

Technik

Pilot Training Manual Edition 2008

Inhaltsverzeichnis

1. EINLEITUNG	2
2. AERODYNAMIK	2
2.1 Newton.....	2
2.2 Bernoulli	2
2.3 Der Auftrieb	4
2.3.1 Entstehung	4
2.3.2 Strömungsabriss – Stall	5
2.3.3 Wirbelschleppen – wake turbulence	5
2.3.4 Der Propeller – eine kleine Tragfläche.....	5
2.4 Die Steuerung	6
2.4.1 Die drei Achsen	6
2.4.1.1 LÄNGSACHSE – QUERRUDER.....	7
2.4.1.2 HOCHACHSE – SEITENRUDER.....	8
2.4.1.3 QUERACHSE – HÖHENRUDER.....	9
2.5 Auftriebshilfen und Auftriebsvernichter	10
2.6 Die vier Kräfte	11
2.7 Geschwindigkeitsdefinitionen	12
3. TRIEBWERKE	15
3.1 Kolbentriebwerke.....	15
3.2 Strahltriebwerke.....	16
3.3 Turboprop-Triebwerke	18
4. SYSTEME	19
4.1 Elektrik – Electrical System	19
4.2 Hydraulik	20
4.3 Druckkabine	20
4.4 Enteisung	21
5. INSTRUMENTE	22
5.1 Künstlicher Horizont – ADI – Attitude and Direction Indicator	22
5.2 Geschwindigkeitsmesser – IAS – Indicated Airspeed	22
5.2.1 Cessna 182.....	24
5.2.2 Beechcraft Baron	24
5.2.3 Boeing 767, Boeing-Style	24
5.2.4 Moderne EFIS, Embraer RJ145.....	24
5.3 Höhenmesser – Altimeter	25
5.4 Variometer – Vertical Speed Indicator – VSI.....	26
5.5 Kurskreisel – Heading Indicator, Horizontal Situation Indicator – HDG/HSI	26
5.6 Thermometer – Thermometre	27
5.7 Wendezeiger/Libelle – Turn coordinator	27
5.8 Stoppuhr – Chronometer – CLOCK.....	27
5.9 Motorüberwachungsinstrumente – Engine Indications	28
5.9.1 Kolbenmotor mit Propeller direkt auf der Motorwelle	28
5.9.2 Kolbenmotor mit Verstellpropeller / Constant Speed Propeller	29
5.9.3 Turboprop-Triebwerk	29
5.9.4 Strahltriebwerk.....	30
5.10 NAV – COM - Radios.....	30

1. EINLEITUNG

Das Kapitel Technik in unserem PTM soll lediglich grundlegende Kenntnisse vermitteln, denn es würde den Rahmen sprengen, wollte man jedes Detail erwähnen.

Wir besprechen die wichtigsten Dinge, unterteilt in die folgenden vier Bereiche:

- Aerodynamik
- Triebwerke
- Systeme
- Instrumente

2. AERODYNAMIK

2.1 Newton

An sich ist es recht einfach, Aerodynamik und damit den Grund warum Flugzeuge fliegen, zu verstehen. Grundlegend wichtig dafür sind, neben anderem die **drei Newton'schen Axiome**:

1. **Trägheitsprinzip**: Ein ruhender Körper bleibt in Ruhe, oder bewegt sich mit konstanter Geschwindigkeit geradlinig weiter, solange keine **resultierende äussere Kraft** auf ihn wirkt.

Definition der **resultierenden äusseren Kraft**: Oft wirken auf einen Körper zugleich mehrere äußere Kräfte, die nach Richtung und Stärke addiert, die resultierende äußere Kraft ergeben. Heben sich alle äußeren Kräfte gegenseitig auf, dann ist die resultierende äußere Kraft gleich Null.

Das ist zum **Beispiel** dann gegeben, wenn bei einem Flugzeug Richtung und Betrag der Geschwindigkeit unverändert bleiben.

2. **Prinzip der Dynamik**: Ein beweglicher Körper wird in Richtung der auf ihn wirkenden resultierenden äußeren Kraft beschleunigt. Die Stärke der Beschleunigung ist proportional zur resultierenden äußeren Kraft und umgekehrt proportional zur Masse des Körpers.

Beispiel: Beschleunigung eines Flugzeugs während des Startlaufs.

3. **Reaktionsprinzip**: Übt ein Körper A eine Kraft auf einen Körper B aus, so übt dieser Körper B eine exakt gleich große und entgegengesetzte Kraft auf A aus, **actio = reactio**

Beispiel: Die Flugzeugreifen wirken mit dem Gewicht des Flugzeugs auf die Standfläche, und von der Standfläche aus wirkt eine gleich starke, aber entgegen gesetzte Kraft auf die Reifen. Die resultierende äußere Kraft ist deshalb gleich Null, und das Flugzeug wird nicht in vertikaler Richtung beschleunigt.

Wenn Dir diese Erklärungen noch nicht reichen, empfehle ich einen Ausflug zu [Wikipedia](#).

2.2 Bernoulli

Bernoulli's Gesetze spielen auch eine Rolle in der Aerodynamik. Herr Bernoulli fand nämlich schon im 17. Jahrhundert heraus, dass man den Luftdruck in **statischen (P_S)** und **dynamischen (P_D)** Luftdruck aufteilen kann. Addiert man den statischen und den dynamischen Luftdruck, so erhält man den **Gesamtdruck (P_G)**, die Formel dazu lautet also:

$$P_G = P_S + P_D$$

Statischer Druck ist definiert durch die Kraft, die **ruhende Luft** auf eine bestimmte Fläche ausübt. Der **dynamische Druck** hingegen ist die Kraft, die **bewegte Luft** auf eine bestimmte Fläche ausübt.

Im Freien entsteht der **statische Luftdruck** durch das **Gewicht der Luftmasse**. In **Meereshöhe** wurde als mittlerer Luftdruck **1013,25 hPa (Hektopascal)** vereinbart (ISA-Wert, siehe auch Kapitel **METEOROLOGIE**).

Dieser Luftdruck ist ein Mass für das **Gewicht** der Luftsäule, die in Meereshöhe auf **einem Quadratmeter** lastet: 101325 Newton!

Ein Kubikmeter vollkommen trockene Luft hat in Meereshöhe bei einem Luftdruck **1013,25 hPa** eine Masse von **1,225 kg** (ISA-Wert). Die **Luftdichte** beträgt somit **1,225 kg pro Kubikmeter**.

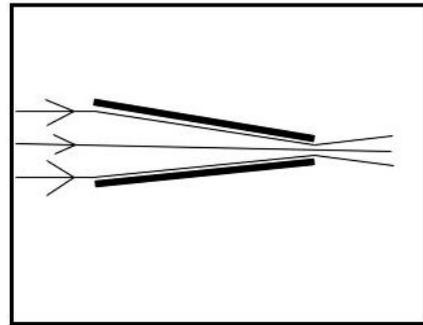
Mit der Höhe nimmt die Luftdichte ab, erreicht bei ca. 5500 Metern/18000ft die Hälfte und bei 11000 Metern/36000ft ein Viertel der Dichte, im Vergleich zum Wert auf Meereshöhe.

Was bedeutet das nun? Bernoulli stellte Versuche an und liess dabei eine Flüssigkeit durch verschieden geformte Röhren strömen und mass den statischen sowie den dynamischen Druck. Die Ergebnisse lassen sich weitgehend, mit gewissen Einschränkungen, auf Gase übertragen und helfen uns beim Verständnis der Aerodynamik.

Versuch 1:

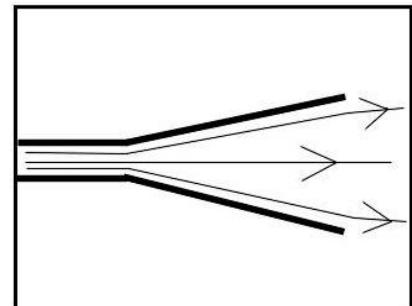
Bernoulli liess Flüssigkeit in eine Röhre einströmen, die zum Ende hin dünner wurde.

Er beobachtete, dass die Strömungsgeschwindigkeit zum Ende hin zunahm. Als er dort den Druck mass, stellte er fest, dass der **statische Druck** (die auf die Innenwänden der Röhre lastende Kraft) **abnahm** und der **dynamische Druck zunahm** (höhere Strömungsgeschwindigkeit).



Versuch 2:

Diesmal kehrte er die Konfiguration um, die Röhre erweiterte sich in Strömungsrichtung. Nun mass er, dass der **dynamische Druck zum Ende hin abnahm**, während der **statische Druck zunahm**.



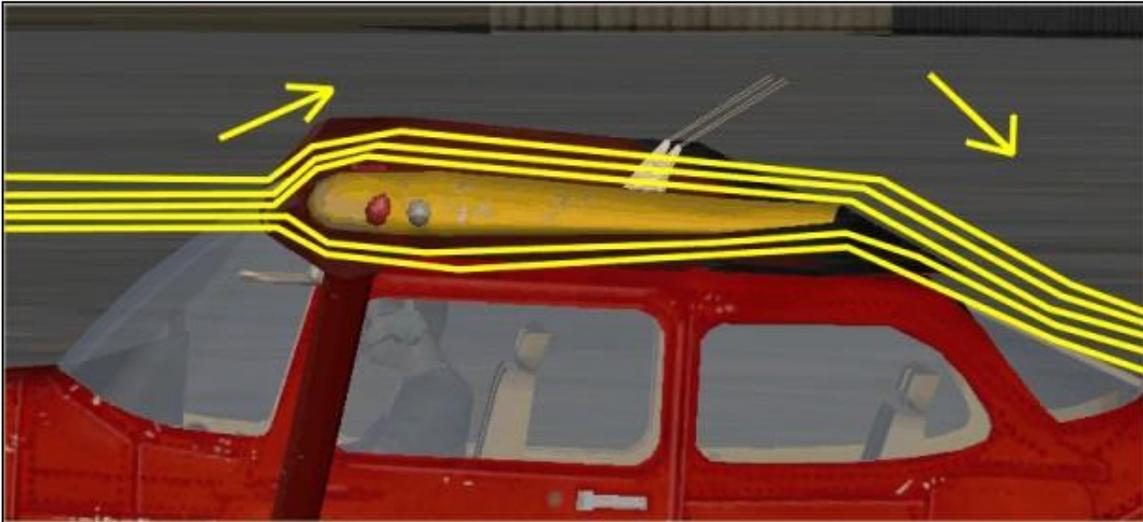
Herr Bernoulli folgerte daraus, dass durch die Beschleunigung in **Versuch 1** der Druck deswegen abgenommen hatte, weil mehr Energie zum Beschleunigen der Moleküle gebraucht wurde und somit dem statischen Druck entzogen wurde. In **Versuch 2** gaben die bewegten Moleküle beim Abbremsen wieder Energie ab, also stieg der statische Druck. Sie hatten durch die langsamere Flussgeschwindigkeit gewissermassen mehr Zeit, Druck auf die Seitenwand auszuüben.

Wichtig zu wissen ist, dass der **Gesamtdruck in beiden Fällen gleich gross** war und somit **dynamischer und statischer Druck in direktem Zusammenhang stehen!** Wird **ein Teil kleiner**, muss der **andere grösser** werden.

2.3 Der Auftrieb

2.3.1 Entstehung

Gewappnet mit den Erkenntnissen aus dem vorhergehenden Kapitel, betrachten wir nun eine Tragfläche (wing) von der Seite. Am Profil (profile) erkennen wir, dass die Luft hier ein paar Umwege nehmen muss. Erst kann man verfolgen, dass der Tragflügel die Luft in einen oberen und einen unteren Strom teilt. Nun kommt der wichtigste Teil: Die Luftmoleküle auf der oberen Seite werden durch die Wölbung zunächst nach oben ausgelenkt und dann wieder nach unten gezogen, der Flügeloberfläche folgend.



Dies kann man mit der Trägheit der Moleküle nach dem Newtonschen Axiom erklären. Die Luftmoleküle wollen danach nicht bewegt werden. Werden sie es aber doch (die Luftteilchen ruhten ja ursprünglich im Raum bis wir mit der Tragfläche durch diesen pflügten), dann aber nur so weit wie sie auch müssen, um dann wieder zum Ausgangsort zurückzukehren. Am hinteren Ende der Tragfläche angekommen, geschieht daher nun das Entscheidende: Der Luftstrom wird nach unten abgelenkt (**downwash**)! Und laut **actio = reactio** muss dazu eine Gegenkraft existieren, die den Flügel nach oben lenkt – genau **das ist der Hauptanteil des Auftriebs**.

Dass der Luftstrom abgelenkt wird kann man in einem Selbstversuch testen: Hält man ein Glas schräg unter einen Wasserhahn, so läuft das Wasser nicht einfach nur herunter, sondern erfährt am unteren Ende des Glases eine seitliche Ablenkung in Richtung des Glasbodens, was einen Impuls erzeugt. Mehr Infos gibt es hier: <http://www.allstar.fiu.edu/aero/airflyvl3.htm>

Ein **weiterer Faktor** für den **Auftrieb** erklärt sich anhand von **Bernoulli's Gesetzen**. Die Luft auf der Oberseite des Flügels wird leicht beschleunigt, was zu einer Abnahme des statischen Drucks und somit zu einem kleinen Saugeffekt nach Oben führt. Dabei wird zwar zusätzlicher Auftrieb erzeugt, jedoch ist **dieser Anteil** des Auftriebs, **verglichen mit dem Impuls** durch den **downwash, relativ klein**.

Die Stärke des Auftriebs kann man durch eine Erhöhung der Strömungsgeschwindigkeit oder durch die Änderung des Anstellwinkels erreichen. Der **Anstellwinkel ist der Winkel**, mit dem die Tragfläche **relativ** zur Luftströmung steht. Nimmt man die Flugzeugnase nach oben, so erhöht man den Anstellwinkel und damit auch den Auftrieb, denn nun haben die Luftteilchen einen noch längeren Weg auf der Oberseite zurückzulegen und werden noch stärker nach unten abgelenkt.

