

7 Kraftstoffsystem

Fuel, ATA 28

7.1 Definition

Die Einheiten und Komponenten, die Kraftstoff speichern und damit die Triebwerke versorgen. Beinhaltet vom Triebwerk angetriebene Kraftstoffpumpen für Kolbenmotore, Tanks, Ventile, Förderpumpen etc. und die Komponenten die ein Ablassen des Kraftstoffes überbord ermöglichen. Beinhaltet Integraltanks und Flügelspizentanks, Leckerkennung und Abdichtung. Beinhaltet jedoch weder die Struktur der Integral- oder Flügelspizentanks noch die Schutzplatten der Kraftstoffzellen, die ... [Teil der Struktur sind] und beinhaltet weder die Messung des Kraftstoffstromes noch die Weiterleitung der Daten oder deren Anzeige, denn all dies wird abgedeckt ... [durch die Triebwerkssysteme]. (ATA 100)

7.2 Allgemeines zum Kraftstoffsystem

Kraftstoff wird auch Brennstoff oder Treibstoff genannt. Im Englischen wird einfach nur das Wort „fuel“ gebraucht. Im Bereich der Flugzeugsysteme wird auf Deutsch von Kraftstoff, Kraftstoffsystem, Kraftstoffpumpe ... gesprochen.

Aufgabe des Kraftstoffsystems ist die Bereitstellung der geeigneten Menge an sauberem Kraftstoff bei entsprechendem Druck während jeder Flugphase.

Das Kraftstoffsystem beinhaltet (**ATA 100**) alle Komponenten

- zur **Kraftstoffaufbewahrung** (fuel storage) (Tanks, Komponenten zur Tankbelüftung, Oberflügelbetankungsstutzen und Verschlüsse),
- zur **Kraftstoffverteilung** (fuel distribution) (alle Bauelemente die sich zwischen dem Tankstutzen und dem Tank sowie zwischen dem Tank und dem Engine Quick Disconnect befinden: Rohrleitungen, Pumpen, Ventile und Bedienelemente),
- zum **Kraftstoffschnellablassen** (fuel jettison) (Komponenten, die benötigt werden um Kraftstoff während des Fluges abzulassen)
- zum **Anzeigen von Kraftstoffparametern** (indicating) (Bauelemente, die verwendet werden, um die Menge, Temperatur und Druck des Kraftstoffs anzuzeigen).

Ohne die Kraftstoffversorgung wäre ein fortwährender Motorflug nicht möglich. Aus diesem Grund kann das Kraftstoffsystem, neben dem Flugsteuerungssystem und dem Fahrwerk, als unverzichtbar angesehen werden. Daher gibt es in den Zulassungsvorschriften für Verkehrsflugzeuge – den **CS-25** und **FAR Part 25** – viele Abschnitte zum Kraftstoffsystem. Die Vorschriften zum Kraftstoffsystem sind in CS 25.951 bis CS 25.1001 zu finden.

Alle Flugzeuge nutzen **Kraftstoff** der bei Umgebungsbedingungen flüssig ist und auf Kohlenwasserstoff basiert. Zu Forschungszwecken wurden Flugzeuge auch schon mit Wasserstoff oder Erdgas betrieben. Flugzeuge mit Kolbenmotoren verwenden *Benzin* (gasoline) mit hoher Oktanzahl. Üblicherweise wird AVGAS 100LL eingesetzt. Flugzeuge mit Strahltriebwerken verwenden hingegen *Kerosin* (kerosene). Abhängig vom Einsatzgebiet (zivil oder militärisch), werden verschiedene Arten unterschieden. Bei zivilen Anwendungen kommt gewöhnlich JET A-1 zum Einsatz. Tabelle 7.1 beinhaltet **Kraftstoffeigenschaften** die wichtig für die Kraftstoffsysteme der Flugzeuge sind.

Tabelle 7.1 Eigenschaften der Flugkraftstoffe

	AVGAS 100LL Benzin für Kolbenmotoren	JET A-1 Kerosin für Strahltriebwerke
Flammpunkt (Druck in Meereshöhe, nach Standardatmosphäre)	- 40 °C (- 40 °F)	+ 38 °C (+ 100 °F)
Dampfdruck (REID Standardbedingungen)	500 hPa (7.25 psi)	10 hPa (0.145 psi)
Dichte (bei 15 °C)	720 kg/m ³ (6.0 lb/USgal)	810 kg/m ³ (6.7 lb/USgal)
Heizwert	43.5 MJ/kg (18700 BTU/lb)	42.5 MJ/kg (18300 BTU/lb)

Der **Flammpunkt** (flashpoint) von Kerosin ist ausreichend hoch. Daher kann Kerosin bei einem Druck in Meereshöhe, als „sicherer Kraftstoff“ bezeichnet werden. Benzin hingegen, könnte sich leicht entzünden und bedarf daher einer vorsichtigen Handhabung.

