, die u. U. bei starkem Seitenwind, ganz sicher aber bei Triebwerksausfall nach V1, beim Steuern hilft. Auch wenn der A380 mit Computerhilfe gesteuert wird, ist er doch aerodynamisch ein ganz normales Flugzeug, wie jedes andere auch. Auch mit dem A380 kann man auf der Bahn die Richtungskontrolle verlieren. Sei es durch rutschige Bahn, Seitenwind oder Triebwerksausfall. Die PRIMs merken quasi, wenn die Piloten Hilfe brauchen: Sie „beobachten“ die Seitenruderpedale.
Erreicht deren Ausschlag einen bestimmten hohen Wert, helfen die Querruder beim Richtung-Halten. Fällt z. B. bei V1 das Triebwerk 1 aus, benötigt man einen kräftigen Tritt ins rechte Seitenruderpedal. Die Computer erkennen das und helfen mit den drei rechten Querrudern: Die schlagen dann gegenläufig bis in den Endausschlag aus: das innere und das äußere nach oben, das mittlere ganz nach unten. Außerdem fährt noch ein Spoiler auf derselben Seite aus: Dadurch wird der Widerstand auf der rechten Seite erhöht und verstärkt das Drehmoment des Seitenruders. Sehr praktisch. Dennoch ist bei Triebwerksausfall im Simulator oft ein Tritt ins Ruder bis zum Endausschlag erforderlich. Ich möchte nicht wissen, wie sie sich das Flugzeug ohne dieses Feature verhalten würde, das man durch Fehlbedienung des Sidesticks „abschalten“ kann.

Am Boden – vor dem Abheben – Yaw Control: Das Seitenruder folgt am Boden den Ruderpedalen wie bei einem konventionellen Flugzeug.

Wenige Sekunden nach dem Abheben wechselt im Normal Law die Steuerung ins Flight Law. In diesem Modus gibt es keinerlei Zusammenhang mehr zwischen dem Ausschlag des Sidesticks und der Ruderpedale und den jeweiligen Ruderpositionen. Es kann sogar sein (z. B. bei Aktivierung der Overspeed Protection), dass bei voll nach vorne gedrückten Sidestick das Höhenruder nach oben ausschlägt.
Auf den ersten Blick – z. B., wenn man das erste Mal den A380 Simulator fliegt – sieht es so aus, als verhalte sich das Flugzeug auf Steuerausschläge wie ein konventionelles Flugzeug, z. B. wie eine 747-400. Das ist natürlich so gewollt: „Durch Ziehen gewinnt man Höhe.“ Fluglageänderungen werden exakt durch dieselben Steuerausschläge eingeleitet, wie bei einem Flugzeug mit mechanischer Steuerung.
Die Funktion der Sidesticks und der Ruderpedale im Flug ist aber eine ganz andere. Betrachten wir das Normal Law im Flug also mal getrennt nach den Steuerachsen:

Pitch Control – Normal Law:
Mit dem Sidestick kommandiert man keine Ruderausschläge, sondern g-Loads. Anders als gelegentlich behauptet, hält ein Fly-by-Wire-Airbus nicht die Pitch bei, wenn man den Sidestick loslässt. Das Normal Law be-

inhaltet keinerlei Autopilot-Funktionen. Mit „stick free“ kommandiert man eine g-Load von 1 g. Und zwar ist damit nicht die g-Load gemeint, die der Pilot spürt, sondern nur die Vertikal-Komponente. Ohne äußere Störung würde tatsächlich die augenblickliche Fluglage beibehalten. Aber wo gibt es das im normalen Leben noch: keinerlei Störung? Die Fluglage ändert sich sofort, wenn sich mit „stick free“ die g-Load ändert:

- Fährt man die Klappen aus, erhöht sich die g-Load durch den höheren Auftrieb. Das Flugzeug nimmt sofort die Nase runter, um die g-Load wieder auf 1 g zu bringen.
- Steigt die Geschwindigkeit, geht ebenfalls „von alleine“ die Nase runter: Höhere Geschwindigkeit ergibt höheren Auftrieb und damit höhere g-Load. Umgekehrt verhält sich das Flugzeug bei Geschwindigkeitsabnahme.

Nicht einmal der Flugweg bleibt konstant mit „stick free“:

- Fliegt man im Level-Flight durch ein Abwindfeld, beginnt der A380 wie jedes Flugzeug sofort zu sinken, der Flugweg zeigt nun nach unten. Dadurch verringert sich die vertikale g-Load: Das Flugzeug nimmt die Nase hoch, um die g-Load wieder auf 1 g zu bringen. Aber der A380 geht nicht von alleine wieder in den Horizontalflug. Denn dafür müsste ja die g-Load kurz auf über 1 g erhöht werden. Dazu hat aber das Normal Law „keinen Auftrag“ vom Sidestick.

Weil also der Flugweg mit „stick free“ nicht konstant bleibt, ist nach wie vor (Gott sei Dank) ein Pilot erforderlich, um mit dem Sidestick das Flugzeug zu steuern. Für den normalen Flugbetrieb reichen recht kleine Steuerausschläge aus, um den bis zu 560 Tonnen schweren A380 zu steuern. Ein Vollausschlag nach hinten ist nur in Notfällen erforderlich, z. B. bei einer „Pull up!“-Warnung des Bodenannäherungs-Warnsystems oder u. U. bei einer Windshear. In diesem Fällen werden die g-Load und der Anstellwinkel automatisch von den Protections begrenzt. Dazu später mehr.
Wenn es also in Turbulenz mal wackelt, braucht man beim A380 im Manual Flight nicht dauernd am Sidestick zu zerren. Es reichen kleine Korrekturausschläge, um den Flugweg in Schach zu halten.

Trimmen? Trimmen muss (und kann) man den A380 im Normal Law nicht. Der Trim folgt automatisch dem Höhenruderausschlag. Lässt man alles los und erfolgt keine Störung, hält der A380 den Flugweg bei und trimmt dabei das Höhenleitwerk so lange, bis die Höhenruder neutral stehen. Es gibt daher auch keinen Trim-Switch am Sidestick. Ganz hinten am Center-Pedestal, neben dem Rudder Trim Switch, ist der Pitch Trim Switch. Der ist aber nur am Boden und im Direct Law aktiv, ansonsten ist der Schalter mausetot.
Mit dem Sidestick fliegt sich der A380 also fast wie ein „normales“ Flugzeug, das immer ausgetrimmt ist. Aber dennoch ist vieles anders. Drückt man z. B. im stabilisierten Steigflug mit meiner Piper Arrow die Nase um 5° nach unten und lässt dann die Steuerung los, passiert Folgendes: Die Steigrate verringert sich, die Geschwindigkeit erhöht sich. Durch die höhere Geschwindigkeit erhöht sich der Auftrieb, daher nimmt das Flugzeug wieder die Nase hoch. Nach kurzer Zeit hat durch die Eigenstabilität die Arrow ihre vorhe-

Im „Kohlenkeller“ des A380. Der A380 ist ein elektrisches Flugzeug. Die Ruder werden nicht nur über elektrische Signale angesteuert, sondern auch über elektro-hydraulische Actuators bewegt. Sogar die Vorflügel können elektrisch gefahren werden. Bremsen geht notfalls auch nur mit Strom. Foto: Autor

rige Fluglage, Geschwindigkeit und Steigrate wieder eingenommen.