2.3.2 Strömungsabriss – Stall

Allerdings kann man den **Anstellwinkel nicht unbegrenzt erhöhen!** Erreicht man einen bestimmten Grenzwert, so können die Luftmoleküle dem Flügel gerade wegen ihrer eigenen Trägheit nicht mehr folgen, die Strömung reisst vom Flügel ab. Der Auftrieb bricht zusammen, was einen sogenannten **Strömungsabriss** oder **Stall** zur Folge hat.

Diesen Flugzustand sollte man unter allen Umständen vermeiden, da er in geringen Flughöhen ungesund ist. Der Grund liegt darin, dass man erst Geschwindigkeit gewinnen muss, um erneut eine am Flügel anliegende Strömung und somit Auftrieb zu generieren. Dies geht zunächst nur durch eine Verkleinerung des Anstellwinkels, was einen unvermeidbaren Höhenverlust mit sich bringt.

2.3.3 Wirbelschleppen – wake turbulence

Je höher der **Auftrieb** nun ist, **desto grösser** ist auch der oben beschriebene **Downwash** hinter dem Flügel. Hier gibt es nun ein Problem, denn dieser Downwash fliesst nicht einfach gerade ab, sondern verwirbelt sich von den Flächenspitzen hinter dem Flugzeug und bildet sogenannte **Wirbelschleppen (wake turbulence)**, die mehrere Minuten bestehen und damit für andere Flugzeuge extrem gefährlich sein können: Gerät man mit einem leichten Flugzeug in solch einen Wirbel, so besteht die Gefahr, dass man innerhalb eines Augenblicks sehr stark um die Längsachse rollt und sogar abstürzen kann! Darum ist Respekt vor grösseren Flugzeugen gesünder... Der FS simuliert dies allerdings noch nicht.

2.3.4 Der Propeller – eine kleine Tragfläche

Propeller sind vom Prinzip her **kleine Tragflächen**, nur dass sie **senkrecht zur Flugrichtung** stehen. Sie werden durch den Motor über eine Propeller-/Kurbelwelle angetrieben. Weil sich der Propeller dreht, wird er durch die Luft bewegt und kann so eine Strömung am Profil aufbauen, was Auftrieb mit sich bringt. Der Auftrieb saugt ihn dann „nach vorne“, also in Flugrichtung und weil das ganze Flugzeug am Propeller hängt, bewegt sich das Flugzeug mit. Bei kleineren Flugzeugen (und somit auch kleineren Propellern) liegt der normale Drehzahlbereich bei 2300 bis 2600 **Umdrehungen pro Minute (RPM)**. Handelt es sich um grössere Kaliber, so liegt die maximale Drehzahl deutlich niedriger (Saab 340B: 1498 RPM max). Man kann nämlich einen Propeller nicht beliebig schnell drehen lassen. Zum einen entstehen sehr grosse Fliehkräfte, die aus strukturellen Gründen ein Limit setzen, zum anderen erreichen die Propellerblätter schnell den Bereich der Schallgeschwindigkeit, ab dem sie keinen Auftrieb, sondern nur noch Lärm erzeugen. Man kann sich das so vorstellen, dass die Luftteilchen zu träge sind, um überhaupt noch um den Propeller strömen zu können.

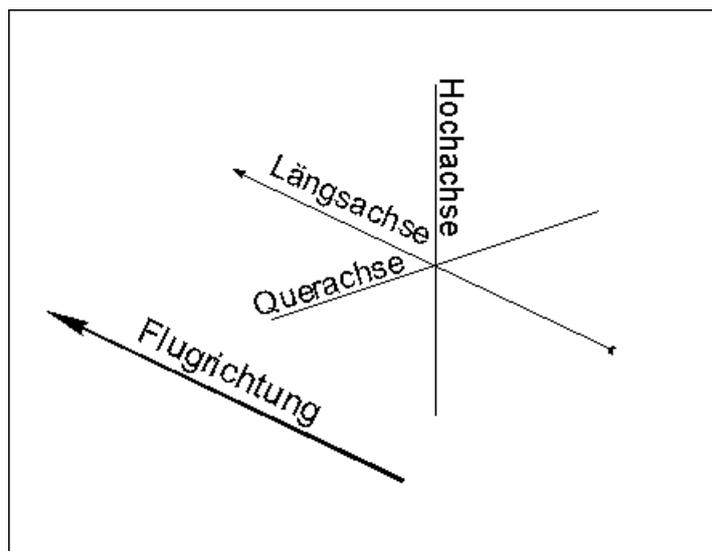
2.4 Die Steuerung

Wie steuert man nun so ein Flugzeug, was geschieht da?

2.4.1 Die drei Achsen

Ein Flugzeug kann um **3 Achsen** gesteuert werden:

- **Längsachse:** Sie verläuft vom Heck des Flugzeuges genau zur Spitze des Flugzeuges, man kann also um diese Achse die Flügel nach rechts oder links kippen oder auch **rollen** (Englisch: **roll**). Darum wird sie auch die **Rollachse** genannt – sie wird mit den Querrudern gesteuert.
- **Hochachse:** Diese Achse verläuft genau im Lot durch das Zentrum der Maschine. Steuert man um diese Achse, so dreht sich die Flugzeugnase nach rechts oder links und da man dieses drehen als **gieren** (Englisch: **yaw**) bezeichnet, nennt man sie auch **Gierachse**. Die Steuerung erfolgt mit dem Seitenruder am Heck.
- **Querachse:** Schliesslich befindet sich die Querachse genau in den Tragflächen und zwar zwischen der linken und rechten Flügelspitze. Bewegungen um diese Achse werden mit dem Höhenruder ausgeführt, man **nickt** das Flugzeug (Englisch: **pitch**), darum heisst sie **Nickachse**.



Diese 3 Achsen stehen alle exakt senkrecht aufeinander

Die entsprechenden Ruder werden im simpelsten Fall vom Cockpit aus direkt per **Seilzug** gesteuert. Eine andere Methode besteht darin, dass mit den Seilzügen **Hydraulikmotoren** betätigt werden, an denen die Ruder montiert sind. Dies ist schon bei mittelgrossen und relativ schnellen Flugzeugen notwendig ist, da hier die Ruderkräfte sehr gross werden.

Bei ganz modernen Flugzeugen (Airbus 320/330/340, Saab 2000, B777 etc.) erfolgt die Steuerung dieser Hydraulikmotoren sogar nicht mehr über Seilzüge sondern über **elektrische Impulse**. Dieses **Fly-By-Wire** hat den Vorteil, dass es weniger fehleranfällige Mechanik hat und weniger wiegt. Der Nachteil ist unter anderem, dass man ein Fluggefühl simulieren muss, da die Piloten keinen direkten Input mehr von Ruder zurückbekommen (z.B. grössere Ruderkräfte bei hoher Geschwindigkeit).

2.4.1.1 LÄNGSACHSE – QUERRUDER

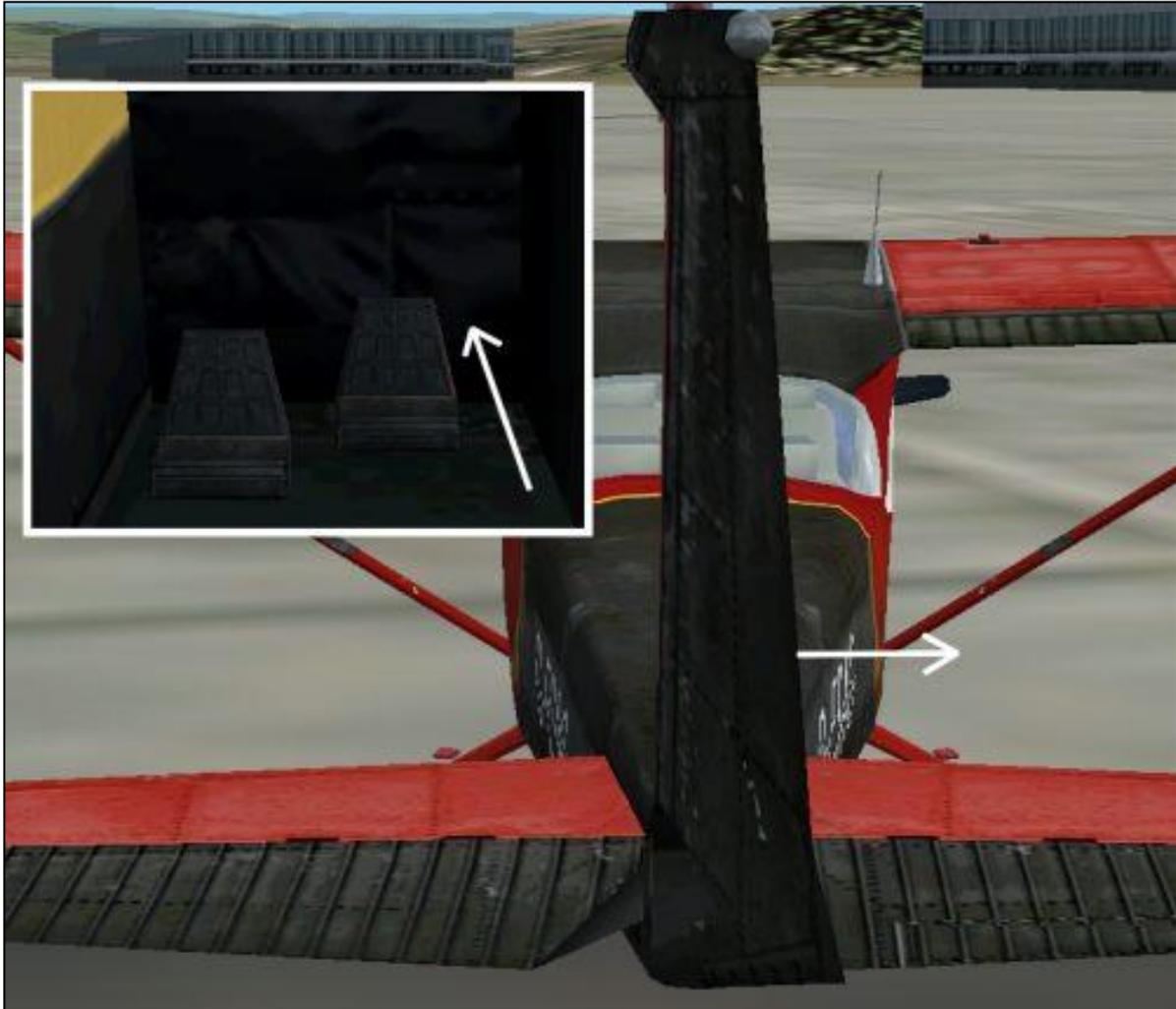
Um die Längsachse steuert man vom Cockpit, indem man das Steuerhorn nach rechts oder links dreht. Doch was geschieht da genau? Dabei werden die Querruder betätigt, die sich jeweils an der rechten und linken Flügelhinterseite befinden. Drehe ich das Steuerhorn nach rechts, bewegt sich das rechte Querruder nach oben, während das linke Querruder in genau umgekehrter Richtung, nach unten, ausschlägt. Hier müssen wir uns wieder Newton/Bernoulli in Erinnerung rufen: Weil auf der rechten Seite nun die Luftteilchen auf der Unterseite einen längeren Weg als auf der Oberseite haben, entsteht ein Auftrieb auf der Unterseite des Flügelteils – der rechte Flügel senkt sich. Auf der linken Seite ist es genau umgekehrt: Weil das Querruder nach unten ausgeschlagen wird, erhöht sich die Wölbung und der Weg auf der Oberseite wird noch länger als er vorher schon war – der linke Flügel hebt sich!



Diese Bewegung – Flügel hebt bzw. senkt sich – dauert so lange an, bis die Querruder wieder in die Neutralstellung genommen werden. In der Praxis bedeutet das für uns, dass wir das **Steuerhorn** nur **solange** nach rechts oder links **drehen, bis** wir die **gewünschte Querlage erreicht** haben, **danach** bringen wir es **wieder** in die **Fast-Neutralstellung** zurück. **Fast** rührt daher, dass Flugzeuge aerodynamisch stabil sind und sich von selber ganz langsam wieder aus der Querneigung herausdrehen und genau dieser Tendenz muss man mit einem sehr kleinen Querruder-Input in Kurvenrichtung entgegenwirken, solange man in der Kurve verbleiben will. Das ist aber noch nicht alles: Zum einen ist der **Auftriebsverlust** auf dem sich senkenden Flügel ist grösser als der Auftriebsgewinn des entgegengesetzten Flügels. Ausserdem wird das Flugzeug durch die **Fliehkräfte (Zentrifugalkraft)** schwerer (es wird also mehr Auftrieb benötigt). Schliesslich wirkt der Auftrieb nicht mehr senkrecht nach Oben, sondern geneigt in Kurvenrichtung: Die tatsächliche Komponente, die das Flugzeug hebt, wird kleiner! Als Folge senkt sich bei Erhöhung der Querneigung die Flugzeugnase! Um den darauf folgenden Höhenverlust zu verhindern, ist es **notwendig** beim Einkurven auch **gleichzeitig** ein wenig **am Steuerhorn zu ziehen**, um diesem Moment entgegenzuwirken. Beim Ausleiten der Kurve hebt sich die Nase wieder, weil der Gesamtauftrieb zunimmt (Fliehkraft nimmt wieder ab, Querruder beeinflussen nicht mehr die Aerodynamik), also müssen wir wieder ein wenig am Steuerhorn drücken.