Ab einer bestimmten Temperatur verdampft der Kraftstoff in den Rohrleitungen. Durch die entstehende Blasenbildung kann die Kraftstoffzufuhr zu den Triebwerken unterbrochen werden. Diesen Zustand bezeichnet man als *Vapor Lock*. Er muss offenkundig vermieden werden. Die Neigung eines Kraftstoffs zum Vapor Lock, wird über den **Dampfdruck** (vapor pressure) bestimmt.

Kraftstoff beinhaltet eine bestimmte Menge an Energie pro Masseneinheit. Dies wird auch als *spezifische Wärmekapazität* (specific heat) oder **Heizwert** (heat value) H bezeichnet. Der Kraftstofftank bietet eine begrenztes *Kraftstoffvolumen* V . Daher variieren die *Kraftstoffmasse* m und *Kraftstoffenergie* E eines vollen Kraftstofftank mit sich verändernder **Kraftstoffdichte** (fuel density) ρ :

$$m = \rho \cdot V$$

$$E = m \cdot H$$

$$E = \rho \cdot V \cdot H$$

Die Kraftstoffdichte, -menge und -energie die aufgenommen werden kann, nimmt mit steigender Temperatur ab. Für den Betrieb eines Flugzeugs ist die vorhandene Energiemenge an Bord von Bedeutung. Daher ist das *Anzeigen der Kraftstoffmasse* sinnvoll (im Gegensatz zum

Anzeigen des Kraftstoffvolumens). Nicht nur das Messen des Kraftstoffstandes und demzufolge des Volumens, sondern auch der Kraftstoffdichte sind daher vorgeschrieben.

Wasser kann **im Kraftstoff** entweder freibefindlich oder in gelöster Form enthalten sein. Wird Kraftstoff dem Tank entnommen, so gelangt Luft (mit bestimmter Feuchtigkeit) in den Tank. Mit sinkender Temperatur kondensiert das Wasser in der Luft und vermischt sich mit dem Kraftstoff. Bei Flügen in großen Höhen (niedrige Temperaturen) kann es passieren, dass sich Eiskristalle bilden, die die *Kraftstofffilter* (fuel filter) verstopfen können. Um das zu verhindern kann der Kraftstoff durch eine *Kraftstoffheizung* (fuel heater) erwärmt werden. Die Kraftstoffsysteme müssen im Stande sein, kritische Eisbedingungen auszuhalten, ohne dabei die Funktion zu gefährden (CS 25.951). Bei einem stationären Zustand des Flugzeugs sammelt sich Wasser an der tiefsten Stelle im Kraftstofftank, da die Dichte von Wasser (1000 kg/m^3) größer ist als die Dichte des Kraftstoffs. Aus diesem Grund müssen sich an den tiefsten Stellen im Tank – dem Sumpf – zugängliche *Wasserablassventile* (water drain valves) befinden (CS 25.971), um das Wasser aus dem Sumpf abzulassen.

Mikroorganismen (Bakterien oder Pilze) können sich **in Flugzeugkraftstofftanks** ansammeln. Diese Organismen leben und vermehren sich im angesammelten Wasser im Kraftstofftank und ernähren sich von den Kohlenwasserstoffen. Die Anhäufung der Mikroorganismen kann den Kraftstofffluss sowie die Füllstandsangabe stören und zur elektrolytischen Korrosion führen. Die Organismen bilden einen dunklen Schleim, der sich bevorzugt an den tiefsten Stellen des Kraftstofftanks sowie in unmittelbarer Nähe zu den Wasserablassventilen ansammelt. Regelmäßiges Ablassen des Wassers, sowie das Hinzugeben von Zusatzstoffen zum Kraftstoff kann das Ansammeln von Mikroorganismen verhindern.