Macht man dasselbe im A380 – also die Nase im Steigflug um 5° nach unten nehmen –, passiert dagegen Folgendes: Der Flugweg wird flacher, der höhere Auftrieb wird „weggedrückt“, um die g-Load bei 1 g zu halten. Die Elevators werden auf neutral getrimmt. Infolgedessen erhöht sich die Geschwindigkeit und kehrt nicht auf die vorherige „Trimmgeschwindigkeit“ zurück. Zwar kontrolliert man mit dem Sidestick die g-Load, für den Piloten sieht es aber unterm Strich so aus, als würde er den Flugweg direkt kontrollieren (eine unmittelbare Folge der g-Load-Steuerung). Fliegt man den A380 eine Weile, ist man sich dieser Feinheiten kaum noch bewusst. Außer, dass man nicht trimmen muss, fliegt sich das Flugzeug ganz „natürlich“. Die Steuerung ist wesentlich einfacher als bei B737, B747 oder A310, denn man braucht sich nur auf den Flugweg (Flight Path) zu konzentrieren, der Flieger macht den Rest (Flugweg stabilisieren – dämpfen – und austrimmen).

Roll Control – Normal Law:

Auch im Querruder verhält sich der A380 anders als konventionell gesteuerte Flugzeuge. Im Normal Law kommandiert man mit dem Sidestick nicht einen Querruderausschlag, sondern die Rollrate. Dadurch zeigt der A380 (wie in der Pitch-Kontrolle) bei allen Geschwindigkeiten und Gewichten ein identisches Flugverhalten. Kleiner Ausschlag: kleine Rollrate, großer Ausschlag: große Rollrate. Anders als manchmal beschrieben, leitet der A380 nicht von alleine eine Kurve aus. Das muss schon der Pilot machen. Und zwar muss man schon vor Erreichen der Horizontalfluglage den Sidestick-Ausschlag rausnehmen. Denn lässt man den Sidestick los, stoppt die Rollbewegung nicht sofort, sondern geht in Ruhe auf die nun kommandierten 0°/s zurück. Hält man den Sidestick bis zum Erreichen von Wings-Level ausgeschlagen und lässt erst dann los, überschießt man die Horizontalfluglage. Manche Piloten, die neu auf Fly-by-Wire-Flugzeugen sind – mich selbst eingeschlossen – überschießen am Anfang die gewünschte Querlage und übersteuern, bis sie sich an das andere Verhalten der Steuerung gewöhnt haben. Danach merkt man das nicht mehr.

Wie verhält sich der A380 in Turbulenz um die Längsachse mit einem Sidestick-Command, das eine kleine oder keine Rollrate kommandiert? Hebt eine Bö eine Tragfläche an, wehrt sich der Computer gegen die erzwungene zusätzliche Rollrate und versucht, die Rollrate zurückzuführen. Allerdings führt der Computer die Querlage nicht in die Ausgangslage zurück. Dafür hat Airbus die Pilotensitze und die Sidesticks eingebaut. Für

irgendwas muss man die Piloten im A380 ja gebrauchen können.

Es gibt immer was zu verbessern: Prototyp eines Spoiler-Actuators für den A380. Erstmals wurde dieses Bauteil im 3D-Druck aus Titanpulver gefertigt. Das erhöht die Zuverlässigkeit (weniger bewegliche Teile) und verringert das Gewicht. Ein im selben Verfahren hergestellter Ventilblock (35 % leichter als bisher) wurde 2017 im A380 getestet. [Liebherr-Aerospace]

Das Normal Law ist in schwerer Turbulenz sehr praktisch. Es ist nicht erforderlich, ständig gegen die Böen anzusteuern. Die Flight Laws dämpfen die Rollbewegungen. Genauso wie man in der Pitch lediglich ab und zu mal den Flight Path korrigieren muss, korrigiert man in Roll lediglich die Querlage, wenn sie zu sehr „aus dem Ruder läuft".

Auch in der Quersteuerung gibt es einige weitere Besonderheiten. So steuert man – anders als bei konventionellen Flugzeugen – mit der Querlage auch indirekt die g-Load. Bis zu 33° Querlage hält nämlich das Normal Law in Pitch die Vertikal-Komponente der g-Load auf 1 g. Das bedeutet zwangsläufig eine Erhöhung der Gesamt-g-Load bei Erhöhung der Querlage, ohne dass dazu ein Ziehen am Steuerknüppel erforderlich wäre. Kurvenfliegen wird so zu einer einfachen Sache. Einfach den Sidestick zur Seite drücken. Ziehen oder Trimmen ist nicht erforderlich. Über 33° Querlage wird dieses „Feature" abgeschaltet, ebenso der automatische Trim. Wer außerhalb des normalen Fluglagebereichs (max. 30° Querlage) arbeitet, soll gefälligst selber ziehen, um in der Kurve die Höhe zu halten. Zwischen 33° und 67° Querlage steuern die Computer mit „stick free" nicht mehr die Rollrate auf null, sondern schalten um auf „positive stability": Sie führen die Querlage auf 33° zurück. 33° wurden übrigens als Grenze für diese Änderung des Normal Laws festgelegt, damit bei Erreichen des im normalen Flugbetrieb vorgesehenen Limits von 30° Querlage sich nicht jedes Mal die Flight Laws ändern, sondern erst etwas darüber.
Mehr als 67° Querlage lässt sich im Normal Law mit den Sidesticks nicht kommandieren. Wenn man den Sidestick z. B. in den linken Endausschlag knallt und dort festhält, rollt das Flugzeug auf 67° und dann ist Schluss. Grund hierfür sind die Flight Envelope Protections in den PRIMs. Bei 67° Querlage braucht man 2,5g, um die Höhe zu halten, das g-Load-Limit für den A380. Bei größerer Querlage würde man die Kontrolle über die Pitch verlieren, weil man die Nase nicht mehr oben halten kann. Mehr zu den Schutzfunktionen später.

Yaw Control – Normal Law:
Die Seitenruder des A380 werden (anders als beim A320, A340 und A330) ebenfalls von den Flight-Control-Computern gesteuert. Bei den Vorgängermodellen des A380 hatten die Computer lediglich Schutzfunktionen, indem sie den zulässigen Maximalausschlag der Ruder festlegten. Die Seitenruder selbst wurden direkt entsprechend den Ruderpedalbewegungen ausgeschlagen. Beim A380 dagegen hat der Pilot im Flug keinerlei Kontrolle über die Seitenruder-

Position mehr. Die Ruderpedale kommandieren stattdessen direkt den „side-slip-angle“, also den Schiebewinkel. Den Rest machen die Computer. Das ist genial und vereinfacht das Fliegen bei Triebwerksausfall enorm. Außerdem fliegt der A380 so alle Kurven 100 % koordiniert, denn ohne Tritt in die Pedale wird der Schiebewinkel eisern auf null gehalten. Kein Vergleich zum A340, der in scharfen Kurven ein negatives Wendemoment zeigt wie ein 1956er Ka7 Segelflugzeug. Möglich wurde dieses neue Steuerverhalten durch die drei neuen Side-Slip Probes, die vollredundant den Schiebewinkel direkt messen. Die Side-Slip Probes sind vorne auf der Nase befestigt, man kann sie aus dem Cockpit heraus sehen. Man kann im Langsamflug mit den Ruderpedalen maximal 15° Sideslip Angle kommandieren, bei maximaler Speed (VMO) sind es nur 2°. Wir benutzen die Seitenruderpedale im Flug aber nur, um einen Triebwerksausfall zu kompensieren und um bei Seitenwindlandungen im Flare das Flugzeug auf die Landebahn auszurichten (Anflug immer mit Vorhaltewinkel).