2.4.1.2 HOCHACHSE – SEITENRUDER

Als nächstes betrachten wir nun die **Hochachse**: Um die Flugzeugnase nach rechts oder links zu drehen, müssen wir im Cockpit die **Fusspedale** bewegen. Tritt man in das linke Pedal bewegt sich die Nase nach links und tritt man ins rechte Pedal, so wandert die Nase nach rechts. Dies geschieht, weil durch das Treten der Pedale das **Seitenruder** am Heck der Maschine ausgeschlagen wird und dort durch eine Erhöhung des „seitlichen“ Auftriebs das Heck der Maschine in eine Richtung bewegt wird. Wer jetzt denkt, dass er doch alle Kurven nur mit dem Seitenruder fliegen könne irrt! Leider wandert die **Nase** wieder **zur Ausgangsposition** zurück, wenn man die Pedale, und somit das **Seitenruder**, wieder **neutral stellt**.



Wozu hat man denn nun das Seitenruder überhaupt?

Hier müssen wir uns noch einmal die Querruder anschauen: Wir haben gesehen, dass die Querruder verschieden starke Auftriebsgewinne und –verluste hervorrufen. Genauer betrachtet verursacht das nach **unten ausschlagende Querruder** einen **höheren Widerstand als** das **nach oben ausschlagende**, was den **Flügel** auf der **Kurvenaussenseite abbremst!** Wenn man also das Querruder nach rechts ausschlägt, rollt die Maschine zwar nach rechts, aber die Nase bewegt sich – interessanterweise – nach links! Hier kommt jetzt das Seitenruder zum Einsatz. Will ich eine Rechtskurve fliegen, so muss ich nicht nur das Steuerhorn nach rechts drehen und leicht am Höhenruder ziehen, nein, ich muss sogar noch ein wenig das **Seitenruder** nach rechts **bewegen**, also ins rechte Pedal treten. Dies nennt sich dann **koordinierter Kurvenflug**.

Wendezeiger – Turn Coordinator

Wie stellt man nun fest, ob man koordiniert kurvt? Im Cockpit gibt es dafür ein Instrument, welches sich **Wendezeiger** oder auch **Turn Coordinator** nennt. Dieses Instrument stellt ein Flugzeugprofil und eine Art Kugel in einem gebogenen Röhrchen dar. Das kleine Flugzeug bewegt sich bei Kurven mit und zeigt die Drehrate an. Fliegt man erst einmal geradeaus, so steht es in der Mitte, die beiden Tragflächen sind gegenüber der beiden Striche an der Skala. Dreht man nun z.B. nach rechts bis zu einer bestimmten Querneigung erreicht man, dass eine Tragfläche des kleinen Flugzeugs am nächsten Strich der Skala ankommt. Dies bedeutet, dass sich unser Flugzeug nun in einer **Standardkurve** befindet, die mit einer Drehrate von **3 Grad pro Sekunde** definiert ist. Also benötigen wir einen **Vollkreis exakt 2 Minuten**, würden wir diese Drehrate beibehalten! (360° geteilt durch 3° pro Sekunde = 120 Sekunden = 2 Minuten).

Diese seltsame Kugel im Wasserbad nennt sich **Libelle** und zeigt uns hingegen das sogenannte **Scheinlot** an. Wenn diese Kugel genau in der Mitte zwischen den zwei Markierungen liegt, so zeigt die Fliehkraft genau nach unten parallel zur Hochachse. Im Kurvenflug soll dies genauso sein, ansonsten schiebt (über-/untersteuert) man und fliegt aerodynamisch gesehen nicht gerade optimal.



In der Grafikreihe sieht man von links nach rechts folgendes: Erst wurde geradeaus geflogen, dann eine Kurve nach rechts nur mit dem Querruder eingeleitet. Jetzt haben wir zwar die korrekte Drehrate eingenommen, aber die Kugel befindet sich weit rechts von der Mitte. Da die Regel sagt **Die Kugel treten**, treten wir mal ein wenig in das rechte Pedal und zentrieren so die Kugel wieder. Voilá, geht doch!

Man muss das **Seitenruder** solange etwas **gedrückt halten**, bis die **Kurve wieder ausgeleitet** wird, die Libelle muss in der Mitte bleiben.

Bugradsteuerung

In Kleinflugzeugen sind die Pedale des Seitenruders im Normalfall auch direkt mit dem Bugrad verbunden, was die Steuerung beim Rollen am Boden ermöglicht solange die Geschwindigkeit nicht gross genug ist, um mit Hilfe der Ruderkräfte zu steuern. Bei grösseren Maschinen ist es dagegen mit den Pedalen nicht oder nur beschränkt möglich, das Bugrad zu steuern. Dort geschieht dies dann mit Hilfe eines **Handsteuers (tiller)** im Cockpit, das über eine Hydraulik das Bugrad entsprechend dreht. Im FS kann man eine B747 trotzdem direkt mit dem Seitenruder lenken.

Yaw Damper

Weiterhin existiert auf grösseren Flugzeugen ein sogenannter **Yaw Damper**, also ein „Schwingungsdämpfer“, der dem Piloten die Bedienung des Seitenruders abnimmt und für einen koordinierten Flug sorgt.

2.4.1.3 QUERACHSE – HÖHENRUDER

Schliesslich befassen wir uns noch mit der **Querachse**, die wir durch Ziehen und Drücken des Steuerhorns beeinflussen. Dabei bewegen wir das **Höhenruder** am Heck der Maschine und erhöhen, bzw. verringern den Auftrieb dieses kleinen Flügels, was ein Senken oder Heben selbigens zur Folge hat – die **Flugzeugnase nickt** nach oben oder unten.

Wie wir schon bei der Besprechung der Längsachse gesehen haben, benötigt man das Höhenruder unter anderem in Kurven.

2.5 Auftriebshilfen und Auftriebsvernichter

Da Tragflächen, die grossen Auftrieb erzeugen, auch einen relativ hohen Widerstand mit sich bringen (je dicker ein Flügel, desto mehr Auftrieb aber auch Widerstand erzeugt er), werden die **Tragflächen** von Reiseflugzeugen **auf den Schnellflug ausgelegt** (dünnes Profil). Dies hat aber den Nachteil, dass sie in dieser Form für den **Langsamflug nicht geeignet** sind, weshalb man gezwungen ist Auftriebshilfen anzubringen, die den Start und die Landung ermöglichen.

Das Prinzip dieser Auftriebshilfen besteht darin, die Wölbung der Tragflächen zu verstärken und die Flügelfläche zu vergrössern. Dazu benutzt man **Landeklappen (Flaps)** und **Vorflügel (Slats)**. Die **Landeklappen** sind am **hinteren Ende der Flügel (trailing edge)** angebracht, während die **Vorflügel** an der **Vorderkante (leading edge)** ausgefahren.



Für den Start müssen diese Klappen im Normalfall **teilweise ausgefahren** werden, um den **bestmöglichen Auftrieb** zu erzeugen. Werden sie **voll ausgefahren**, wie hier im Bild, so erzeugen sie nicht nur mehr Auftrieb, sondern ab einer gewissen Stellung auch einen höheren Widerstand, den man für den **Langsamflug** ebenfalls braucht, um im **Anflug genug Triebwerksleistung** setzen zu können und um **bei der Landung** besser abbremsen zu können.

Nach dem **Aufsetzen** werden auch die **Bremsklappen (Spoiler)** ausgefahren, die den **restlichen Auftrieb vernichten** und das Flugzeug auf die Bahn drücken. Diese Spoiler fahren bei vielen Typen beim Aufsetzen **automatisch** aus und müssen dafür gegebenenfalls vorbereitet werden, indem sie beim Anflug „**gearmed**“ werden.



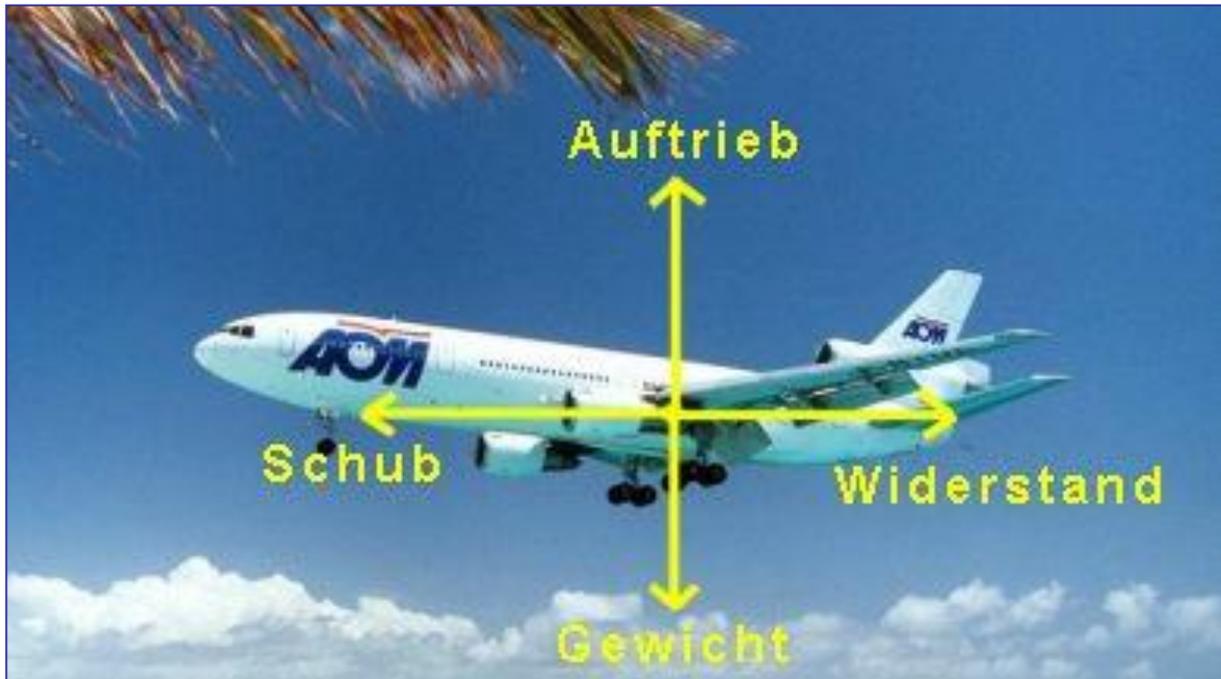
Wenn **keine** dieser **Klappen ausgefahren** sind, so ist der Flügel **sauber** oder auch **clean**. Die kleinste Geschwindigkeit, die man so fliegen kann und darf, nennt sich **Minimum Clean Speed** ($V_{\text{minimum clean}}$).



2.6 Die vier Kräfte

An einem Flugzeug walten **vier Kräfte**:

- **Schub & Widerstand**
- **Auftrieb & Gewicht**



Dem **Schub**, der durch das oder die Triebwerke entwickelt wird, **wirkt der Luftwiderstand entgegen**.

Die Schubkraft ist in die Flugrichtung gerichtet, der Luftwiderstand gegen die Flugrichtung. Der **Widerstand** nimmt mit dem **Quadrat der Geschwindigkeit** zu, d.h. dass er sich vervierfacht, wenn die Geschwindigkeit verdoppelt wird. Darum benötigt man bei bereits hohen Geschwindigkeiten unverhältnismässig viel mehr Schub, um nur ein wenig zu beschleunigen. Besonders knapp unter der Schallgeschwindigkeit (Mach 1) geht der Widerstand stark in die Höhe, fällt aber nach Überschreiten von Mach 1 wieder signifikant ab. Der Widerstand verbleibt dann aber doch noch leicht über dem Widerstand eines Fluges unter Mach 1 (z.B. bei M.80 = 80% der Schallgeschwindigkeit). Flugzeuge, die im Überschallbereich unterwegs sind, benötigen die starken Triebwerke nur, um dieses Widerstandsmaximum um Mach 1 überschreiten zu können. Hat man diese Schwelle überschritten, kommt man mit weitaus weniger Schub aus.

Am Flügel entsteht der **Auftrieb** den wir benötigen, um überhaupt fliegen zu können. Dieser Auftrieb gleicht nämlich unser Eigengewicht aus. Hier ist zu beachten, dass das scheinbare Eigengewicht nicht konstant ist! Auf einen **ruhenden Körper** wirkt eine Erdbeschleunigung von genau **1g** was in unseren Breitengraden ca. **9,81 m/s²** entspricht. Fliegt man Kurven oder bewegt man das **Flugzeug** relativ schnell um die **Querachse**, so erfährt das Flugzeug eine **Beschleunigung – die Zentrifugalkraft erhöht oder verringert** sich. Dadurch wird das Flugzeug scheinbar schwerer oder leichter. Zum Beispiel erfährt man in einer Kurve mit 60 Grad Querneigung bereits eine Beschleunigung von 2g, das Gewicht des Flugzeugs verdoppelt sich, es wird also auch doppelt soviel Auftrieb benötigt!

Die Formel lautet

$$\frac{1}{\cos(\text{Querneigung})}$$

Dies ist auch der Grund, warum ein Flugzeug in einer Steilkurve früher einen Strömungsabriss/Stall erfährt, als wenn es einfach geradeaus fliegt.

2.7 Geschwindigkeitsdefinitionen

Wir haben nun gesehen, dass es diverse Geschwindigkeitsdefinitionen gibt. Alle Geschwindigkeiten haben ihre eigene kleine Abkürzung und Bezeichnung, wir wollen hier uns die wichtigsten Abkürzungen zu Gemüte führen.

Allgemein werden in der Luftfahrt die Geschwindigkeitsangaben in Knoten (knots, kts) gemacht. Weiterhin ist zu beachten, dass uns das Geschwindigkeitsmessgerät immer eine sogenannte **Angezeigte Geschwindigkeit (Indicated Airspeed, IAS)** anzeigt, die **nur auf Meereshöhe** der **wahren Geschwindigkeit (True Airspeed, TAS)** entspricht. Bei höheren Flughöhen wiederum sind Flugzeuge nicht nach der IAS sondern nach der Schallgeschwindigkeit als Machzahl (mach speed, Schallgeschwindigkeit = Mach 1.00) limitiert, welche in Prozent angegeben wird. M.80 sind z.B. 80% von Mach 1.