Ein **unbeabsichtigtes Entzünden** des Kraftstoffs muss auf jeden Fall verhindert werden. Aus diesem Grund schreibt CS 25.954 vor, dass das Kraftstoffsystem so ausgelegt werden muss, dass ein Entzünden des Kraftstoffdampfs vermieden wird. Die Gefahr des Entzündens ist an den Auslässen der Tankbelüftung und des Kraftstoffablasssystems gegeben und kann z. B. durch Blitzschlag hervorgerufen werden.

7.3 Kraftstoffaufbewahrung

Kraftstofftanks können sich im Flügel (wing), Rumpf (fuselage), Höhenleitwerk (horizontal tailplane), oder im Seitenleitwerk (vertical tailplane, fin) befinden. Tanks können aber auch dauerhaft an der Flügelspitze befestigt sein. Diese Art der Tanks bezeichnet man als *Flügelspitzentanks* (tip tank). Bei Kampfflugzeugen können zusätzliche Tanks unter/über dem Flügel oder unterhalb des Rumpfes befestigt werden. Verkehrsflugzeuge nutzen häufig den Be-

reich zwischen beiden Flügeln als *Mitteltank* (center tank) (Bild 7.3). Diese Flugzeuge kann auch Nutzlast (payload) gegen Kraftstoffkapazität (das heißt, maximale Reichweite) eintauschen, in dem sie einen Teil oder den gesamten Frachtraum (cargo compartment) mit *Additional Center Tanks* (ACT) bestücken.

„Kraftstofftanks müssen einen **Freiraum** von mindestens 2% der Tankkapazität besitzen. Diesen Freiraum darf man beim Betanken am Boden nicht mit Kraftstoff füllen können.“ (CS 25.969). Eine Ausdehnung um 2% entspricht einem Anstieg der Kraftstofftemperatur von 20 °C.

Kraftstoff der in die leeren Tanks gefüllt wird, kann in der Praxis nicht bis zum letzten Tropfen entnommen werden. Die Menge des Kraftstoffs der nicht entnommen werden kann, nennt man **nicht ausfliegbaren Kraftstoff** (unusable fuel). „Die nicht ausfliegbare Kraftstoffmenge ... [ist] die Menge bei der, unter Berücksichtigung der ungünstigsten Gegebenheit der Kraftstoffversorgung, ein erster Hinweis auf eine Triebwerksstörung eintritt ...“ (CS 25.959). Die Flugzeughersteller sind bemüht, das nicht ausfliegbare Kraftstoffvolumen auf ein Minimum zu reduzieren. Um den Kraftstoff aus den verschiedensten Ecken des Tanks zu fördern, werden *Rückförderpumpen* (scavenge pumps) eingesetzt.

Der Kraftstoff in den Tanks kann genutzt werden, um den **Schwerpunkt** (center of gravity, CG) zu **regeln**. *Überschallflugzeuge* (supersonic aircraft) verwenden die Schwerpunktsregulierung, um den **Trimmwiderstand** (trim drag) zu **minimieren**, der durch die rückwärtige Verschiebung des Auftriebsangriffpunktes bei Überschallfluggeschwindigkeiten entsteht. Die BAC-Aérospatiale Concorde besitzt daher Trimm tanks in den vorderen Bereichen des Flügels. *Unterschallflugzeuge* (subsonic aircraft) verwenden meist Trimm tanks im Leitwerk, um für den Reiseflug den Schwerpunkt im hinteren Bereich des Flugzeugs zu halten. Ein rückwärtiger Schwerpunkt reduziert den Trimmwiderstand und erhöht somit die Effizienz des Flugzeugs. Der Airbus A340 besitzt z. B. einen Trimm tank im Höhenleitwerk, um im Reiseflug den Schwerpunkt auf ca. 2 % vor die hintere Grenze des auf die mittlere aerodynamische Flügeltiefe (mean aerodynamic chord, MAC) bezogenen zertifizierten Limits zu verschieben.

Das **Gewicht des Kraftstoffs** in den Flügeln stellt ein Gegengewicht zum Auftrieb dar. Dies **reduziert das Flügelbiegemoment** (wing-bending moment) und ermöglicht es leichtere Strukturen zu konstruieren. Um dieses Phänomen möglichst lange während des Fluges zu nutzen, wird der Kraftstoff vorzugsweise zuerst vom Mitteltank oder von den inneren Flügeltanks (inner wing tank) entnommen. Der Kraftstoff aus den äußeren Flügeltanks (outer wing tank) wird erst zum Ende des Fluges verwendet, wobei sich der Auftrieb und somit das Flugzeuggewicht bereits durch den Kraftstoffverbrauch reduziert hat.