Flare + Derotation Law

Im Anflug arbeitet das Flight Law bis 100 Fuß Radarhöhe, dann wird in das Flare + Derotation Law gewechselt, das mit seiner Speed Stability dem Verhalten eines konventionellen Flugzeugs entspricht. Der A380 landet sich dann in etwa so wie eine B747 mit einer Ausnahme: im Flare + Derotation Law ist die automatische Trimmung abgeschaltet (und die manuelle Trimmung nicht möglich). Mehr noch als in konventionellen Flugzeugen ist es daher auf dem A380 wichtig, stabilisiert anzufliegen. Das Flare + Derotation Law ist nahezu ein Direct Law, manuelle Höhenruderausschläge bis zum Endausschlag sind möglich.

Die drei A380 Sideslip-Probes in den roten Markierungen auf der Nase. Die beiden schwarzen Pins oben an den Cockpitscheiben haben damit nichts zu tun. Diese Pins sind beleuchtet und ermöglichen den Piloten visuell das Erkennen von Eisansatz. Foto: Autor

Der Stabilizer

Das verstellbare Höhenleitwerk (Stabilizer) des A380 hat riesige Ausmaße, es hat in etwa dieselbe Fläche wie die Tragflächen eines A320. Zur Trimmung des Flugzeugs kann es von zwei hydraulischen Powerunits verstellt werden. Am Boden wird der Stabilizer, sowie das erste Triebwerk läuft und Hydraulik zur Verfügung steht, automatisch in die richtige Position für den Start gefahren. Der Wert für diese Einstellung wird während der Flugvorbereitung nach dem Ladeplan ins FMS eingegeben. Am Boden wäre auch eine manuelle Einstellung des Stabilizers möglich, das wird aber nicht genutzt.

Nach dem Abheben übernehmen die Flight-Control-Computer im Normal Law (Flight Law) die Kontrolle über den Stabilizer, eine manuelle Betätigung ist im Flug nicht möglich.

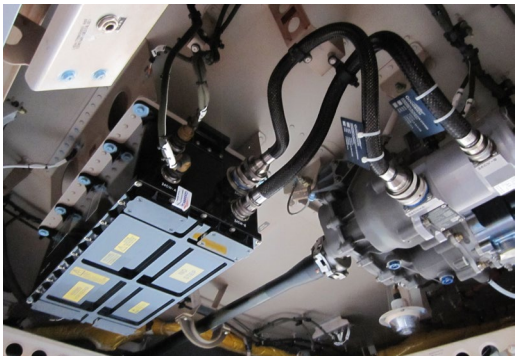
Nach der Landung fährt der Stabilizer, sowie die Geschwindigkeit unter 30 Knoten ist, in die Null-Position, wo er bis zum nächsten Triebwerksanlassen verbleibt.

Warum wurde eigentlich – einige Jahre nach Inbetriebnahme des Flugzeugs – der dritte elektrische Antrieb des Stabilizers wieder ausgebaut? Das ist recht einfach zu erklären. Der Stabilizer muss ja überhaupt nur in einem so großen Bereich verstellbar sein, damit er die enormen Momente kompensieren kann, die beim Fahren der Landeklappen entstehen. Und wann fällt der Stabilizer aus? Wenn beide Hydraulik-Systeme ausfallen. Wenn das aber passiert, können auch die Klappen nicht mehr fahren. Fällt also die komplette Hydraulik im Endanflug (mit Klappen ausgefahren) aus, ist der Stabilizer bereits in der richtigen Position. Fällt die Hydraulik im Reiseflug aus, können die Landeklappen nicht mehr ausgefahren werden und es entsteht keine so große Trimmänderung wie normal. Die enormen Steuerkräfte der Höhenruder reichen dann aus, die Trimmänderungen für den Anflug zu kompensieren (mit ausgefahrenen Vorflügeln – die fahren dann elektrisch). Der Anflug muss in diesem Fall auch nicht mit ständig gezogenem Stick geflogen werden wie beim „Jammed Stabilizer“ eines konventionellen Flugzeugs. Durch das weiter unten beschriebene Alternate Law, das bei diesem Fehler aktiv ist, wird das alles „im Hintergrund“ weggesteuert und der Pilot kann den eigentlich vertrimmten Flieger mit kleinen Ausschlägen wie immer manuell fliegen und landen.

Flaps and Slats – Secondary Flight Controls

Zum Start und zur Landung macht es im Verkehrsflugzeug immer einen guten Eindruck, wenn man Vorflügel und Klappen ausfährt. Im A380 wird das ebenfalls über Fly-by-Wire gesteuert. Die Piloten bewegen im Cockpit den Klappenhebel, den Rest erledigen die beiden Slat/Flap Control Computer (SFCC). Eine Vorgabe für die Entwicklung des A380 Flight Control Systems war das „No Clean Wing Landing design objective“. Daher ist das Klappensystem voll redundant ausgelegt, damit sich „irgendwas“ immer zur Landung ausfahren lässt. Das fängt mit dem Klappenhebel im Cockpit an sowie mit den Sensoren in diesem System: Alles ist vollredundant ausgelegt. Ein einzelner Kabel- oder Sensorfehler kann nicht zum Ausfall des Klappensystems führen.
Es gibt zwei Steuercomputer (SFCC) die sicherheitshalber sogar in zwei unterschiedlichen Avionic-Compartments untergebracht sind. Einer im Upper Avionics Compartment über/hinter dem Cockpit, der andere im Lower Avionics Compartment unter dem Cockpitbereich. Jeder dieser SFCC kann sowohl die Vorflügel als auch die Klappen steuern.
Vorflügel und Klappen sind völlig voneinander getrennt. Blockiert ein System, kann das andere dennoch normal ausgefahren werden. Jedes System hat zwei separate Antriebe. Die Landeklappen können von jedem der beiden Hydrauliksysteme gefahren werden. Die Vorflügel haben einen hydraulischen Antrieb und einen elektrischen. Damit ist sichergestellt, dass die Vorflügel auch bei einem totalen Ausfall beider Hydrauliksysteme ausgefahren werden können.