Genauere Informationen dazu finden sich im Kapitel Instrumente → Geschwindigkeitsmesser.

V_s V_{stall}	Stallgeschwindigkeit	Die minimale Geschwindigkeit, bei der die Tragflächen gerade noch genug Auftrieb liefern, um das Flugzeug in der Luft zu halten
V_1	Entscheidungsgeschwindigkeit Decision speed	Diese Geschwindigkeit wird nur bei mehrmotorigen Flugzeugen für den Startvorgang benötigt, da ein einmotoriges Flugzeug keine Möglichkeit hätte, bei einem Triebwerksausfall einfach weiterzufliegen. Bei V_1 muss spätestens die Entscheidung zum Abbruch des Startvorgangs gefallen sein und die ersten Handlungen zum Abbremsen eingeleitet worden sein (Schub zurücknehmen, Bremsen, Spoiler ausfahren...). Bei einem Triebwerksausfall bei V_1 oder später muss der Start fortgesetzt werden
V_R V_{rotate}	Rotationsgeschwindigkeit Rotation speed	Bei V_R wird die Nase des Flugzeuges hochgenommen, es wird „rotiert“. Daraufhin sollte das Flugzeug abheben. V_R ist also die minimale Geschwindigkeit, bei der es sicher ist, abzuheben
V_2	Takeoff Safety Speed	Erleidet man einen Triebwerksausfall nach V_1 und ist man somit gezwungen, den Start fortzusetzen, muss man mit dieser Geschwindigkeit steigen. Sie ist so berechnet, dass man einerseits nicht zu langsam ist, um noch zu fliegen, aber auch nicht zu schnell ist, um keine Einbussen in der Steigrate hinnehmen zu müssen. Kurz: V_2 ist die Geschwindigkeit für den steilsten Steigwinkel, also um so schnell wie möglich eine sichere Höhe zu erreichen
Generell gilt $V_1 \leq V_R \leq V_2$		

Zwei wichtige Geschwindigkeiten für **mehrmotorige** Flugzeuge

V_{MCG}	Minimum Control Speed Ground	Dies ist die kleinste Geschwindigkeit , mit der es möglich ist, bei einem Ausfall des kritischsten Triebwerkes , den Start nur mit Benützung der aerodynamischen Steuerung sicher weiterzuführen . Wenn also das kritischste Triebwerk (bezogen auf das kritischste Moment, das durch seinen Ausfall auftritt) ausfällt, ist man bei Unterschreitung der V_{MCG} nicht mehr in der Lage, die Richtung des Flugzeuges zu halten, weil die einseitige Schubkraft die aerodynamischen Kräfte des Seitenruders übersteigen
V_{MCA}	Minimum Control Speed Air	Sie ist der V_{MCG} sehr ähnlich, nur ist sie auf den Flug bezogen. Wenn man im Flug mit einem Triebwerk die V_{MCA} unterschreitet, reichen die aerodynamischen Ruderkräfte nicht mehr aus, um den einseitigen Schub auszugleichen. Bei kleineren mehrmotorigen Flugzeugen beschränkt man sich auf die Angabe einer einfachen V_{MC} , ohne „Ground“ oder „Air“ näher zu definieren. Sie wird dort als rote Linie am unteren Ende des Geschwindigkeitsbandes markiert

V_X	Geschwindigkeit für den steilsten Steigwinkel Best angle of climb speed	Allgemein gilt $V_X < V_Y$, denn mit V_X erreicht man auf der kürzesten Strecke am meisten Höhe . Startet man also von einem Flugplatz, an dessen Pistenende Hindernisse überflogen werden müssen, so fliegt man nach dem Abheben solange mit V_X bis man sicher über dem Hindernis ist
V_Y	Geschwindigkeit für die beste Steigrate Best rate of climb speed	Fliegt man mit V_Y so erreicht man innerhalb kürzester Zeit eine grosse Höhe . Allerdings ist V_Y immer grösser als V_X weshalb man eine längere Strecke zurücklegt, um die gleiche Höhe zu erreichen. V_Y ist die Geschwindigkeit, bei der die Tragflächen den grössten Auftrieb erzeugen und an manchen Geschwindigkeitsmessgeräten mit einer blauen Linie markiert
V_{MO}	Maximale operationelle Geschwindigkeit Maximum operating speed	Die Geschwindigkeit, die am oberen Ende der Geschwindigkeitsskala steht, schneller darf nicht geflogen werden. Sie beinhaltet allerdings noch eine gewisse Sicherheitsmarge.
M_{MO}	Maximale operationelle Machgeschwindigkeit Maximum operating mach speed	Ähnlich wie V_{MO} , nur dass das Limit hier mit einer maximalen Machzahl definiert ist
<i>Beispiel: Beim ERJ145 sind die Limite $V_{MO} = 320$ KIAS / $M_{MO} = M.78$. Darüber ist das Geschwindigkeitsband rot gefärbt</i>		

V_{NE}	Never exceed speed	Diese Geschwindigkeit wird bei Kleinflugzeugen als Maximalgeschwindigkeit angegeben. Sie ist durch einen roten Strich am oberen Ende der Geschwindigkeitsskala markiert. Sie darf auf keinen Fall überschritten werden
V_A	Manöver- geschwindigkeit Maneuvering speed	Gerät man in starke Turbulenzen so ist man bei dieser Geschwindigkeit sicher. Wie erinnern uns, dass durch starke vertikale Beschleunigungen (Zentrifugalkraft) das Flugzeuggewicht stark zunehmen kann und ist man starker Turbulenz ausgesetzt erfährt man solche Beschleunigungen (positiv wie negativ), die umso stärker werden, je schneller man fliegt. Um einerseits sicher vor dem Stall (zu langsam) als auch vor Strukturschäden zu sein (Überbeanspruchung des Flugzeuges durch hohe positive wie negative g-Kräfte), wurde diese Geschwindigkeit berechnet
V_{F0}	Minimale Geschwindigkeit ohne Auftriebshilfen Flaps Zero Speed Minimum Clean Speed	Die Geschwindigkeit, bei der man ohne Auftriebshilfen (Flaps/Slats) noch sicher fliegen und manövrieren kann. Sie darf nicht unterschritten werden.
V_{REF}	Referenz- geschwindigkeit Reference speed	Die Geschwindigkeit, mit der bei einem definierten Flap-Setting die Landebahnschwelle überflogen werden muss. Vor der Landebahnschwelle fliegt man V_{REF} inklusive einer Korrektur für den Wind , mögliches Eis am Flugzeug und andere Abnormalitäten (falls ein Triebwerk ausgefallen ist, die Landeklappen nicht korrekt ausgefahren werden konnten etc.). Im Normalfall errechnet sich die Windkorrektur aus der Hälfte des „Headwind“ (die Komponente des Windes, die einen genau von vorne anströmt) und dem vollen „Gust“ (Differenz zwischen durchschnittlichem Wind (mean wind) und den Böenspitzen (gusts))
<p><i>Beispiel: V_{REF} für volle Landeklappen ist mit 132 IAS angegeben. Der Wind wird vom Tower mit „160 degrees, 15 kts, gusting up to 25 kts“ gemeldet. Wir nehmen mal an, dass der Wind genau von vorne kommt, also addieren wir die Hälfte vom Durchschnittswind – rund 8 kts – und addieren den vollen Gust – 10 kts – und erhalten so eine Korrektur von 18 kts, die wir zur V_{REF} addieren müssen. Das Ergebnis nennt sich dann V_{MFA}</i></p>		
V_{MFA}	Minimale Endanflug- geschwindigkeit Minimum final approach speed	Diese Geschwindigkeit müssen wir mindestens bis kurz vor Erreichen der Landebahnschwelle einhalten. Erst über der Schwelle dürfen/müssen wir V_{REF} fliegen. Wichtig: An der Schwelle darf man wiederum nicht zu schnell sein, sonst verlängert sich die Landestrecke erheblich!
<p>Formel: $V_{MFA} = V_{REF} + \text{Wind} (= \text{half the headwind} + \text{full gust}) + \text{technische Korrekturen}$</p>		

3. TRIEBWERKE

Allgemein – und vereinfacht betrachtet – unterscheidet man zwischen drei Triebwerksarten:

- Kolbentriebwerke
- Strahltriebwerke
- Turboprop-Triebwerke

3.1 Kolbentriebwerke

Sie sind meist Viertakt-Boxermotoren älterer Generation - dafür sind sie robust und zuverlässig. Modernere Flugzeuge haben seit neuestem auch Diesellaggregate eingebaut, die deutlich effizienter und leiser arbeiten.

Im Normalfall sitzt der **Propeller direkt** auf der **Kurbelwelle** und wird somit direkt vom Motor angetrieben. Hier ist die Drehzahl der Kurbelwelle gleich der Drehzahl des Propellers.

Einen solchen Motor steuert man vom Cockpit mit zwei Hebeln, dem:

- **Gas (Throttle)**: Dieser Hebel ist **schwarz** und lässt sich hereindrücken (mehr Leistung bis Vollgas) und herausziehen (weniger Leistung bis Leerlauf). Am Boden sollte man ihn nach dem Anlassen bei ca. 1000 RPM einstellen und dort lassen, solange man nicht mehr Gas geben muss. Leerlauf sollte vermieden werden.
- **Gemisch (Mixture)**: Dieser Hebel ist **rot** und regelt die Benzinzufuhr und das Luft-Benzingemisch, welches in die Brennkammern eingespritzt wird. Zieht man ihn ganz heraus, so befindet er sich in der **cut-off**-Position, was einen kompletten Stop der Benzinzufuhr zur Folge hat. Ganz hereingedrückt liefert er ein maximal fettes Gemisch aus Luft und Benzin. Zwischen maximal fett und cut-off lässt er sich nun stufenlos bewegen und das Gemisch regeln. Wozu braucht man das? Nun, wenn man mit dem Flugzeug auf grössere Flughöhen steigt, so nimmt die Luftdichte ab. Es befinden sich also weniger Luftteilchen pro Volumen in der Luft als am Boden. Aber dem Gemisch wird immer noch wie am Boden konstant eine absolute Menge an Benzin zugesetzt. Wird das Gemisch aus Luft und Benzin aber zu fett, so kann es mangels Sauerstoff nicht mehr optimal zünden. Das heisst, man muss etwas Benzin wegnehmen (**leaning**), um wieder ein optimales Gemisch zu erzielen. Zu diesem Zweck hat man nun die **EGT-Anzeige (Exhaust Gas Temperature, Abgastemperatur)** im Cockpit: Ein fettes Gemisch hat eine niedrigere Temperatur, als ein verarmtes (geleantes) Gemisch. Beim **besten Gemisch** erreicht man ein **Temperaturmaximum (temperature peak)**, nimmt man noch mehr Benzin weg (=zieht man den roten Hebel noch weiter heraus) hat dies zur Folge, dass die Temperatur wieder fällt, weil nun zu wenig Benzin da ist und das Gemisch wieder nicht richtig zünden kann. Hat man nun diesen „Peak“ erreicht, schiebt man den Mixture-Hebel wieder ein wenig hinein, um das Triebwerk nicht zu heiss laufen zu lassen. Normalerweise senkt man die Temperatur um zwei bis vier Striche auf der Skala des EGT, also um 75° bis 100° F.

Nun gibt es bei stärkeren Kolbenmotoren noch die Möglichkeit, dass man zwischen Kurbelwelle und Propeller ein Getriebe einbaut. So hat man die Möglichkeit die Drehzahl des Propellers unabhängig von der Motorleistung zu setzen, was einige Vorteile mit sich bringt: Da ein Propeller wie ein kleiner Flügel funktioniert ist auch dieser für einen bestimmten Geschwindigkeitsbereich optimiert. Ändert man aber den Anstellwinkel des Propellers zur Luft (man zöge sozusagen am Propeller-Höhenruder...), so kann man erreichen dass der Propeller sich für die jeweilige Flugphase am besten anpasst. Und genau dies tut man mit solchen **Constant Speed Propellers**. Beim Start stellt man den Propeller auf eine kleine Steigung (kleiner Anstellwinkel zur Luft) und erreicht somit, dass er sich in kleinen Abständen in die Luft „ingräbt“ → hohe Propeller-RPM (**max RPM**), beste Beschleunigung. Im Steigflug nimmt man dann die Drehzahl leicht zurück und stellt eine festgelegte **Steigdrehzahl (climb RPM)** ein.

Erreicht man nun die Reiseflughöhe, so stellt man die **Reisedrehzahl (cruise RPM)** ein und erreicht damit, dass der Propeller einen etwas höheren Anstellwinkel hat. Somit erreicht man, dass er sich besser in den Luftstrom stellt und weniger Widerstand erzeugt, was zu einer höheren Fluggeschwindigkeit führt, als wenn man mit maximaler Drehzahl fliegen würde. Er legt pro Umdrehung eine grössere Strecke zurück.

Die Gemisch- und Leistungseinstellung ist hier ein wenig anders als bei einem Motor ohne Getriebe. - es verhält sich ähnlich wie ein Autogetriebe. Man muss also **zuerst** ein wenig **Gas herausnehmen, bevor** man die **Propellerdrehzahl reduziert** (sozusagen in einen höheren Gang schalten), ansonsten könnte man das Getriebe überlasten (zu untertourig). Die Leistung des Motors kann auch nicht mehr anhand der Drehzahl ermittelt werden, weil ja die Propeller-RPM unabhängig vom Motor läuft. Daher gibt es eine **Ladedruckanzeige (Manifold Pressure)** im Cockpit, die einen Wert in **InHg** (Inches of Mercury) angibt. Als Faustregel bei Kleinflugzeugen gilt: Ladedruck niemals grösser als ein Hundertstel der Drehzahl. Klingt kompliziert, ist aber nicht schwer. Will man die Prop-Drehzahl auf 2300 RPM reduzieren, so muss man zuerst soviel Gas herausnehmen, bis man maximal 23 inHg Ladedruck angezeigt kriegt.