Für die **Bevorratung des Kraftstoffs** gibt es verschiedene Möglichkeiten:

- auswechselbare Kraftstofftanks (rigid removable tanks),
- Kraftstoffzellen (bladder tanks),

- Integraltanks (integral tanks).

Ein **auswechselbarer Kraftstofftank** befindet sich in einem Bereich, der für die Aufnahme von Kraftstofftanks ausgelegt ist. Der Tank muss im Gegensatz zum Installationsbereich kraftstoffdicht sein. Der auswechselbare Kraftstofftank besteht üblicherweise aus geschweißten Aluminiumkomponenten oder Verbundwerkstoffen. Diese Art der Tanks werden in kleinen Flugzeugen oder als Additional Center Tanks verwendet. Additional Center Tanks die sich innerhalb des Rumpfes befinden müssen doppelwandig ausgelegt sein.

Eine **Kraftstoffzelle** ist ein verstärkter Gummisack, der sich in einem Bereich befindet, der das Gewicht des Kraftstoffs aufnehmen kann. Kraftstoffzellen findet man in Mittel- bis Hochleistungsflugzeugen oder im Innern eines Additional Center Tanks zur Generierung einer Doppelwand.

Ein **Integraltank** ist Teil der *Flugzeugstruktur* und ist z. B. im Flügel untergebracht. Er nutzt die Struktur des Flügels sowie zusätzliches *Dichtungsmaterial*, um einen kraftstoffdichten Tank zu erzeugen. *Tankzugangsklappen* (tank access panel) an der Unterseite des Flügels erlauben es den Tank zu inspizieren. *Trennwände* (baffles) im Innern des Tanks reduzieren das Schwappen des Kraftstoffes (sloshing). In den Trennwänden befinden sich meist *Rückschlagventile* (check valve) die sich nur nach innen öffnen lassen. Sie sorgen dafür, dass sich der Kraftstoff immer in den inneren Tanks befindet, wo auch die Kraftstoffpumpen (fuel pump) platziert sind.

Das **Tankbelüftungssystem** (tank vent system) „gewährleistet einen akzeptablen [geringen] Druckunterschied zwischen dem Tankinnern und der Umgebung“ (CS 25.975) unter Berücksichtigung des gesamten Flugprofils:

- Reiseflug (cruise) (Kraftstoffverbrauch)
- Maximale Steig- und Sinkrate (maximum rate of climb and descent) (Veränderung des Drucks)
- Betanken und Enttanken (refueling and defueling)

Über- oder Unterdruck im Tank kann zu Strukturschäden führen. Im Fall von Unterdruck kann die Triebwerksversorgung unterbrochen werden. Das Belüftungssystem bei Kleinflugzeugen kann ein Loch im Tankdeckel sein. Bei Großraumflugzeugen ist jeder Tank über *Belüftungsröhre* (vent pipes) mit dem *Belüftungstank* (vent surge tank) verbunden (Bild 7.4). Die Belüftungstanks können den überlaufenden Kraftstoff aufnehmen und über *Klappenventile* (clack valve) zurück in die Haupttanks leiten. Die Belüftungstanks sind über einen NACA Lufteinlass mit der Umgebung verbunden, so dass der Druck im Tank immer leicht über dem Umgebungsdruck liegt.

Flugzeugkraftstoff wird auch als Wärmesenke eingesetzt. Das Hydrauliksystem (hydraulic system) und die Klimaanlage (air conditioning system), insbesondere bei Kampfflugzeugen, verwenden Kraftstoff zur **Kühlung**. Es ist ersichtlich, dass die Kraftstofftemperatur dabei überwacht werden muss, um erhöhte Temperaturen und somit eine Entzündung des Kraftstoffs zu vermeiden.

7.4 Kraftstoffförderanlage

Die Kraftstoffförderanlage besteht aus:

- Triebwerkversorgungssystem (engine feed system)
- Kraftstoffumpnsystem (fuel transfer system)
- Kreuzschaltssystem (crossfeed system)
- Betankungs- und Enttankungssystem (refuel and defuel system)

Unter dem **Triebwerkversorgungssystem** versteht man die Kraftstoffzufuhr zu den Triebwerken. Dies kann über *Schwerkraftversorgung* (gravity feed) oder *Druckversorgung* (pressure feed) erfolgen.