Eine wichtige Sicherheitskomponente im Klappensystem des A380 sind die sog. Wingtip-Brakes, das sind automatische Bremsen in den Tragflächenspitzen, die bei asymmetrischen Fahren von Klappen oder Vorflügel zuschnappen und die entsprechenden Antriebswellen blockieren. Diese



Der Antrieb der Vorflügel im Flügelmittelstück. Rechts grau mit den beiden dicken Kabeln der elektrische Antrieb. Dahinter (teilweise blau) der Hydraulikmotor. Die schwarze Box links ist die Leistungselektronik für den elektrischen Antrieb. Alle Antriebswellen im Klappensystem sind aus karbonfaserverstärktem Kunststoff. Foto: Autor

Schutzfunktion – einmal aktiviert – kann nur am Boden wieder gelöst werden. Für die Piloten könnte diese Schutzfunktion im Extremfall auch mal nach hinten losgehen: Werden z. B. bei stürmischem und turbulentem Wetter im Anflug durch die Turbulenz die Wingtip-Brakes aktiviert, sind die Landeklappen in ihrer aktuellen Position blockiert. Ein Flug zum Ausweichflughafen ist dann u. U. nicht mehr möglich (hoher Widerstand und Spritverbrauch).

Schubkontrolle

Auch die Triebwerke werden über Fly-by-Wire angesteuert. Die Schubhebel im Cockpit sind nicht direkt mit den Triebwerken verbunden. Lediglich die Position der Schubhebel wird an die Motorelektronik (FADEC) und die PRIMs (für Autothrust) weitergereicht. Die Schubregelung auf dem A380 ist ein komplexes Thema, das ich hier nicht weiter ausführen möchte. Weiter unten will ich die Schubregelung nur dann erwähnen, wenn sie an den Schutzfunktionen (Flight Control Protections) beteiligt ist.

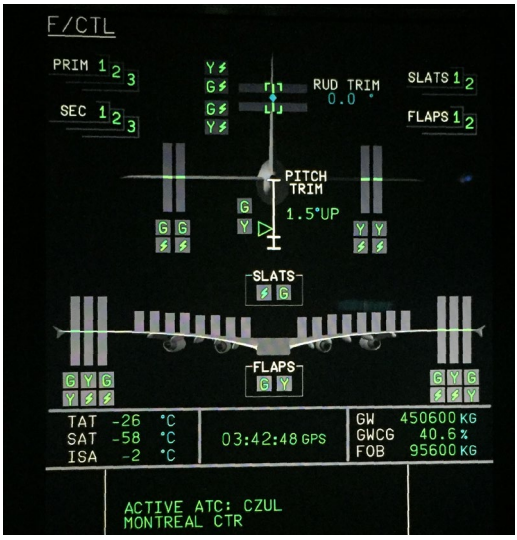
Bei Boeing-Flugzeugen bewegen sich die Schubhebel mit Autothrust-Schubänderung automatisch hin und her. Ganz anders bei Airbus: Mit Autothrust ON werden beim A380 die Schubhebel in die CL (climb) Raste geschoben und bleiben dort stehen („fixed Thrustlevers“), egal, wie der Schub tatsächlich ist.

Im manuellen Flug – mit Autothrust ausgeschaltet – regelt der Pilot mit den Thrustlevern den Schub wieder wie in einem herkömmlichen Flugzeug. Die Hebel sind etwas schwergängig, aber daran gewöhnt man sich schnell.

Schubhebel des A380 in der Raste CL („climb“), der normalen Stellung im Flug mit Autothrust. Der aktuelle Schub entspricht dann nicht der Schubhebelposition, sondern den Kommandos der PRIMs. Lediglich der Maximalschub ist durch die Hebel in der Raste auf CL limitiert. Vor der CL-Raste gibt es noch die Rasten (detends) FLEX/MCT für reduzierten Startschub oder Maximum Continuous Thrust sowie die Raste TOGA (Takeoff/Go-Around) für maximalen manuellen Schub. Foto: Autor

Wunderwelt Normal Law – Was machen die Querruder, wenn die Piloten nicht hingucken?

Bisher hatte ich nur die Steuerung der Rollrate im Normal Law erwähnt. Damit sind die Querruder im A380 aber bei Weitem nicht ausgelastet. Sie entwickeln, ohne dass die Piloten davon etwas mitkriegen, mitunter ein tolles Eigenleben.
In der Luft haben dann die Querruder neben der Kontrolle der Rollrate noch eine unbezahlten Nebenjob, den sie klaglos machen, ohne dass sie von den Piloten dazu extra aufgefordert werden müssten: die „Load Alleviation Function“.
Die Load Alleviation Function (LAF) ist bei allen Gewichten aktiv. Sie verhindert übermäßige Biegemomente an den Flügeln bei Turbulenz oder abrupten Manövern (g-Load). Gesteuert wird das Ganze mithilfe von Beschleunigungsmessern in den Pylonen der äußeren Triebwerke. Böse Zungen behaupten zwar – vor allem, wenn bei Turbulenz mal wieder der Kaffee verschüttet wird – das System gebe es in Wirklichkeit gar nicht. Aber das ist natürlich Unsinn. Man kann der LAF auf der Flight-Control-Seite bei der Arbeit zusehen. Tatsächlich tanzen dann die Querruder in Turbulenz einen wilden Tanz, der nichts mit der Querlage des Flugzeugs zu tun hat.



Auf der Flight-Control-Seite des A380 kann man u. a. den Status und die Position jeder einzelnen Kontrollfläche sehen. Bei starker Turbulenz sieht man hier den „Tanz der Ailerons“ durch die Load Alleviation Function. Foto: Autor

Sidesticks und Ruderpedale

Die beiden Sidesticks im A380 Cockpit sind – wie bei allen Airbus Fly-by-Wire-Flugzeugen – nicht miteinander verbunden. Weder mechanisch noch elektronisch. Das hat immer wieder zu Kontroversen geführt und auch zu Zwischenfällen verschiedenster Art. Die Zwischenfälle wurden meist dadurch verursacht, dass die Piloten die Bedien-Philosophie der Sidesticks einfach nicht verstanden haben oder dass diese Philosophie nicht ausreichend trainiert wurde. Erschwerend für den zuverlässigen Umgang mit den Sidesticks kommt hinzu, dass viele Piloten, die auf dieses System geschult werden, vorher mitunter lange Jahre mit konventionellen Steuerungen geflogen sind. Es ist schwer, mit so einem Hintergrund die neuen Verhaltensmuster zu erlernen und die – immer gleichen – Probleme mit den Sidesticks zu verstehen:

- Man kann nicht sehen, ob und wie weit der andere Pilot den Sidestick ausgeschlagen hat.
- Bei der Übergabe/Übernahme der Kontrolle werden immer wieder Fehler gemacht, die eine saubere Kontrollübergabe verhindern.