Die Propellereinstellungen nimmt bei so ausgerüsteten Flugzeugen mit dem **Propeller Handle** vor, der normalerweise **blau** ist und sich zwischen Gas- und Gemisch-Hebel befindet. In der vorderen Position ist er auf max RPM (kleinste Propellersteigung, START), ganz nach hinten gezogen auf grösster Steigung (dort sollte er nie hinbewegt werden, da dies zu einer Überbeanspruchung des Getriebes führt, als ob man mit einem Auto im fünften Gang aus Stand anfahren will).

Kolbentriebwerke laufen normalerweise mit AVGAS (100 Oktan verbleit) oder Super Plus, die neueren Dieselmotoren mit JET-A1 (Kerosin).

3.2 Strahltriebwerke

Dieser Typ von Triebwerk ist für **hohe Geschwindigkeiten** entwickelt worden, da Propeller bei hohen Geschwindigkeiten stark an Effizienz verlieren und dort nicht mehr einsetzbar sind.

Das Prinzip der Strahltriebwerke ist sehr einfach: Im Innern eines solchen Triebwerks sitzt eine Gasturbine (Gasturbinen besitzen einen sehr hohen Wirkungsgrad, d.h. Umsetzung von Treibstoff in kinetische Energie!), die den **Fan**, eine Art Propeller am Triebwerkseingang, antreibt, der für Luftdurchsatz und so den Grossteil des Schubes sorgt. Die Gasturbine an sich besteht aus drei Sektionen:

- Kompressor
- Brennkammer
- Turbine

Der **Kompressor** besteht aus mehreren Reihen von Schaufelradkränzen, die durch Drehung Luft von vorne ansaugen, komprimieren und dann in die Brennkammer leiten. Schon durch diese Kompression erwärmt sich die Luft stark auf über 250°C. Aus diesem Teil wird **Zapfluft (Bleed Air)** entnommen, die unter anderem für die Belüftung der Kabine und für das Anti-Ice benötigt wird.

Die komprimierte Luft gelangt nun in die **Brennkammer**, wo ihr das Kerosin durch Zerstäuber beigemischt wird. Dieses Gemisch zündet von selbst aufgrund der hohen Temperatur der komprimierten Luft und erzeugt eine Flamme, die um die 2000°C heiss ist.

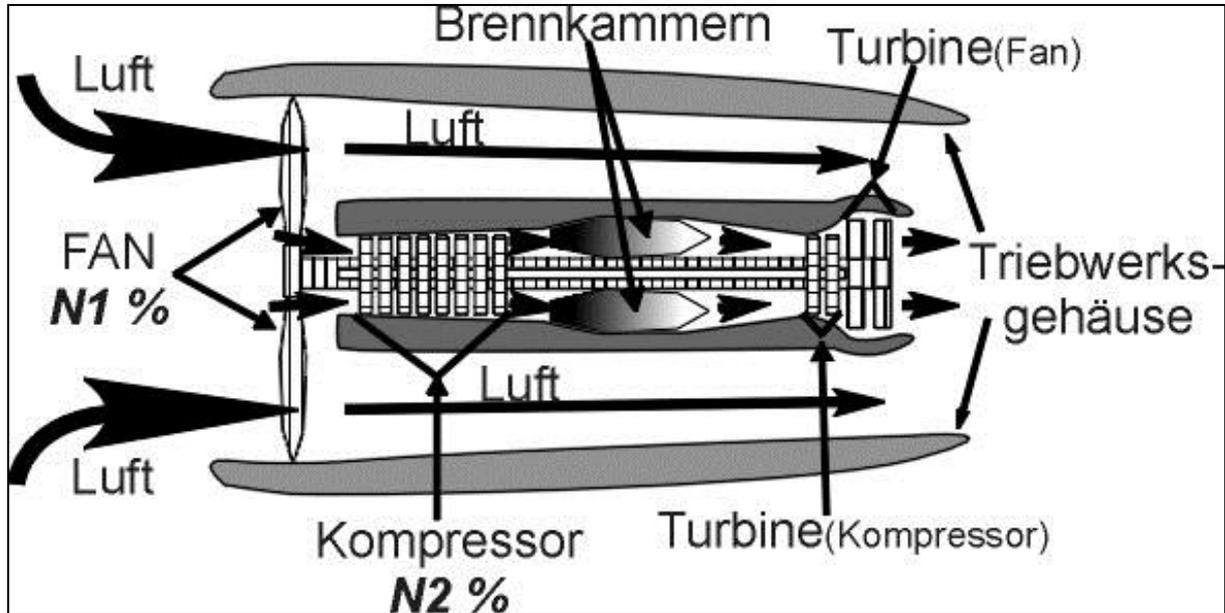
Diese Heissluft erzeugt nun durch die Ausdehnung einen Impuls, der das Flugzeug anschiebt (actio = reactio) und sie selbst entweicht aus der Brennkammer nach hinten in die Turbine. Die **Turbine** besteht, ähnlich wie der Kompressor, aus mehreren Schaufelradkränzen und wird nun von dieser heissen Luft aus der Brennkammer angetrieben (in Drehung versetzt). Diese Turbine sitzt auf einer Welle zusammen mit dem Kompressor, was zur Folge hat, dass die austretende Heissluft über die Turbine den Kompressor antreibt – die Gasturbine ist also ein sich selbst erhaltendes System! Man muss nur Kerosin hinzugeben und es läuft von selber!

Wie ist das nun mit dem **Fan**? Der Fan sitzt auch auf einer Welle. Diese Welle ist ebenfalls mit einer **Turbine** verbunden, welche direkt hinter der Turbine der Gasturbine sitzt, sodass die restliche Heissluft (die gerade die Turbine des Kompressors angetrieben hat) noch über diese Turbine strömt und somit den Fan bewegt! Der Fan verdichtet ebenfalls Luft, von der allerdings nur ein relativ kleiner Teil (20-40%) in die Gasturbine geleitet wird – der grösste Teil (ca. 60-80%) wird durch das Triebwerksgehäuse geleitet und erzeugt den Hauptanteil des Triebwerksschubs (siehe Grafik).

Fazit: Man betreibt primär die Gasturbine, welche nebenher den Fan antreibt.

Zündkerzen werden bei diesem Typ von Motor nur benötigt, um das Triebwerk zu starten, danach werden sie – ähnlich wie bei einem Dieselmotor – abgeschaltet, weil das Gemisch selbst zündet.

Überraschend: Strahltriebwerke sind strenggenommen auch Viertakter! Wie kommt das? Strahltriebwerke arbeiten im gleichen Arbeitsrhythmus wie ein Viertakt-Kolbenmotor, nur dass die einzelnen Stufen dieses Arbeitsvorgangs räumlich von einander getrennt ablaufen. Beide Triebwerkstypen komprimieren Luft, verbrennen sie und erzeugen durch diesen Vorgang kinetische Energie zum Antrieb einer Welle.



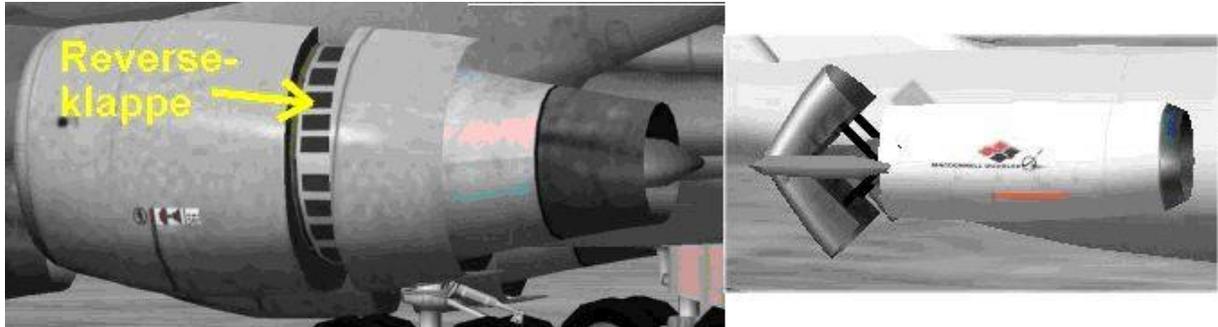
Im Cockpit finden sich dann auch nur wenige Bedienhebel. Das Triebwerk wird primär lediglich über den/die **Schubhebel (Thrustlever)** gesteuert. Eine Gemischsteuerung entfällt, ebenso muss keine Propellerdrehzahl eingestellt werden. Lediglich zum Anlassen/Abschalten eines solchen Triebwerks ist ein **Condition Lever** installiert. Er hat nur zwei Stellungen: **ON** und **OFF / Cut-Off**. Zum Anlassen stellt man ihn auf ON, zum Abstellen auf OFF / Cut-Off. Ansonsten findet man noch einen Startknopf für jedes Triebwerk, um den Anlassvorgang zu beginnen. Dazu wird die Gasturbine in Bewegung versetzt, um einen Luftstrom zu erzeugen. Ist dieser ausreichend stark, öffnet man die Benzinzufuhr (Condition Lever) und die Zündung sollte ein Übriges tun, um die Verbrennung zu starten. Hat die Gasturbine eine ausreichend hohe Drehzahl erreicht, können der Anlasser und die Zündung abgeschaltet werden, das Triebwerk läuft nun von selbst. Die **Leistung** eines Triebwerks setzt man anhand seiner **Umdrehungszahl**, und zwar in **Prozent**. Es hat einerseits die Umdrehungszahl des **Fans (N1 %)**, als auch die des **Gasturbinen-Kompressors (N2 %)**. Eine weitere Methode ist die Angabe des **EPR (Engine Pressure Ratio)**, was die Differenz zwischen Druck am Triebwerkeingang und Triebwerksausgang ist. Auch dieser Wert ist proportional zum geleisteten Schub.

Moderne Flugzeuge mit Elektronischer Triebwerksteuerung nehmen einem sogar diese ganze Arbeit ab. Sogenannte FADECs (Full Authority Digital Engine Control) steuern alle Vorgänge, weshalb man im Cockpit nur den Startknopf drücken/umlegen muss und zusehen kann wie das Triebwerk startet.

Die Vorteile eines Strahltriebwerkes liegen damit auf der Hand

- hohe Effizienz
- die Gasturbine arbeitet autark, benötigt zum Betrieb keine Zündkerzen
- weniger strukturell hoch belastete Teile im Triebwerke (keine Zylinder, Pleuel, Ventile...)
- einfache Bedienung des Triebwerkes

Die meisten Triebwerke verfügen über ein Klappensystem, welches den Piloten ermöglicht bei der Landung den Schubstrahl gegen die Rollrichtung zu lenken – den **Umkehrschub (Reverse Thrust)**. Hierfür gibt es mehrere Möglichkeiten: Man schliesst am Triebwerksende zwei Halbkappen oder man öffnet auf halber Triebwerkslänge das Gehäuse und blockiert in dessen Inneren den Luftstrom der vom Fan erzeugt wird, sodass diese Luft durch das offene Gehäuse in die Gegenrichtung entweichen kann und einen Gegenimpuls (Schub) erzeugt.



3.3 Turboprop-Triebwerke

Turboprop-Triebwerke sind nun eine Konstruktion aus einer Gasturbine mit einem Propeller anstatt einem Fan. Hier überwiegen wieder die Vorteile: einfache Bedienung, hohe Effizienz, einfache Konstruktion.

Die Turbinenwelle, die beim Strahltriebwerk den Fan antreibt, endet bei dieser Art Triebwerk in einem Getriebe, über welches der Propeller angetrieben und dessen Steigung geregelt wird (Constant Speed Propeller). Im Cockpit befinden sich dafür zwei Hebel mehr und zwar **Prop-Lever**, die sehr ähnlich wie beim Kolbentriebwerk funktionieren. Meist sind Condition- und Prop-Lever in einer Einheit zusammengelegt. Sind diese Hebel ganz nach hinten gezogen, so sind in der Position Cut-Off. Ein kleines Stück darüber bringt man sie in die Position ON zum Anlassen des Triebwerkes. Ist das Triebwerk angelassen, kann man die Condition-Levers weiter nach vorne in einen Bereich schieben, in dem sie die Propellerdrehzahl steuern (kleine Steigung, grosse Steigung).

4. SYSTEME

In diesem Abschnitt beschäftigen wir uns mit den wichtigsten Systemen eines Flugzeuges.

- Elektrik
- Hydraulik
- Druckkabine
- Enteisung

4.1 Elektrik – Electrical System

Prinzipiell sind fast alle Flugzeugtypen nach dem gleichen Prinzip konstruiert. Eine oder mehrere Batterien bilden die letzte mögliche Quelle, um das Flugzeug mit Strom zu versorgen. Allerdings sind diese Batterien relativ klein, verglichen mit der Menge der zu versorgenden Geräte. Da man aber keine riesigen Batterien einbauen kann (Gewicht, Grösse) ist vorgeschrieben, dass ein Flugzeug für mindestens 15 Minuten von Batterien betrieben werden kann, was ausreicht, um eine Notlandung durchzuführen. Diese Zeitspanne kann natürlich verlängert werden, je mehr nicht benötigte Verbraucher abgestellt werden.

Nimmt man in einem abgeschalteten Flugzeug Platz und will einen Flug beginnen, so beginnt dies mit dem Einschalten der Batterie(n). Nun hat man nur wenig Zeit, um auf eine andere Weise Strom zu produzieren.

Bei Kleinflugzeugen ist man gezwungen, das Triebwerk zu starten, denn hier geschieht die Stromproduktion ausschliesslich durch den Generator des Motors. Darum sollte man erst dann das Cockpit „starten“, wenn man wirklich bereit ist, kurz danach loszurollen.