Im Falle der **Schwerkraftversorgung** fließt der Kraftstoff unter dem Einfluss der Schwerkraft zu den Triebwerken. Dies ist möglich, wenn die Tanks einen ausreichenden Höhenunterschied gegenüber den Triebwerken aufweisen. Die Schwerkraftversorgung wird an kleinen Hochdeckerflugzeugen eingesetzt, sowie im Notfall bei Großraumflugzeugen, wenn die Kraftstoffpumpen im Kraftstoffsystem nicht funktionieren (jedoch die Kraftstoffpumpen im Triebwerk aktiv sind).

Im Falle der **Druckversorgung**, fördern *Kraftstoffpumpen* den Kraftstoff durch das Kraftstoffsystem. Für das Kraftstoffsystem eines Turboluftstrahltriebwerks muss mindestens eine *Hauptpumpe* (main pump) für jedes Triebwerk zu Verfügung stehen (CS 25.953). Ferner muss eine *Notfallpumpe* (emergency pump) (CS 25.991) unmittelbar nach einem Ausfall der Hauptpumpe die Versorgung des Triebwerks übernehmen. Es existieren verschiedene Pumpprinzipien: *Flügelpumpe* (vane pump), *Kreiselpumpe* (centrifugal pump) und *Wasserstrahlpumpe* (ejector pump).

Die **Kreiselpumpe** (Bild 7.1) saugt Kraftstoff in die Mitte eines Zentrifugalgebläses und stößt ihn durch den Auslass hinaus. Ist die Pumpe nicht in Betrieb, so kann der Kraftstoff durch sie strömen und somit auf ein *Nebenstromventil* (bypass valve) verzichtet werden.

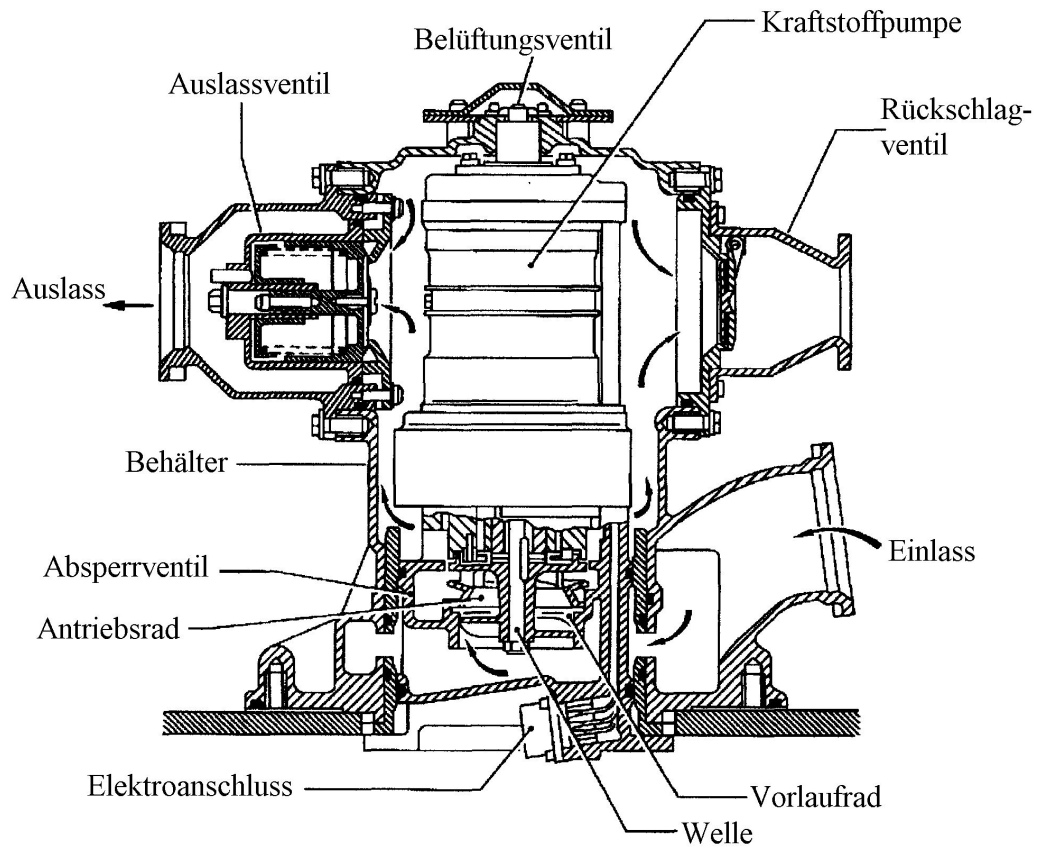


Bild 7.1 Kreiselpumpe (A321)

Wasserstrahlpumpen (Bild 7.2) werden eingesetzt, um den Kraftstoff aus den verschiedenen Bereichen des Kraftstoffstanks oder aus angrenzenden Tanks zu sammeln. Diese Art der Pumpen besitzen keine beweglichen Elemente, sondern sind auf den Kraftstoffmassenstrom der Hauptpumpe angewiesen.