Ich möchte auf diese Probleme in einem späteren Artikel eingehen. Hier will ich nur be-

schreiben, wie die Sidesticks funktionieren und wie sie richtig bedient werden.
Die beiden Sidesticks sitzen jeweils auf einer großen Box mit den Eingeweiden mechanischer und elektronischer Art, die mindestens dreimal so groß ist wie der Sidestick selbst. Wie der Klappenhebel so haben auch die Sidesticks mehrere redundante Sensoren, die zuverlässig ihre jeweilige Position ermitteln. Die Sidesticks sind federbelastet in der Mittelposition zentriert und erhalten keinerlei Feedback von den Flight Controls. Es gibt auch keine höheren Steuerkräfte z. B. bei hoher Geschwindigkeit, wie das bei konventionellen Steuerungen üblich ist. Das ist auch nicht nötig, weil der A380 auf einen bestimmten Sidestick-Ausschlag immer gleich reagiert, egal wie schnell man fliegt: Großer Ausschlag – hohe g-Load, kleiner Ausschlag – kleine g-Load.
Werden beide Sidesticks gleichzeitig betätigt, ertönt die laute akustische Warnung „Dual Input! Dual Input!“ zusammen mit einer optischen Warnanzeige auf dem Glareshield. Die Steuerkommandos der beiden Sidesticks werden dann in den Flight-Control-Computern gemischt und nur im Mittel berücksichtigt. So kann es durchaus passieren, dass am Ende das Flugzeug überhaupt nichts macht, weil ein Pilot nachdrückt und der andere zieht. Daher ist der wichtigste Grundsatz bei der manuellen Steuerung: Nur ein Pilot fliegt das Flugzeug mit dem Sidestick.
Will oder soll ein Pilot also die Kontrolle übernehmen, so muss er das zum einen ansagen mit „I have Control“ und gleichzeitig den roten Sidestick-Pushbutton drücken (und halten). Damit werden alle Kommandos des anderen Sidesticks unterdrückt, und der übernehmende Pilot hat die volle Kontrolle über das Flugzeug. Es ertönt der Callout „Priority Left!“ (bzw. „Priority Right!“, falls der Copilot übernommen hat). Der Sidestick-Pushbutton muss so lange gedrückt bleiben, bis der andere Pilot die Übernahme mit „You have Control“ bestätigt hat UND bis der andere endlich den Sidestick losgelassen hat. Letzteres kann man an der Anzeige am Glareshield erkennen.

Anzeige der Sidestick Priority in Airbus Fly-by-Wire-Flugzeugen www.quora.com

Es hat natürlich auch Vorteile, dass die beiden Sidesticks nicht verbunden sind. Die Blockierung der Steuersäule wäre ein Alptraum in einem Flugzeug mit konventioneller Steuerung. Bei einer Blockierung eines Sidesticks jedoch kann der andere Pilot mühelos übernehmen und das Flugzeug ohne Einschränkungen weitersteuern. Ein Drücken des Sidestick-Pushbuttons für mindestens 40 s deaktiviert den anderen fehlerhaften Sidestick. Ein dramatisches Beispiel für eine solche Kontrollübergabe von einem defekten Sidestick war z. B. die Übernahme durch den Copiloten nach dem Start eines A320. Der Kapitän hatte die Kontrolle verloren. Durch einen technischen Fehler war der Sidestick des Kapitäns falsch verdrahtet gewesen (siehe dazu meinen Artikel „Wartungsfehler“, *Pilot und Flugzeug* 2015/12).
Mit eingeschaltetem Autopilot sind beide Sidesticks in der Neutralstellung blockiert. Sollte sich der Autopilot über den

roten Sidestick-Pushbutton nicht ausschalten lassen, so kann er notfalls auch über eine kräftigere Bewegung des Sidesticks abgestellt werden.

Die Ruderpedale von Kapitän und Copilot sind im Cockpit miteinander verbunden. Sie erhalten aber wie die Sidesticks keinerlei Feedback von den Flight Controls. Airbus hat sich sogar für den extremen Fall was ausgedacht, wenn die Ruderpedale am Boden z. B. zur Landung blockiert sein sollten oder die Signale ausgefallen sind: In dem Fall wird das Seitenruder über differenzielles Bremsen angesteuert. Die alternative Ruderbetätigung wird aktiviert, sowie die Differenz zwischen rechter und linker Bremsbetätigung mehr als 50 % beträgt. Unter 50 Knoten kann man dann mit dem Handrad der manuellen Bugradsteuerung übernehmen.

Auch das gibt's beim A380: Bei blockierten Ruderpedalen am Boden wird das Seitenruder über die Bremsen angesteuert ... Foto Autor

Warnungen, Schutzfunktionen, Sensoren und „Voter"

Die Warnungen im A380 entsprechen denen in anderen Flugzeugen. Die wichtigsten Warnungen (neben denen des TAWS[1]) sind akustische und visuelle Warnungen für:

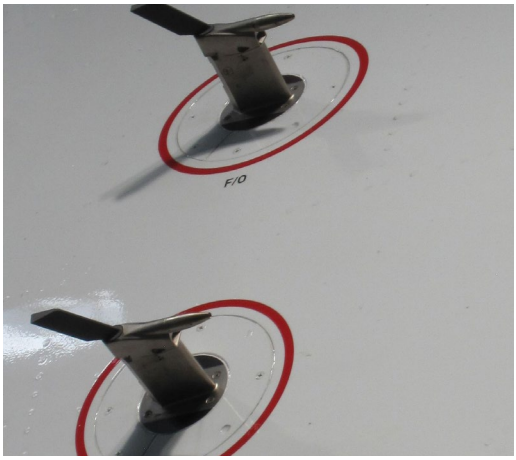
- Overspeed Warning – continuous repetive chime,
- Stall Warning – voice call out „Stall! Stall!"

Die Stallwarning ist in den Airbus Fly-by-Wire-Flugzeugen leider etwas kümmerlich geraten. Der Callout „Stall! Stall!" ist für mein Gefühl zu leise und völlig unaufdringlich, kein Vergleich zum markerschütternden Stickshaker einer Boeing 737. Eventuell wurde die Stallwarnung deshalb so unauffällig gewählt, weil ein A380 im Normal Law gar nicht in den Stall fliegen kann.
Im A380 gibt es auch eine Low-Energy-Warnung, das ist ein Voice Callout „Speed! Speed!" – wenn die Computer erkennen, dass die Energie zu niedrig wird.

Zusätzlich zu den Warnungen gibt es im A380 mehrere wichtige Schutzfunktionen, die das Flugzeug vor Upset, Überlastung und dem Strömungsabriss schützen sollen.
Mit den Schutzfunktionen (Protections) hat Airbus nun schon 30 Jahre gute und leider auch einige schlechte Erfahrungen gemacht. Man hat aus den Erfahrungen gelernt, das ist beim A380 sehr deutlich zu sehen. Im A380 ist das Beste verbaut, was Airbus bisher an Schutzfunktionen entwickelt hat. Die Protections des A380 sind einfach zu verstehen, das Flugzeug ist nicht (wie anfangs der A320) „overprotected". Und vor allem sind die Schutzfunktionen so abgesichert, dass sie nicht „versehentlich" ausgelöst werden können, z. B. durch einen einzelnen fehlerhaften Anstellwinkelsensor.