Flugzeuge ab der Mittelklasse (ATR, Saab 340, Dornier 228/328) verfügen über die Möglichkeit, eine externe Stromquelle anzuschliessen. Diese nennt sich **GPU (Ground Power Unit)** und liefert die nötige Spannung, um den Flug vorzubereiten, ohne ein Triebwerk laufen lassen zu müssen. Das Anlassen der Triebwerke erfolgt hier mit einem sogenannten **Starter-Generator**. Dies ist ein Generator, der über eine Welle mit der Turbinenwelle verbunden ist und Strom produziert solange das Triebwerk läuft (weil er über die Welle gedreht wird). Steht das Triebwerk, kann man nun einfach andersherum diesen Generator unter Strom setzen (mit dem Strom der GPU) und so den Triebwerkskompressor in Bewegung setzen, um das Triebwerk zu starten. Ist der Startvorgang abgeschlossen, liefert der Starter-Generator wieder Strom und die GPU kann abgestellt/ausgestöpselt werden.

Flugzeuge grösseren Kalibers besitzen nicht nur einen GPU-Anschluss sondern sind auch mit einer sogenannten **APU (Auxiliary Power Unit)** ausgestattet. So eine APU ist meist im Heck dieser Flugzeuge angebracht und ist prinzipiell eine kleine Gasturbine, die mit einem Generator Strom produziert und auch **Zapfluft (Bleed Air)** zur Verfügung stellt. APU's werden benutzt, um an Flughäfen, an denen es keine GPU gibt, das Flugzeug mit Strom zu versorgen. Ausserdem benötigen die meisten Flugzeuge mit grösseren Triebwerken eine Bleed Air Quelle zum Anlassen der Triebwerke. Ein Starter-Generator wäre für grosse Triebwerke nicht möglich (aufgrund der grossen Masse), sodass man einfach mit der Bleed Air der APU ein kleines Schaufelrad am Triebwerkskompressor anbläst und so diesen in Drehung versetzt, um das Triebwerk zu starten. Die Triebwerke verfügen über einfache Generatoren, die nun die Stromversorgung des Flugzeuges übernehmen, sodass die APU abgestellt werden kann.

Bei längeren Standzeiten am Boden kann auch bei Flugzeugen mit APU eine GPU angeschlossen und die APU abgeschaltet werden, was teilweise sogar vorgeschrieben ist (Flughäfen geben dafür Regeln aus, die man in der AIP nachlesen kann. Zum Beispiel: *APU use maximum until at the gate and 5 minutes before push-back/engine start*).

Liefern das/die Triebwerk(e) nun Strom werden damit die Batterien konstant auf Maximalladung gehalten – sie sind also in Reihe geschaltet. Fällt ein Generator aus, so ist der verbleibende Generator (des anderen Triebwerks) normalerweise in der Lage, die Stromversorgung aufrecht zu erhalten. Zusätzlich kann im Flug noch die APU gestartet werden, um eine weitere Stromquelle zu haben und den verbliebenen Generator zu schonen.

Das elektrische System versorgt, je nach Flugzeugtyp, verschiedene Systeme. Offensichtlich ist, dass die Cockpitinstrumente damit betrieben werden. Ebenfalls auf der Hand liegt, dass auch die Beleuchtung der Maschine durch Strom sichergestellt wird. Bei den Landeklappen sieht es nun verschieden aus. Die Saab 340 betätigt die Flaps mittels Hydraulik während der doppelt so schwere Embraer RJ 145 diese mit Elektromotoren ausfährt. Bei Kleinflugzeugen wird sogar teilweise das Fahrwerk durch Elektromotoren bewegt.

4.2 Hydraulik

Wie wir im vorherigen Absatz gesehen haben wird mittels Hydraulik bei den meisten Flugzeugen der Landeklappenmechanismus in Bewegung gesetzt. Auch werden die allermeisten Fahrwerke durch Hydraulik betätigt – auch die Bugradsteuerung (nose wheel steering) hängt an diesem System. Ein weiteres Anwendungsgebiet der Hydraulik sind die Ruderklappen und Spoiler/Bremsklappen bei grösseren Flugzeugen, da die dort auftretenden Ruderkräfte sonst nicht mehr steuerbar wären. Schliesslich zählen auch noch die Bremsen zu den von der Hydraulik betätigten Systemen.

Fällt das Hydrauliksystem aus, so ist mit erhöhten Ruderkräften zu rechnen, denn im besten Fall unterstützt nur eine Hilfsturbine die Hydraulik. Auch muss man sich auf grössere Landerollstrecken einrichten – die Bremsen sind hydraulisch betätigt (verfügen aber über ein Notsystem) und normalerweise würden auch die Spoiler/Bremsklappen auf diese Weise ausgefahren und fehlen nun! Ein weiteres wichtiges Detail: Die Klappen am Triebwerk, die den Umkehrschub ermöglichen, hängen auch an der Hydraulik!

Befindet man sich in solch einer Situation sollte man auf die Trimmung und unterschiedlichen Triebwerksschub zurückgreifen, um das Flugzeug zu steuern.

4.3 Druckkabine

Je höher man in der Atmosphäre steigt, desto geringer wird der Luftdruck: Auf etwa 5500m / 18000ft beträgt der Luftdruck nur noch die Hälfte des Drucks am Boden und schon auf 11000m / 36000ft ist er auf ein Viertel des Bodendrucks gefallen. Der menschliche Organismus benötigt aber einen gewissen Luftdruck, um richtig zu funktionieren (Sauerstoffpartialdruck für die Atmung). Er kann geringeren Druck bis auf eine Höhe von etwa 2500m / 8000ft problemlos ausgleichen, steigt man aber deutlich darüber hinaus, so reicht es von den ersten Reaktionen wie höherer Atemfrequenz, höherem Puls, Müdigkeit, Euphorie (bei ca. 6000m / 20000ft) bis hin zu Bewusstlosigkeit, Übelkeit und Tod (ab 8000m / 26000ft) durch Sauerstoffmangel.

Aus diesem Grund ist es notwendig für solche Flughöhen einen Druck aufzubauen, der ausreichend ist, um dem Körper genug Sauerstoff mit dem richtigen Druck zu liefern. Dafür sind Flugzeuge mit einer Druckkabine ausgerüstet, die mit Zapfluft (Bleed Air) aus den Triebwerkskompressoren aufgeblasen wird. Bevor diese Bleed Air allerdings in die Kabine geleitet wird (man erinnere sich an die hohe Temperatur der Zapfluft) wird sie in der Klimaanlage (Pack) auf die richtige Temperatur gebracht. Durch ein kontrolliertes Ablassen der Luft kann man nun den Druck der Kabine regulieren, da ja von den Triebwerken oder der APU immer Bleed Air geliefert wird.

Im Falle eines Druckabfalls muss man allerdings schnell reagieren: Auf mittleren Höhen 5000-7000m / 18000-23000ft hat man noch komfortabel Zeit, hier beträgt die sogenannte TUC (Time of Useful Consciousness) mehr als 10 Minuten. Die TUC ist die Zeit vom Druckverlust bis zum dem Moment an dem die ersten Symptome der geistigen Verwirrung auftreten (Euphorie, Übelkeit, Bewusstlosigkeit). Befindet man sich jedoch auf 37000ft oder höher, so schrumpft diese Zeit auf wenige Sekunden zusammen! Es bleibt gerade noch Zeit, um sich selber mit Sauerstoff zu versorgen und einen steilen Sinkflug einzuleiten, um in weniger lebensfeindliche Höhen zu gelangen. Normalerweise wird in solch einem Fall auf 10000ft abgesunken – es sei denn dies wird durch Berge verhindert, hier dürfte man lediglich auf die veröffentlichte MEA (Minimum Enroute Altitude) sinken.

4.4 Enteisierung

Wie wir im Kapitel Aerodynamik gesehen haben, kann Eisansatz an den Flügeln gefährlich werden, weil dies die Stallgeschwindigkeit und das Gewicht erhöht.

Es gibt verschiedene Möglichkeiten, sich gegen Eis zu wehren. Man muss nun unterscheiden zwischen **Anti-Ice** und **De-Ice**.

- **Anti-Ice:** verhindert Eisansatz
- **De-Ice:** entfernt vorhandenes Eis

Anti-Ice wird für sensible Systeme angewandt, zum Beispiel für die Sensoren (Pitot-Rohr, AOA-Sensoren) an der Aussenhaut, die kein Eis ansetzen dürfen, weil dies sonst zu Fehlmessungen mit möglichen katastrophalen Folgen führen kann.

De-Ice benutzt man für die Tragflächen, das Höhenruder, das Seitenruder und die Triebwerke. Genauer gesagt werden hier nur die Vorderkanten dieser Flächen von Eis befreit, da man im Flug lediglich dort Eis aufbaut (der Luftstrom mit den Eis-/Wassermolekülen „schlägt“ dort ein). Flugzeuge mit leistungsstarken Triebwerken, können es sich leisten, etwas von deren Bleed Air zu benutzen. Die heisse Luft wird bei ihnen in die Vorderkanten der Flügel, Ruder und Triebwerkeinlässe geleitet, die dort im Inneren aus einem Metall bestehen, welches von vielen kleinen Kapillaren durchsetzt ist. Durch die Kapillaren strömt nun die heisse Luft und erwärmt so diesen Teil des Flugzeugs, was zum Abschmelzen des Eises führt.

Kleinere Flugzeuge (vorwiegend Turboprop) mit schwächeren Triebwerken benutzen hingegen ein anderes System: Die Vorderkanten der Ruder werden von einer **dünnen Gummischicht** überzogen (**boots**), in welche man Luft blasen kann, sodass sich diese aufwölben. Dadurch platzt das Eis ab und kann entfernt werden. Die Triebwerkeinlässe werden mittels elektrischen Stroms enteist: Dort sind Gummimatten ausgelegt, welche von vielen kleinen Drähten durchzogen sind, die sich erwärmen, sobald man sie unter Strom setzt.

Propellerblätter werden ebenfalls elektrisch beheizt um hier angesetztes Eis zu entfernen, es handelt sich also um ein De-Ice-System.

5. INSTRUMENTE

Es wird nun Zeit, endlich mal einen genaueren Blick in das Cockpit zu werfen. Was für Instrumente finde ich dort? Was sind das für Uhren und Bildschirme?

5.1 Künstlicher Horizont – ADI – Attitude and Direction Indicator

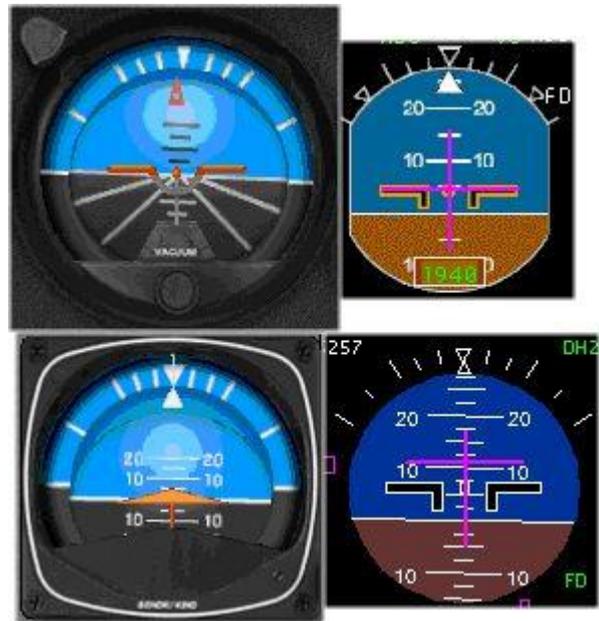
Um ohne Sicht nach draussen fliegen zu können, benötigt man einen künstlichen Horizont. Das Instrument beruht auf dem Prinzip, dass drehende Kreisel raumstabil sind. Das bedeutet, dass in dem Instrument ein Kreisel angebracht ist, der sich mit sehr hoher Geschwindigkeit dreht. Dadurch verhält er sich stabil im Raum. Das heisst einmal angedreht, behält er seine Position bei, das Instrument dreht sich samt Flugzeug praktisch um ihn herum, weil er so aufgehängt ist, dass er nicht mitgezogen wird (Kardanrahmen, kardanische Aufhängung).

Es gibt verschiedene Versionen von ADIs, die aber im Prinzip alle gleich funktionieren. Bei Flugzeugen mit EFIS dreht sich auch ein Kreisel, nur wird seine Position im Raum graphisch dargestellt.

Allen diesen Instrumenten sind die Skalen gemeinsam, anhand deren die aktuelle Schräglage und die Attitude feststellbar ist. Das kleine Dreieck auf dem Horizont zeigt in der oberen Skala die aktuelle Schräglage an, wobei die Striche 0°, 10°, 20°, 30°, 60° und 90° in jede Richtung anzeigen. Bei den beiden Modellen auf der rechten Seite sieht man sogar eine 45°-Markierung.

Bei der Attitude sind die Teilstriche entweder in 2,5°- oder 5°-Schritten angebracht. Lange Teilstriche zeigen volle 10°-Winkel an, mittellange Striche stehen für 5° und kurze Striche sind, wo vorhanden, für 2,5° eingezeichnet.

Die mechanischen Modelle werden durch Unterdruck angetrieben, die durch eine kleine Vakuumpumpe (suction pump) erzeugt wird.



5.2 Geschwindigkeitsmesser – IAS – Indicated Airspeed

Wir haben uns schon die Geschwindigkeitsdefinitionen zu Gemüte geführt, weshalb wir hier diese nicht wiederholen.