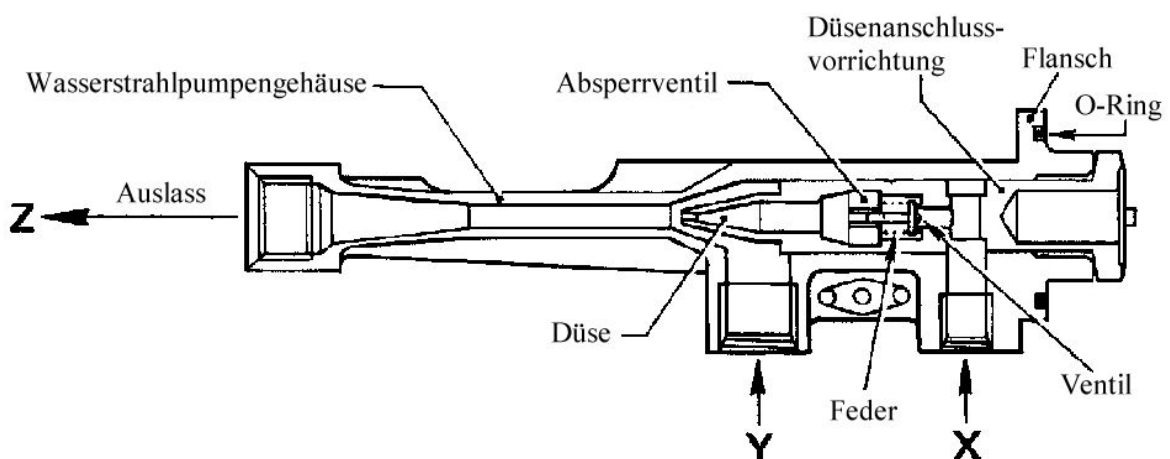


Bild 7.2 Wasserstrahlpumpe (A321)
 X: Zufuhr von der Hauptpumpe
 Y: Zufluss des angesaugten Kraftstoffs
 Z: Auslass

Kraftstoffwahlventile (fuel selector valve) ermöglichen es, den Kraftstoff von einem bestimmten Tank zu beziehen, zwischen verschiedenen Tanks umzupumpen oder ihn zu den Triebwerken zu leiten. **Absperrventile** (shut-off valve) (CS 25.1189) trennen die Kraftstoffversorgung zu den Triebwerken. Sie werden ebenfalls durch die Betätigung des Feuerdruckknopfes geschlossen. „Es muss ein **Kraftstoffsieb** oder ein **Filter** vorhanden sein...“ (CS 25.997).

Das **Kraftstoffumpumpsystem** (fuel transfer system) ermöglicht es Kraftstoff zwischen den verschiedenen Tanks zu transferieren. Das Hauptmerkmal des *Kreuzschaltsystems* (crossfeed system) ist sein Kraftstoffverteiler. Kraftstoff wird von den Tanks zum *Kreuzschaltverteiler* (crossfeed manifold) gepumpt. Die *Kreuzschaltventile* (crossfeed valves) am Kreuzschaltverteiler können so eingestellt werden, dass jedes Triebwerk von jedem Tank versorgt werden kann.

Es gibt zwei wesentliche **Betankungsarten** (refuel modes) für Flugzeuge: *Oberflügelzulaufbetankung* (over-wing refueling) und *Druckbetankung* (pressure refueling). Zusätzlich sind manche Flugzeuge in der Lage in der Luft betankt zu werden (in-flight refueling).

Früher wurden die Flugzeuge überwiegend mithilfe der Schwerkraft und somit über die *Oberflügelzulaufbetankung* betankt. Heute verwenden nur noch kleine Flugzeuge diese Methode, da sie langsam ist. Abhängig von der Größe des Flugzeugs und der Flügelposition kann es schwierig sein, die Oberseite des Flügels zu erreichen und somit das Flugzeug mit Hilfe der Schwerkraft zu betanken.