1) TAWS - Terrain Awareness and Warning System (früher EGPWS)

Sämtliche A380-Schutzfunktionen sind im Normal Law nicht übersteuerbar. Das ist ein wesentlicher Unterschied zu den Fly-by-Wire-Systemen von Boeing. Damit es keine Fehl-Aktivierungen gibt, sind alle Sensoren für die Protections mehrfach redundant vorhanden. So werden für die Schutzfunktionen die Daten von drei unabhängigen Air-Data-Computern verwendet. Sogenannte Voter überwachen die eingehenden Daten. Nur wenn mindestens zwei unabhängige Daten eine Gefahrensituation bestätigen, wird eine Schutzfunktion aktiviert. Gibt es von den drei Datensätzen einen „Abweichler“, wird der abgewählt und die Flight-Control-Computer arbeiten mit den zwei verbleibenden Daten normal weiter. Erst bei Mehrfachfehlern gibt es eine sog. Reconfiguration, die Computer wechseln dann vom Normal Law ins „Alternate Law“ oder gar ins „Direct Law“. Die Beschreibung dazu finden Sie weiter unten.



Air Data Probes auf der Copiloten-Seite des A380-Cockpits. Die Sensoren messen den Staudruck, die Temperatur und den Anstellwinkel. Der statische Druck wird an anderer Stelle am Rumpf gemessen. Es gibt insgesamt vier solcher Sensoren. Foto: Autor

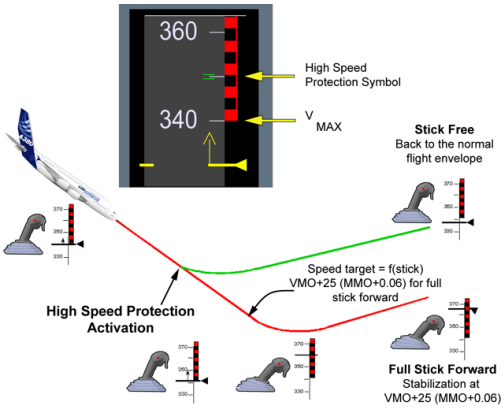
Das sind die wichtigsten Protections des A380:

- g-Load Protection, lässt zum Schutz der Struktur keine g-Load außerhalb der zulässigen Limits zu (mit Klappen eingefahren –1g bis +2,5g, mit Klappen ausgefahren 0g bis +2,0g).
- Pitch Attitude Protection, Nose up: max 30°, Nose down: max 15°
- Bank Angle Protection, max 67° bank
- High Speed Protection
- Angle of Attack Protection
- Alpha Floor Protection

Einige dieser Protections sind etwas komplizierter:

High Speed Protection

Die High Speed Protection schützt das Flugzeug vor struktureller Überlastung durch Overspeed, nicht aber vor Überschreitung der maximalen Geschwindigkeit VMO/MMO (340 kt / M 0.89), da muss der Pilot schon selbst aktiv werden. Die Piloten werden aber schon vor Aktivierung der High



High Speed Protection beim A380. Die Fluglage ist nur symbolisch zu verstehen, tatsächlich kann der A380 nicht unter minus 15° Pitch gedrückt werden. Quelle: A380-800 Flight Deck and Systems Briefing for Pilots, 2005

Speed Protection durch die Overspeed Warning alarmiert. Die PRIMs überwachen die Speed-Trends und aktivieren die High Speed Protection spätestes bei 355 kt/M 0.93. Dann wird der Autopilot deaktiviert, und die PRIMs ziehen das Flugzeug hoch. Es gibt keine separate Warnung für die Aktivierung einer Protection, man kann aber nicht übersehen, dass sich was tut: Die g-Loads können dabei auch im Reiseflug deutlich über 1,5g liegen. Ein Überdrücken des Pitch-up ist, auch mit Sidestick voll nach vorne gedrückt, nicht möglich.

Es hat in der Vergangenheit nur einige wenige Aktivierungen gegeben, meist ausgelöst bei hoher Geschwindigkeit im Reiseflug oder im Sinkflug beim Einflug in eine Mountain-Wave oder eine Windscherung. Die High Speed Protection kann die Piloten unmittelbar in zwei kritische Situationen führen: Kollisionsrisiko und Low Energy. Ein Kollisionsrisiko könnte sich ergeben, wenn das Flugzeug im Reiseflug plötzlich hochzieht und 1.000 Fuß über einem ein anderes Flugzeug fliegt. Ich selbst vermeide solche Situationen grundsätzlich und fliege dann eine oder zwei Meilen OFFSET, um nicht z. B. über dem Atlantik ständig direkt unter oder über einem anderen Flugzeug zu fliegen.
Als ich 2001 auf den Airbus A340 kam, gab es dort keinerlei Training oder Procedure zum Umgang mit der High Speed Protection. Es wurde auf dem A340 sogar empfohlen, nach dem Ende der Protection bloß nicht von Hand einzugreifen, sondern stattdessen den Autopiloten wieder einzuschalten und dem die „Recovery“ zu überlassen. Das wäre das Letzte gewesen, was ich mit 10° Pitch über dem Horizont, Schub auf Leerlauf und Speed Brake voll ausgefahren gemacht hätte.

Auf dem A380 gibt es ein spezielles Verfahren, wie man nach Ende der High Speed Protection alles wieder unter Kontrolle bekommt: Natürlich von Hand mit dem Sidestick. Anders als früher (vor dem Air-France-Absturz über dem Atlantik) wird heute auf allen Airbus-Mustern auch der Flug von Hand in großer Höhe im Simulator trainiert. Auch das Wissen der Piloten über High-Speed-Aerodynamik und über den enorm ansteigenden Widerstand in Low-Energy-Situationen in Reiseflughöhe hat sich erheblich verbessert. Alle unsere Piloten werden zudem regelmäßig in der Upset-Recovery geschult. Ein solches Programm gab es früher gar nicht.
Eine Over Speed Protection, die vor dem Überschreiten der maximalen Geschwindigkeit mit ausgefahrenen Klappen schützt, gibt es im Flight-Control-System übrigens nicht. Lediglich das Klappensystem selbst schützt sich ein wenig über die beiden SFCC: Bei Speed-Limit-Überschreitungen fahren die Klappen automatisch eine Stufe ein. Beim Versuch, die Klappen bei hohem Anstellwinkel oder zu niedriger Speed ganz einzufahren, werden die Slats automatisch blockiert und verweigern das Einfahren.