Was ist Geschwindigkeit? Erinnern wir uns an Bernoulli. Es ist der dynamische Luftdruck durch den Fahrtwind! Diesen kann man allerdings nicht direkt messen, weil gleichzeitig auch noch der statische Druck mitgemessen wird. Darum wird die Geschwindigkeit eines Flugzeuges mit einer Vorrichtung gemessen, die sich **Pitotrohr** nennt. Das Pitotrohr ist eine dünne Metallröhre, die genau im Luftstrom steht und so am Flugzeug angebracht ist, dass sie keine Anzeigefehler liefert (keine Verwirbelungen oder Abschattungen durch andere Bauteile). Die Luft die vorne einströmt wird mit einem Schlauch zum Geschwindigkeitsmessgerät geleitet und dort in einer kleinen Metalldose gestaut (darum heisst dieses Rohr auf Deutsch **Staurohr**). Nun haben wir aber den Gesamtdruck gemessen (dynamischer + statischer Druck). Daher befindet sich in dieser Metalldose eine weitere Metalldose, in welcher der aktuelle statische Druck herrscht. Diese zweite Dose ist durch einen Schlauch mit der Aussenhaut des Flugzeuges verbunden, und ist so angebracht, dass sie einfach nur den statischen Luftdruck in der aktuellen Umgebung des Flugzeugs aufnimmt. Je nach der Stärke des dynamischen Drucks wird nun die kleine Dose mit dem statischen Druck verschieden stark eingedrückt, was gemessen und dann angezeigt wird: **Die angezeigte Fluggeschwindigkeit, Indicated Airspeed, IAS.**

Betrachten wir nun schnell die Formel Bernoullis ist schnell ersichtlich was hier mechanisch passiert:

$$P_D = P_G - P_S$$

Der dynamische Druck ergibt sich aus der Differenz zwischen Gesamtdruck und statischem Druck, das Problem lässt sich also mathematisch lösen und wird mit dem Messgerät mechanisch umgesetzt!

Die IAS hat allerdings einen **Nachteil**: Sie entspricht nur in Bodennähe der wahren Fluggeschwindigkeit! Der Grund: Das Messgerät ermittelt den dynamischen Druck, der auf einer bestimmten Menge von Luftteilchen beruht, die den Luftdruck erzeugen (und die Metalldose eindrücken). Steigt man nun mit dem Flugzeug nimmt der Luftdruck und somit die Luftdichte ab, weshalb auch weniger Luftteilchen die Metalldose im Messgerät eindrücken. Die gemessene Geschwindigkeit (IAS) ist also viel kleiner als die wahre Geschwindigkeit, die sich **True Airspeed TAS** nennt. Pro **1000 ft Höhendifferenz** erhöht sich der **Messfehler** um **2%**, das heisst in 10000 ft liegt die TAS um 20% über der IAS! Zum Navigieren benötigt man aber die TAS, also muss man diese ermitteln. Dies geht einerseits per Rechnung oder – bei entsprechend ausgerüsteten Instrumenten – per TAS-Ring. Man kann mit einem kleinen Drehknopf eine Skala verschieben und die aktuelle Flughöhe und Lufttemperatur zusammenbringen. Ist dies getan, kann man im Geschwindigkeitsband unter der IAS auch die TAS ablesen.

Ein weiterer kritischer Punkt ist die doppelte Limitierung (V_{MO} und M_{MO}) von Flugzeugen. Flugzeuge sind für eine maximale IAS und eine maximale Machzahl zugelassen. Am Boden ist die IAS limitierender, da sie niedriger als die aus der M_{MO} resultierende TAS ist. Hierzu muss man wissen, dass die Schallgeschwindigkeit nicht immer gleich ist! Je kälter die Luft ist, desto langsamer ist der Schall. Also ist Mach 1 auf Meereshöhe wesentlich schneller als auf 37000ft!

Die dazugehörige Formel lautet

$$\text{Mach 1 (kts)} = 38.97 * \sqrt{T}$$

Bei T handelt es sich um die absolute Temperatur in Grad Kelvin! 0 Kelvin = $-273^\circ\text{C} \rightarrow 0^\circ\text{C} = +273$ Kelvin. Herrschen also heute $+20^\circ\text{C}$, so muss ich dieses Ergebnis um $+273^\circ\text{C}$ korrigieren, um T zu erhalten. Bei 20°C beträgt die Schallgeschwindigkeit also 667 kts. Auf FL370 bei -56°C dagegen beträgt sie gerademal 574 kts! Und angenommen unser Flugzeug ist für max. 320 KIAS und M_{MO} zugelassen, so können wir nachrechnen welche Geschwindigkeit auf FL250 limitierender ist. 320 kts IAS auf FL250 müssen in TAS umgerechnet werden, also korrigieren wir $25 * 2\% = 50\%$. Also entsprechen 320 kts IAS ca. 480 kts TAS. Auf FL250 herrschen -35°C , also ist dort Mach 1 = 602 kts TAS.

Unser Flugzeug ist aber auf M_{MO} limitiert, also multiplizieren wir 602 mit 0.78 und erhalten 469 kts TAS als Ergebnis. Also ist hier die M_{MO} schon begrenzender als die maximale IAS V_{MO} .

Es gibt nun verschiedenen Typen von Anzeigegeräten mit unterschiedlichen Markierungen und Anzeigebereichen.

5.2.1 Cessna 182

Ein sehr einfaches Gerät. Der grüne Bereich ist der normale **Betriebsbereich**, das untere Ende der **grünen Zone** ist die V_S . Am oberen Ende dieses Bereichs beginnt die **gelbe Zone**, der **Vorsichtsbereich**. Bei böigem Wetter muss er vermieden werden, da Überbeanspruchungen des Flugzeuges nicht ausgeschlossen werden können. Das obere Ende der Vorsichtsbereichs wird durch die **rote Linie** markiert: Dies ist die V_{ne} .

Das weisse Aussenband, welches sich von 40 kts bis ca. 95 kts erstreckt, bezeichnet den Bereich, in dem die Landeklappen ausgefahren sein dürfen. Will man schneller fliegen, müssen die Flaps eingefahren werden. An diesem Gerät finden wir auch einen TAS-Ring. Im oberen Bereich findet sich ein kleines Fenster mit einer Temperaturskala darüber und einer Höhenskala (in 1000ft-Schritten) im Inneren. Dreht man nun an dem Knopf links unten, so bewegt sich die Skala und man kann im Bereich zwischen 100 und 140 KIAS auf der weissen Skala die TAS ablesen.



5.2.2 Beechcraft Baron

Hier finden wir wie bei der Cessna 182 den weissen Flaps-Bereich, den grünen Normalbereich, die Vorsichtszone und auch am oberen Ende V_{ne} . Auch ein TAS-Ring ist vorhanden. Weiterhin finden wir hier noch die Markierungen für die V_{MCA} (roter Strich bei ca. 83 KIAS) und V_Y (blauer Strich).



5.2.3 Boeing 767, Boeing-Style

Hier sehen wir ein weiteres neues Feature: Den **Barber-Pole** (die **rot-weiss**-gestreifte Nadel).

Sie zeigt die V_{MO} und die M_{MO} an. Je höher man steigt desto kleiner wird die von ihr angezeigte Geschwindigkeit, wir erinnern uns an die Rechnung mit V_{MO} und M_{MO} . Da bei Flugzeugen solcher Grösse je nach Gewicht die V_{MCA} und V_Y variieren, werden sie für jedes Startgewicht ausgerechnet und mit den weissen **Speedbugs** markiert. Aufsteigend wären da V_{1s} , V_R und V_2 .



5.2.4 Moderne EFIS, Embraer RJ145

Flugzeuge mit moderner Avionik besitzen sogenannte EFIS. EFIS bedeutet **Electronic Flight Information System** und stellt die Daten auf Bildschirmen dar. So kann man auch die Geschwindigkeitsanzeige als ein Band darstellen und die wichtigen Markierungen entsprechend farbig eintragen.



5.3 Höhenmesser – Altimeter

Höhenmesser sind prinzipiell Druckmessgeräte, die auf einer kleinen Metalldose basieren, in der ein Vakuum herrscht. Je nach Umgebungsdruck dehnen sie sich ein wenig aus oder werden eingedrückt. Diese Dehnung wird mechanisch abgegriffen und dann auf dem Instrument per Zeiger angezeigt. Nun variiert aber der Luftdruck wegen dem Wetter, weshalb eine Anpassung an den jeweiligen lokalen Luftdruck erforderlich ist. Darum wird bei den Flugplatzwettermeldungen das QNH (Millibar bzw. Hectopascal) oder Altimeter Setting (In Hg) angegeben, welches dann unterhalb der Transition Altitude auf dem Höhenmesser gesetzt sein muss. Dies geschieht mittels eines Drehknopfes am Instrument, mit dem man den aktuellen Wert in dem kleinen Fenster eindrehen kann. Höhenmesser zeigen die Höhe in Fuss (Feet, ft) an. 1 Meter entspricht 3,28 Fuss. Mit dem aktuellen QNH zeigt der Höhenmesser eine **Höhe über Meeresspiegel (Mean Sea Level, MSL)** an. Über der Transitionaltitude stellt man den Standarddruck **QNE 1013.2 hPa / 29.92 IN HG** ein, wir kriegen nun eine **Druckhöhe (Pressure Altitude, PA)** angezeigt.



Weiterhin gibt es noch Radarhöhenmesser, welche die **Höhe über Grund (Above Ground Level, AGL)** angeben, auch **Radar Altitude (RA)** genannt.. Diese Instrumente werden für Präzisionsanflüge benötigt, weshalb man einen Altitude-Bug (orangenes Dreieck) auf den gewünschten Wert setzen kann. Bei einem EFIS-Instrument (unteres Beispiel) kann man ebenfalls über einen Drehknopf das Minimum einstellen, welches dann als blaue Zahl (100ft RA) dargestellt wird, während die aktuelle RA in grün (1940ft RA) abzulesen ist. Erreicht man nun diese Höhe leuchtet beim oberen Modell die Lampe „DH“ auf (links unter dem Wort OFF), bei der EFIS-Version erscheinen „MIN“-Aufschriften auf dem Bildschirm und eine Stimme ruft „Minimums, Minimums“.



5.4 Variometer – Vertical Speed Indicator – VSI

Das Variometer zeigt die vertikale Geschwindigkeit in Fuss pro Minute (feet per minute, ft/min, fpm) an. Technisch gesehen misst es die Geschwindigkeit der Druckveränderung und zeigt sie uns an (zweite Ableitung des Luftdrucks). Die Anzeige erfolgt aufgelöst in 100ft-Schritten. Man beachte die Skalierung, entweder direkt als Zahl im EFIS oder auf den Uhreninstrumenten je nach Aufschrift (Zahl 1 entspricht 1000ft ft/min, oder eine 10 entspricht 1000 ft/min).



5.5 Kurskreisel – Heading Indicator, Horizontal Situation Indicator – HDG/HSI

Um eine bestimmte Flugrichtung einzuhalten, benötigt man einen Kompass als Referenz. Nun ist aber ein **Schnapskompass sehr träge** und ungenau, sodass man auf die Idee kam, einfach einen Drehkreisel zu konstruieren, denn dieser ist (wie vom ADI bekannt) **raumstabil**. Nimmt man nun so einen Kreisel, bringt ihn an einer Aufhängung an, zeichnet auf dieser aussen die Gradzahlen eines Kompasses auf und richtet ihn auf Nord aus, so zeigt er immer in diese Richtung und nur das Flugzeug dreht sich um den **Kurskreisel**.



Zu beachten ist, dass die **Anzeige** eines Kurskreisels trotzdem langsam **driftet**. Dieser Fehler rührt von der Erddrehung her und soll jetzt hier nicht weiter erörtert werden. Auf dem Instrument oben links erkennt man zwei Drehknöpfe: PUSH und HDG. Mit PUSH ist es möglich, den Kurskreisel wieder neu auszurichten - man stellt ihn alle **30 Minuten** im **Geradeausflug** nach dem **Schnapskompass (oder Taste „D“ im FS)**. Mit **HDG** kann der orangene **Heading-Bug** eingestellt werden (im Moment bei ca. 320°).

Kurskreisel gibt es in verschiedenen Ausbaustufen. Einerseits gibt es den einfachen Kurskreisel (oben links). Dann gibt es noch ein sogenanntes **HSI** (links unten), welches im Kurskreisel eine VOR/ILS-Anzeige integriert hat. Eine genauere Besprechung davon findet sich bei NAV/ADF. Das HSI gibt es auch als EFIS-Version, wie ganz rechts zu sehen ist. HSI's müssen **nicht** nachgestellt werden. Bei diesem Instrument geschieht dies automatisch durch einen eingebauten Magnetfeldsensor (Flux-Valve), der die korrekte Ausrichtung nach Norden garantiert.



5.6 Thermometer – Thermometre

Man mag meinen, dass die Temperaturmessung trivial sei, doch man vergisst leicht, dass wir uns ja in einem Flugzeug befinden, welches sich durch die Luft bewegt und dabei dauernd mit den Gasmolekülen in unserer Atmosphäre zusammenstösst! Die sich daraus ergebende **Reibung** erzeugt einen **Messfehler**, den **Ram Rise**, der uns eine **höhere** Temperatur vorgaukelt, als Aussen wirklich vorherrscht. Die Teile der Flugzeugoberfläche, die von den Luftmolekülen getroffen werden, heizen sich auch entsprechend auf, zum Biespiel die Vorderkanten der Tragflächen, die Vorderkanten der Triebwerkseinlässe und natürlich die Flugzeugnase. So kam es, dass sich die Concorde im Überschallflug durch den **Ram Rise** um dutzende Zentimeter streckte.

Daraus folgt, dass wir zwischen verschiedenen Temperaturen unterscheiden müssen!

- **SAT – Static Air Temperature:** Dies ist nichts anderes als die aktuelle Temperatur der umgebenden Luft. Wird auch als **OAT** bezeichnet, die **Outside Air Temperature**.
- **TAT – Total Air Temperature:** Diese wird **direkt vom Temperaturfühler (temperature sensor)** an der Aussenhaut des Flugzeugs **gemessen** und ist die Bruttotemperatur. Sie ergibt sich aus der Summe von **SAT (Static Air Temperature)** und dem durch die Luftreibung erzeugten **Ram Rise**.

Steht das Flugzeug still und herrscht keinerlei Wind vor, so beträgt der Ram Rise exakt Null. Demnach wäre in dieser Situation die TAT identisch mit der SAT.