Bei der *Druckbetankung* wird der Kraftstoff unter einem Druck in die Flügeltanks befördert. Dieser Überdruck wird von einer Kraftstoffstation oder einem Lastwagen generiert. Die entsprechende Tanköffnung befindet sich an der Unterseite des rechten Flügels in der Nähe der Flügelvorderkante. Die Druckbetankung ist eine schnelle Art der Betankung und die Tanköffnung ist einfach zu erreichen.

Wird ein *Flugzeug während des Fluges betankt*, so stammt der Kraftstoff von einem Tankflugzeug. Tankflugzeuge sind meist umgerüstete Verkehrsflugzeuge. Die Verbindung zwischen dem Kraftstoff empfangenden und liefernden Flugzeug kann über eine Schlauchleitung (flexible hose) oder einen starren Ausleger (rigid boom) erfolgen. Die Luftbetankung wurde zuerst für Kampfflugzeuge angewandt, um ihre eingeschränkte Reichweite zu erhöhen. Später wurde die Luftbetankung für Militärflugzeuge eingesetzt um große Distanzen in globalen Konflikten zu überwinden, oder um eine dauernde Aufklärung aus der Luft sicherzustellen.

Enttankung (defueling) ist das Gegenteil von Betankung. Dabei wird Kraftstoff aus den Flugzeugtanks zurück in die Kraftstoffstation oder den Tankwagen gepumpt.

Beim **Umpumpen des Kraftstoffs** am Boden, wird Kraftstoff zwischen den Kraftstofftanks ausgetauscht. Das Enttanken und das Kraftstoffumpumpen kann für die Tankwartung notwendig werden.

7.5 Kraftstoffschnellablassanlage

Der Kraftstoff hat einen hohen Anteil am Gewicht eines Langstreckenflugzeugs. Im Falle eines **Notfalls** nach dem Start, kann das Flugzeug gezwungen sein umzukehren und zu landen. In der entsprechenden Situation liegt jedoch das Gewicht des Flugzeugs deutlich über dem maximalen Landegewicht (maximum landing weight). Das schwere Flugzeug würde bei einer Landung die eigene Sicherheit gefährden. Im Fall eines Durchstartmanövers (discontinued approach), würde das schwere Flugzeug nicht die erforderliche Steigrate erreichen (CS 25.1001).

Eine **Kraftstoffschnellablassanlage** (fuel jettison system) kann das erwähnte Problem lösen. Diese Anlage ermöglicht es den gesamten Kraftstoff (mit Ausnahme einer Reserve) in weniger als 15 Minuten abzulassen. Dadurch kann das Flugzeuggewicht schnell reduziert werden und die Notlandung eingeleitet werden.

Es wurden zwei verschiedene **Systeme** entwickelt. Anlagen die auf der Schwerkraft oder auf Pumpen basieren. Das auf der **Schwerkraft beruhende System** ist mit langen *Ablasstrichtern* (dump chutes) ausgerüstet, die sich an beiden Flügelenden befinden. Die langen Trichter erzeugen einen ausreichenden Druckunterschied, so dass der Kraftstoff abfließen kann. Das Pumpensystem der Schnellablassanlage hingegen besitzt *Ablassdüsen* (dump nozzles) an beiden Flügelenden.

7.6 Anzeigen von Kraftstoffparametern

Menge, Temperatur, und Druck des Kraftstoffs können mit dem Kraftstoffsystem gemessen werden. Andere Kraftstoffparameter werden vom Triebwerk gemessen.

Ein **Kraftstoffmengenanzeiger** (fuel quantity indicator) kann ein mechanischer, Widerstands- oder kapazitiver Mengenanzeiger (mechanical, resistance or capacitance quantity indicator) sein.

Ein **kapazitiver Mengenanzeiger** basiert auf einem Kondensator, der sich im Kraftstofftank befindet. Der Kraftstoff, beziehungsweise die Luft im Tank wirken als Dielektrikum für den Kondensator. Ist der Kondensator trocken, so ist die Kapazität gering. Steigt jedoch das Kraftstoffniveau so nimmt die Kapazität des Kondensators zu. Ein Regler überwacht die Kapazitätswerte und rechnet sie in ein entsprechendes Kraftstoffvolumen um.