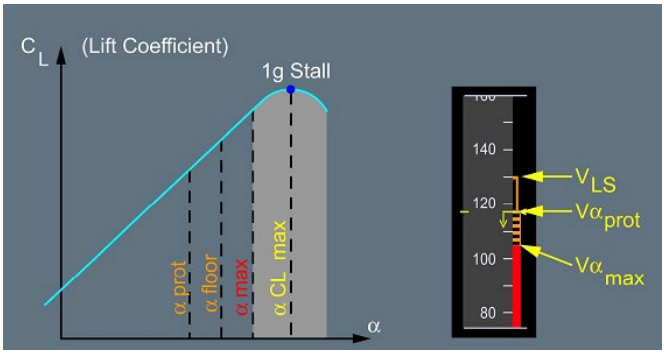
Angle of Attack Protection

Die Angle of Attack Protection wird aktiviert, sowie der Anstellwinkel einen bestimmte Wert erreicht, der „Alpha Prot“ genannt wird. Dann wechselt das Normal Law in Pitch von „g-Load Command“ zu „Angle of Attack Command“. Der Pilot steuert dann mit dem Sidestick direkt den Anstellwinkel. Zieht er weiter zurück, steigt der Anstellwinkel weiter an, bis er „Alpha Max“ erreicht, den maximal zulässigen Anstellwinkel im A380. Alpha Max liegt ganz knapp unter dem

Anstellwinkel, bei dem der Auftrieb zusammenbrechen würde, dem „Alpha Stall“. Lässt der Pilot den Sidestick in dieser Region los (stick free), geht der Anstellwinkel sofort auf „Alpha Prot“ zurück, immer noch ein extremer Anstellwinkelwert. Erst durch Nachdrücken kommt man wieder in den g-Load-Command-Bereich.

Das Limit „Alpha Max“ ist ein nicht überziehbares Limit des A380 Flight Control Systems – wie ein mechanischer Anschlag, nur eben elektronisch festgelegt. Alpha Max ist keine Warnschwelle – wie z. B. ein Stickshaker – er kann nicht überschritten werden.

Dieses Systemverhalten wird in einigen Notverfahren voll ausgenutzt. Kommt es im Anflug z. B. zu einer unerwarteten Terrain Warnung wie z.B. “Pull Up! Pull Up!“, wird der Sidestick bis zum mechanischen Anschlag nach hinten gezogen und dort gehalten. Das Flugzeug macht einen drastischen Pitchup mit exakt 2.0 g (Das Pitch Limit von 30° wird automatisch eingehalten), bis Alpha Prot erreicht ist. Dann wechselt das Normal Law in die Angle of Attack Protection und der Anstellwinkel steigt weiter an, bis Alpha Max. Man braucht sich keine Gedanken zum Stall zu machen und kann sich ganz auf das Manöver konzentrieren – und natürlich darauf, dass auch alle Schubhebel in TOGA stehen und die Speedbrakes eingefahren sind.



Die Schutzfunktionen bei hohem Anstellwinkel: Als „Erstes wird die Low-Energy-Warnung mit dem Callout „Speed! Speed!“ aktiv, bei Alpha Prot wechselt das Normal Law zum Angle of Attack Command, bei Alpha Floor wird die Alpha Floor Protection aktiv. Mehr als Alpha Max kann man im A380 nicht kommandieren ...

Alpha Floor Protection

Die Alpha Floor Protection ist eine weitere Schutzfunktion gegen eine Low Energy High Angle of Attack Situation. Die PRIMs gucken nicht tatenlos zu, wie ein Pilot munter den Anstellwinkel bis zum Maximum erhöht. Erreicht der Anstellwinkel einen kritischen Wert, wird die Alpha Floor Protection aktiv. Alle Triebwerke laufen sofort auf TOGA Power hoch, völlig egal, wo die Schubhebel stehen und ob Auto Thrust aktiv ist oder nicht. Damit die PRIMs in dieser kritischen Situation den Flieger nicht selbst zum Absturz bringen, gucken sie vorher mal nach, wie es den Triebwerken so geht: ist eines oder zwei ausgefallen, bleibt der Schub des symmetrischen Triebwerks auf der anderen Seite unverändert. Nur symmetrisch verfügbare Triebwerke gehen auf TOGA. So gibt es keine lateralen Kontrollprobleme.

Alpha Floor Protection ist verfügbar vom Abheben bis 100 Fuß Radarhöhe im Anflug. Es könnte also z. B. bei einer Windshear nach dem Abheben mit rasch hochlaufendem Anstellwinkel dazu kommen, dass alle Motoren von Reduced Takeoff Thrust auf TOGA gehen, noch ehe der Pilot überhaupt auf die Windscherung reagieren konnte.

Es gibt noch eine weitere Protection, die Airbus in diesem Zusammenhang im Handbuch

beschreibt. Es ist die Reactive Windshear Detection. In meinen Augen ist das aber keine Protection. „Schützen“ kann man sich vor einer Windscherung nur, wenn man nicht reinfliegt. Die mit der Reactive Windshear Detection verbundene Warnung jedoch ist für die Crews der Trigger für die Anwendung des Wind-Shear-Verfahrens, das wiederum unter Umständen die Nutzung der Angle of Attack Protection erfordert.

Alternate Law & Direct Law

Wie schon oben erwähnt, gibt es im Flight Control System sog. Voter, die die Inputs von den verschiedenen Sensoren vergleichen und fehlerhafte Inputs „abwählen“. Bei einem abgewählten Anstellwinkel z. B. kann das System immer noch im Normal Law weiterarbeiten und alle Protections stehen voll zur Verfügung. Geht aber die Redundanz verloren oder treten weitere Fehler auf (z. B. eine Blockierung des Klappensystems), erfolgt ein sofortiger Wechsel ins Alternate Law. Damit sind viele Protections abgeschaltet und durch starke sog. Positive Stability ersetzt. Die Piloten können jedoch im Alternate Law die verbleibenden Protections der Flight-Control-Computer überdrücken. Es gibt eine ganze Liste von Fehlern, die sofort zu einer solchen „Reconfiguration“ führen. Etwa 25 Fehler – es sind alles Mehrfachfehler, wie der Ausfall beider Hydraulik-Systeme, der zweier Air-Data-Computer, der Ausfall der Landeklappen oder der Vorflügel etc. – führen zu einer Reconfiguration ins Alternate Law. Manche Mehrfach-Fehler sind auch so gravierend, dass ein direkter Wechsel ins Direct Law stattfindet. Etwa zehn Fehler, darunter der Verlust aller drei PRIMs oder der Ausfall aller drei Air-Data-Computer, führen zum Direct Law. Die Steuerausschläge folgen dann direkt (daher der Name) den Sidestick-Ausschlägen. Dann müssen die Piloten alles selber steuern – inklusive Trimmen – und fliegen quasi eine 500 Tonnen schwere Cessna. Selbst im Direct Law lässt sich der A380 einfach fliegen. Man darf nur das Trimmen nicht vergessen. Das ist leicht möglich, denn die Steuerkräfte am Sidestick sind sehr gering, und das Trimmen sonst nie nötig. Ein fetter Schriftzug steht dann zur Erinnerung im Primary Flight Display: „USE MAN PITCH TRIM“.

Dennoch: Egal wie schwerwiegend die Fehler sind, es gibt im A380 immer ein Yaw Damping um die Hochachse sowie ein Pitch Damping, um die Piloten bei der Steuerung zu unterstützen.

Fliegen mit hoher Redundanz in der Steuerung

Das Flight Control System des A380 weist eine so hohe Redundanz auf, dass ein einzelner Fehler sich so gut wie nicht auswirkt. Die Redundanz ist sogar so hoch, dass die MEL (minimum equipment list) den Dispatch mit einzelnen defekten Komponenten zulässt, die mit der Steuerung zu tun haben. Das ermöglicht auf den Langstreckenflügen den sicheren Heimflug zur Basis, wo Ersatzteile vorhanden sind. Erlaubt ist z. B. ein Dispatch mit einzelnen der folgenden Komponenten inoperative:

- ein PRIM oder ein SEC,
- einzelner Flight Control Actuator,
- ein Air Data Reference Computer (ADR),
- eine Intertial Reference Unit (IR).