Je höher aber die Geschwindigkeit in Relation zur umgebenden Luft ist, desto grösser fällt der Ram Rise aus. Bei Verkehrsflugzeugen mit Reisegeschwindigkeiten um die 480 KTAS (Knots True Airspeed) liegt der Ram Rise bei ungefähr 20 Grad Celsius. Wurde der Ram Rise früher noch von der Crew mittels Drehscheibe ausgerechnet, erledigen diese Aufgabe heute fleissige Computer, die einem ständig die gemessene TAT und die berechnete SAT anzeigen.

Merke: Die SAT kann **nicht** direkt gemessen werden. Sie wird aus der Total Air Temperature und der aktuellen TAS des Flugzeugs rechnerisch ermittelt.

5.7 Wendezeiger/Libelle – Turn coordinator

Dieses Instrument wurde schon in der Sektion **Steuerung** besprochen. Um es nochmal genauer zu lesen, springe zurück zum Thema **Turn Coordinator**.

5.8 Stoppuhr – Chronometer – CLOCK

Wie wir noch im Flighttraining sehen werden, ist die Stoppuhr ein sehr wichtiges Instrument! Man benötigt sie, um korrekte Warteschleifen zu fliegen oder bestimmte Anflüge zu absolvieren. Es empfiehlt sich daher, sich mit diesem Instrument vertraut zu machen. Im Standardfall startet die Stoppuhr beim ersten Drücken auf den runden Knopf. Beim zweiten Drücken, stoppt die Uhr wieder. Wird der Knopf zum dritten Male betätigt, wird die Uhr wieder auf 0 zurückgesetzt.



5.9 Motorüberwachungsinstrumente – Engine Indications

Wie wir schon gesehen haben, existieren verschiedene Motortypen. Wie man sich denken kann, müssen daher jeweils verschiedene Parameter überwacht werden.

5.9.1 Kolbenmotor mit Propeller direkt auf der Motorwelle

Hier wird die abgegebene Motorleistung direkt über die Drehzahl geregelt, da der Propeller direkt auf der Motorwelle sitzt (siehe „Kolbentriebwerke“). Die Instrumente zur Überwachung des Motors sind unterteilt in verschiedene Bereiche wie Öl-, Treibstoffsystem, Generator-, Temperatur- und direkte Leistungsangaben.

Das Ölsystem (OIL) betreffend wird hier lediglich der Druck (PRESS = pressure) und die Öltemperatur (TEMP) angegeben. Nach dem **Anlassen** eines Triebwerkes gilt der **erste Blick** dem **Öldruck**, also dieses Instrument **merken!** Steigt der Druck nicht zügig an, so liegt es wohl an einem Problem und das Triebwerk sollte wieder abgeschaltet werden.

Über den Instrumenten des Ölsystems sehen wir hier die Treibstoffüberwachung. Links die Treibstoffmenge (QTY = quantity), einzeln pro Tank in Gallonen (gallons). Das Instrument rechts daneben zeigt in der linken Hälfte die EGT (Exhaust Gas Temperatur, Abgaslufttemperatur, jeder Teilstrich entspricht hier 25° Fahrenheit), die man zur Einstellung des Gemischs benötigt, sowie den Fuel Flow (Durchflussmenge, Verbrauchsangabe, Angabe in GAL/HR = Gallonen pro Stunde). Nicht alle Flugzeuge sind übrigens mit einem solchen Durchflussmessgerät ausgerüstet.

Unter diesem Instrument finden wir die Anzeige für den Unterdruck (VAC = Vacuum), der im grünen Bereich liegen sollte und die Ladespannung der Batterie (AMP = Amperes, in der Mitte ist „0“, darüber eine positive, darunter eine negative Spannung), also eine Anzeige ob der Generator funktioniert oder nicht, weil er direkt die Batterie lädt, die die Verbraucher versorgt. Also betreibt nicht der Generator die Verbraucher direkt, sondern die Batterie tut dies, die kontinuierlich nachgeladen wird.

Schliesslich sehen wir noch ganz unten den Drehzahlmesser, der Drehzahl (RPM = rotations per minute) der Motorwelle anzeigt, die ja auch gleichzeitig die Drehzahl des Propellers ist. Der grüne Bereich ist der normale Betriebsbereich, die rote Linie stellt die maximale Drehzahl dar, die nicht überschritten werden darf.



5.9.2 Kolbenmotor mit Verstellpropeller / Constant Speed Propeller

Die Überwachung eines Motors mit Verstellpropeller ist dem eines normalen Motors sehr ähnlich. Wir finden hier wieder die Öltemperatur und den Öldruck (oben links), rechts daneben die Unterdruckanzeige und die Ladespannung, wie gewohnt im einfachen Flugzeug. Darunter sehen wir die Propellerdrehzahl – und dies ist wirklich **nur** die Propellerdrehzahl. Links davon sehen wir nun den Unterschied: Neben dem Fuel Flow findet sich nun der Ladedruck (MAN PRESS = manifold pressure, siehe auch Kapitel „Triebwerke“), der für die Leistungseinstellung des Triebwerks genutzt wird. Ist die gewünschte Drehzahl einmal eingestellt (mit dem blauen Hebel im Cockpit), kontrolliert man die Motorleistung nur noch über dieses Instrument.



Nicht vergessen: Ladedruck \leq Prop-Drehzahl

5.9.3 Turboprop-Triebwerk

Hier ist wieder einiges anders, da es sich hier ja um einen Propeller handelt, der an eine Gasturbine angeschlossen ist. So müssen wir zum einen die Propellerdrehzahl und zum anderen die Parameter der Gasturbine überwachen.

Die Leistung an sich, die das Triebwerk über den Propeller liefert wird mit der „Torque“ angegeben.

Torque bedeutet soviel wie **Verdrehung** und wird an der Achse gemessen, die die Turbine am hinteren Ende des Triebwerks mit dem Propellergetriebe verbindet. Da der Propeller sich in die Luft hineindreht und dabei einen Widerstand erfährt, wird er etwas abgebremst, was eine gewisse Drehkraft auf seine Antriebsachse ausübt und die Achse wirklich mechanisch um ein paar Grad verdreht, weil ja die Turbine immer noch vom Abgasstrahl angedreht wird!

Diese Verdrehung wird gemessen und als Torque entweder in Prozent oder FT-LBS (feet-pound) angegeben – es ist also eine Kraft. Auf den hier abgebildeten Instrumenten sehen wir die Torque ganz oben links.



Darunter befindet sich die Anzeige der Prop-Drehzahl. Die mittleren zwei Instrumente übereinander zeigen uns die wichtigsten Daten der Gasturbine an: Oben zum einen die ITT (Interstage Turbine Temperature) die so ähnlich wie die EGT beim Kolbentriebwerk ist. Nur wird sie hier nicht erst im Abgasrohr gemessen sondern im Bereich der Turbinenschaufeln, wo die heisse Luft ihre Energie abgibt und die Turbinen antreibt. Die rote Markierung sollte nicht überstiegen werden sonst fliegt einem das Triebwerk um die Ohren... Das untere Instrument in der Mitte gibt uns Aufschluss über die Drehzahl der Gasturbine. Die Drehzahl wird als N_g (N = Geschwindigkeit, g = gas turbine) in Prozent angegeben und ist im Leerlauf bei ca. 50-65%, je nach Triebwerk. Ganz rechts oben sehen wir schliesslich wie es um den Öldruck und die Öltemperatur des Triebwerks bestellt ist, darunter die Anzeige für den Fuel Flow, hier in PPH (pounds per hour).

5.9.4 Strahltriebwerk

Beim Strahltriebwerk sieht es ähnlich wie beim Turboprop-Triebwerk aus. Man beachte hier, dass es sich um zwei Triebwerke handelt, weshalb alle Anzeigen doppelt vorhanden sind. Die Gasturbine wird anhand ihrer Drehzahl und der Abgastemperatur überwacht: N1 ist die Drehzahl des Kompressors in Prozent, EGT die Abgastemperatur. Andere Triebwerksmodelle zeigen anstatt der EGT eine ITT an.

Die Drehzahl des Fan wird als N1 angegeben und ist auch in Prozent abzulesen. Die Triebwerksleistung wird hier primär anhand der N1 gesetzt.

Ganz unten sehen wir noch den Fuel Flow (4.0 entspricht 4000 lbs/h).

Der rechte Teil zeigt wie gewohnt Öldruck, -temperatur und -menge (QTY = quantity) an.

Zusätzlich gibt es noch eine Vibrationsanzeige, um Unwichtigkeiten im Falle von Triebwerksproblemen aufzuspüren. Ganz unten befindet sich schliesslich noch die Information über das Hydrauliksystem – Druck und Menge an Hydraulikflüssigkeit zeigt es an.



5.10 NAV – COM - Radios

Unser Flugzeug ist mit Radioempfängern ausgestattet, die es uns zum einen erlauben mit Bodenstellen und anderen Piloten zu kommunizieren, sowie anhand von Navigationsradios zu navigieren. Genauere Hinweise zur Benutzung dieser Radios finden sich später in den entsprechenden Unterrichtsstunden zur Navigation im Kapitel [FLUGVERFAHREN](#).

Mit einem Steuergerät wie hier ganz oben, kann man die gewünschte Frequenz einstellen. Dies geschieht, indem man erst einmal mit dem schwarzen Drehknopf eine sogenannte **Standby-Frequency** auf den gewünschten Wert ändert und diese dann mit dem weissen Knopf (mit dem Doppelpfeil) in den Speicher hineinlädt. Würde ich also auf den weissen Knopf von COMM 1 drücken, so würde die Frequenz 124.85, die zur Zeit auf Standby ist, nach links springen und die neue aktive Frequenz werden, während die derzeit aktive Frequenz 122.80 nach rechts auf Standby gesetzt wird. So kann man eine neue Frequenz in Ruhe voreinstellen und dann aktivieren. Dasselbe Prinzip gilt für das NAV-Radio, das sich im gleichen Gerät auf der rechten Hälfte befindet.

Haben wir nun am NAV-Teil eine empfangbare Frequenz eingestellt, so können wir die entsprechende Information auf der VOR-Anzeige ablesen. Die beiden „Uhren“ mit den „weissen Linien“ sind solche Geräte, mit denen dies geschieht. Diese Geräte bestehen aus einem OBS-Ring (OBS = Omni-directional Bearing Selector), über den das gewünschte Radial des VOR eingestellt wird und die sogenannte Ablagenadel (deviation bar).



Ist eine sogenannte ILS-Frequenz eingestellt, kann man zwar das OBS auf einen beliebigen Wert einstellen, ändert damit aber nicht die Anzeige, da hier der Kurs von der Bodenstation fest auf den Landekurs eingestellt ist. Mehr Informationen dazu gibt es in den Kapiteln **FLUGVERFAHREN** und **GRUNDLAGEN**. Ist nun so ein ILS eingestellt, können wir auch Informationen über den vertikalen Flugweg empfangen, daher die zweite Anzeigenadel in der oberen „Uhr“. Das untere Gerät kann nur VORs empfangen, da hier keine zweite Nadel für vertikale Informationen vorhanden ist. Natürlich kann man dies auch digital darstellen. Im Beispiel sehen wir eine Kombination aus künstlichem Horizont und VOR/ILS-Anzeige. Die Skala auf der rechten Seite ist die vertikale Ablagezeige, darunter die horizontale Ablage.

Ein weiteres Gerät für die Navigation ist der **ADF – Automatic Direction Finder**. Wieder muss erst eine gültige Frequenz eingestellt werden, um eine Anzeige zu erhalten. Ist dies getan, so zeigt die gelbe Nadel des ADF in die Richtung der Station. Würde sie auf die „3“ zeigen, so hiesse das, dass wir um 30° nach rechts drehen müssen – die Nadel zeigt uns also eine Relativ-Peilung an. Zeigt die Nadel genau nach oben, fliegen wir auf die Station zu. In der momentanen Position, genau auf „E“ zeigend, empfängt das ADF keine Station und verbleibt starr an dieser Stelle. Die zu empfangenden Stationen nennen sich NDB – Non Directional Beacon – dies sind Radiostationen, die einfach ein Signal auf einer Mittelwellenfrequenz aussenden – man kann also auch mit diversen Radiostationen navigieren (SWR 1, RTL etc.).



Eine Kombination aus VOR- und ADF-Anzeige nennt sich **RMI – Radio Magnetic Indicator**. Mit den Knöpfen am unteren linken und rechten Rand ist es möglich die einfache und doppelte Anzeigenadel so zu programmieren, dass sie entweder zu einem VOR oder ADF zeigt. Es ist also möglich, mit dem Gerät nicht einfach nur zu einem ADF hinzuzuzeigen, sondern auch zu VORs, die man ja sonst mit Hilfe des OBS anfliegt.



Mit einem **DME – Distance Measuring Equipment** – kann man die Distanz des Flugzeuges zu so einer Station errechnen und darstellen lassen (aufgrund der Laufzeit des Signals). Meist sind solche DME-Stationen verknüpft mit einem VOR oder ILS und senden auf derselben Frequenz.

Auf dem hier dargestellten Gerät kann man auswählen zu welchem Radio das DME dargestellt werden soll: Man kann den Schalter bei R1 und R2 bewegen und so NAV Radio 1 oder NAV Radio 2 auswählen. Einige ILS-Stationen besitzen kein eigenes DME, sodass es nötig ist, ein DME auf dem jeweiligen Flugplatz separat einzustellen und dies dann separat darzustellen (ILS auf NAV 1, DME auf NAV 2).



Schliesslich gibt es noch den **Transponder**. Auf dem Gerät können Frequenzen zwischen 0000 und 7777 eingestellt werden, wobei gewisse Frequenzen reserviert sind. Dieses Gerät ist nötig, um den Fluglotsen die Arbeit zu erleichtern, da es das Radarsignal vom Boden aufnimmt und daraufhin Informationen über die aktuelle Flughöhe abstrahlt. So können Flugzeuge identifiziert werden, da ihnen bestimmte Transponder-Codes zugewiesen werden können.