Die Systeme des A380 sind aber so zuverlässig, dass ich einen solchen Fehler bisher nur im Simulator gesehen habe.

Die Redundanz des A380 ist so hoch, dass wir im Simulator fast ausschließlich Mehrfachfehler trainieren. Ein Engine Failure gehört zu den Ausnahmen, denn er ist natürlich schon von den Flugleistungen her ein bedeutender Einzelfehler. Selbst wenn trotzdem mal was Größeres kaputt geht, ist man im A380 gut aufgehoben. Ich muss sagen, selbst komplizierte Mehrfachfehler lassen sich gut beherrschen. Zum Beispiel der Komplettausfall beider Hydraulik-Systeme: Was funktioniert noch? Das Wichtigste: Der Autopilot geht noch! Außerdem: alle Querruder, Höhenruder und die Seitenruder. Die Steuerung ist im Alternate Law. Man könnte also noch Stunden weiterfliegen, wenn es erforderlich ist. Trotz „eingefrorenem“ Stabilizer ist bei manuellem Fliegen kein ständiges Ziehen im Anflug erforderlich. Einschränkungen gibt es bei den Klappen. Die Landeklappen bleiben in der Stellung, in der sie beim Ausfall waren. Die Vorflügel können – wie schon erwähnt – elektrisch gefahren werden. Die Fahrwerke können nicht mehr eingefahren werden. Sind sie drinnen, werden sie später mit „Gravity Extension“ ausgefahren.
Bremsen und Bugradsteuerung funktionieren noch, wie die Steuerflächen mit Elektro-Hydraulischen Actuators. Auch das Antiskid-System arbeitet noch.

Wie würde sich aber ein Totalausfall aller sechs Flight-Control-Computer auf die Steuerung auswirken?
Ein solcher Fehler ist kaum denkbar und im höchsten Maße unrealistisch. Denn das elektrische Bordnetz besteht aus vier getrennten Generatoren an den Triebwerken, vier Batterien, einem ganzen Netzwerk aus voneinander getrennten Sammelschienen (Busses). Hinzu kommt noch eine separate Ram-Air-Turbine. Das ist eine Turbine, die bei Stromausfall in den Luftstrom unter dem Flügel ausfährt und einen weiteren Stromgenerator antreibt. Irgendwoher kommen immer noch ein paar Watt, um die Flight-Control-Computer anzutreiben. Wobei ein einzelner Flight-Control-Computer ausreicht, das Flugzeug sicher zu steuern. Aber was wäre, wenn?
Dafür hat Airbus das Backup Control Module (BCM) eingebaut. Das BCM ist völlig vom elektrischen Bordnetz unabhängig und besteht aus zwei Hydraulik-Motoren, die je von einem der beiden Hydraulik-Systeme angetrieben werden und mit je einem Stromgenerator verbunden sind. Diese Generatoren – einer reicht – versorgen den Flight-Control-Computer des Backup-Control-Moduls. Das BCM kann den A380 um alle Achsen steuern, auch den Stabilizer. Die Steuerflächen werden dabei von einem oder beiden Hydraulik-Systemen betätig. Wie schon oben erwähnt, sind die Sidesticks auch mit dem BCM verbunden. Das BCM wird automatisch angeworfen, wenn PRIM 2 und SEC 2 ausgefallen sind. Es übernimmt aber erst nach Ausfall des letzten der sechs PRIMs und SECs die Kontrolle. Es hat bisher noch keinen Fall gegeben, in dem das Backup Control Module im A380 benötigt wurde.

A380 Departure **Maarten Visser - Wikipedia**

Fazit

Das Flight-Control-System des A380 ist ein gelungener Entwurf und in seiner enormen Redundanz der Größe des Flugzeugs mehr als angemessen. Die Piloten lieben den A380. Gerade das manuelle Fliegen damit geht gut von der Hand. Auch bei komplexen Fehlern. Der A380 reagiert schnell auf jeden Input. Von Trägheit ist trotz der 80 Meter Spannweite und bis zu 560 Tonnen Gewicht im manuellen Handling nichts zu spüren.
Das Flight-Control-System hat eine hohe Redundanz und viele eingebaute Schutzfunktionen. Dennoch ist die hohe Sicherheit des A380-Flugbetriebs nicht nur den Airbus-Ingenieuren zu verdanken. Nur mit gut geschulten Piloten kann ein so komplexes Flugzeug sicher betrieben werden. Daher ist regelmäßiges Simulatortraining von besonderer Bedeutung und hat in unserem Flugbetrieb einen hohen Stellenwert. Ebenso fliegen wir den A380 so oft es geht von Hand, um in Übung zu bleiben. Manuelles Fliegen in größeren Höhen (RVSM Airspace) ist allerdings nicht gestattet. Daher werden – anders als früher – die Crews im Simulator auch im manuellen Fliegen in großen Höhen trainiert. Das Design des A380 hat für mich das beste Mensch-Maschine Interface von allen Boeing- und Airbus-Modellen, die ich bisher geflogen habe.

PeterKlant@Lindbergh-aviation.de

Einige Quellen und Literatur:

A380-800 Flight Deck and Systems Briefing for Pilots Issue 2, 2006 http://www.smartcockpit.com/docs/A380_Briefing_For_Pilots_Part%202.pdf

Variable Displacement Hydraulic Motors used for High Lift Systems of Commercial Aircrafts (on the example of the Airbus A380 Flap System) by Bernhard Hauber, Liebherr-Aerospace-GmbH, 2006 https://aircraft-system.com/files/pages/experience/Abstract_5th_HC_Aachen March2006.pdf

The A380 Flight Control Electrohydrostatic Actuators, Achievements and Lessons Learnt by Dominique van den Bossche, Airbus 2006 http://www.icas.org/ICAS_ARCHIVE/ICAS2006/ABSTRACTS/048.HTM

Sidestick Priorty Kurzes Youtube Video https://www.youtube.com/watch?-v=SKNJ-ABAPuY

Dual Side Stick Inputs
Artikel von Frédéric Combes, Flight Safety Manager Airbus Safety first #03 December 2006 https://safetyfirst.airbus.com/app/themes/mh_newsdesk/documents/archives/dual-side-stick-inputs.pdf

A380 Flight Controls overview
By Xavier Le tron, Airbus Flight Controls Präsentation Deutsche Gesellschaft für Luft- und Raumfahrt - Lilienthal-Oberth e.V. (DGLR) 2007 http://www.fzt.haw-hamburg.de/pers/Scholz/dglr/hh/text_2007_09_27_A380_Flight_Controls.pdf

Airbus A380 Technical Training Manual Maintenance Course - Flight Controls https://de.scribd.com/document/226098342/A380-LEVEL-I-ATA-27-Flight-Controls