Zusätzlich zu dem Kraftstoffmengenanzeiger, der überwiegend während des Fluges verwendet wird, ist es wünschenswert den **Kraftstoffstand zusätzlich optisch festzustellen**. Bei kleinen Flugzeugen kann man den Kraftstoffstand *optisch erkennen*, indem man durch die Tanköffnung schaut. Da bei Transportflugzeugen dies nicht möglich ist, befinden sich an der Flügelunterseite *Dripsticks*. Diese hohlen Fiberglasstäbe werden entriegelt und langsam herausgezogen, bis es anfängt zu tropfen (drip). Die Stellung des Stabes entspricht dann dem Kraftstoffstand im Tank. Fortschrittlicher sind *magnetische Füllstandsanzeiger* (magnetic level indicator, MLI). Der magnetische Füllstandsanzeiger wird ebenfalls an der Unterseite des Flügels entriegelt. Dabei setzt sich ein magnetischer Schwimmer auf die Kraftstoffoberfläche, während ein magnetischer Stab einen Kontakt zum Schwimmer herstellt. Über die Position des Stabes, lässt sich wiederum der Kraftstoffstand bestimmen.

7.7 Beispiel: Airbus A321

Der Airbus A321 hat drei Kraftstofftanks (Bild 7.3):

- Linker Flügeltank
- Rechter Flügeltank
- Mitteltank

Die maximale, nutzbare Kraftstoffkapazität aller Tanks beträgt 23700 l. Die Menge des nicht ausfliegbaren Kraftstoffs beträgt 89.7 l. Das sind weniger als 0,4%.

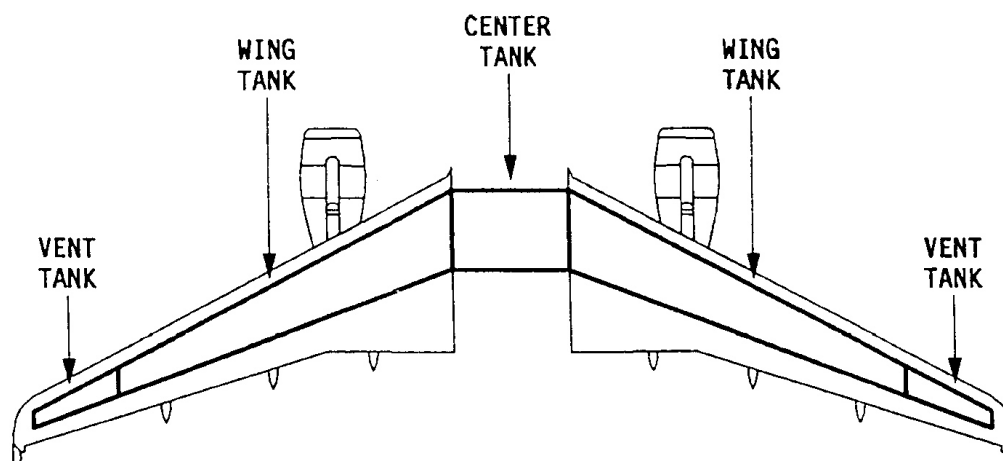


Bild 7.3 A321 Kraftstofftanks

Die **Belüftungstanks** (vent tank) (Bild 7.4) enthalten normalerweise keinen Kraftstoff. Sie sind mit dem Flügel- und Mitteltank über einen *Stringerbelüftungskanal* (stringer vent duct) bzw. einem *Mitteltankbelüftungsrohr* (center tank vent pipe) verbunden. Da die Belüftungstanks über einen *Belüftungskanal* (vent duct) verfügen der mit der Umgebungsluft verbunden ist, sind die anderen Tanks ebenfalls mit der Umgebungsluft verbunden. Der Belüftungskanal besitzt einen *Belüftungsschutz* (vent protector), der aus einer *Flammenabsperrvorrichtung* (flame arrestor) und einem *Eissschutz* (ice protector) besteht. Der Belüftungskanal ist mit einem NACA-Lufteinlauf an der Unterseite des Flügels verbunden. Die Belüftungstanks können ebenfalls vorübergehend Kraftstoff aufnehmen, der durch die Belüftungskanäle einströmt. Dieser Kraftstoff wird über die Klappenventile (clack valve) zurück in den Flügeltank geleitet. Im Falle eines Hindernisses im Belüftungskanal, sorgt ein *Überdruckschutz* (overpressure protector) dafür, dass der Druck im Belüftungstank festgelegte Grenzen nicht überschreitet.

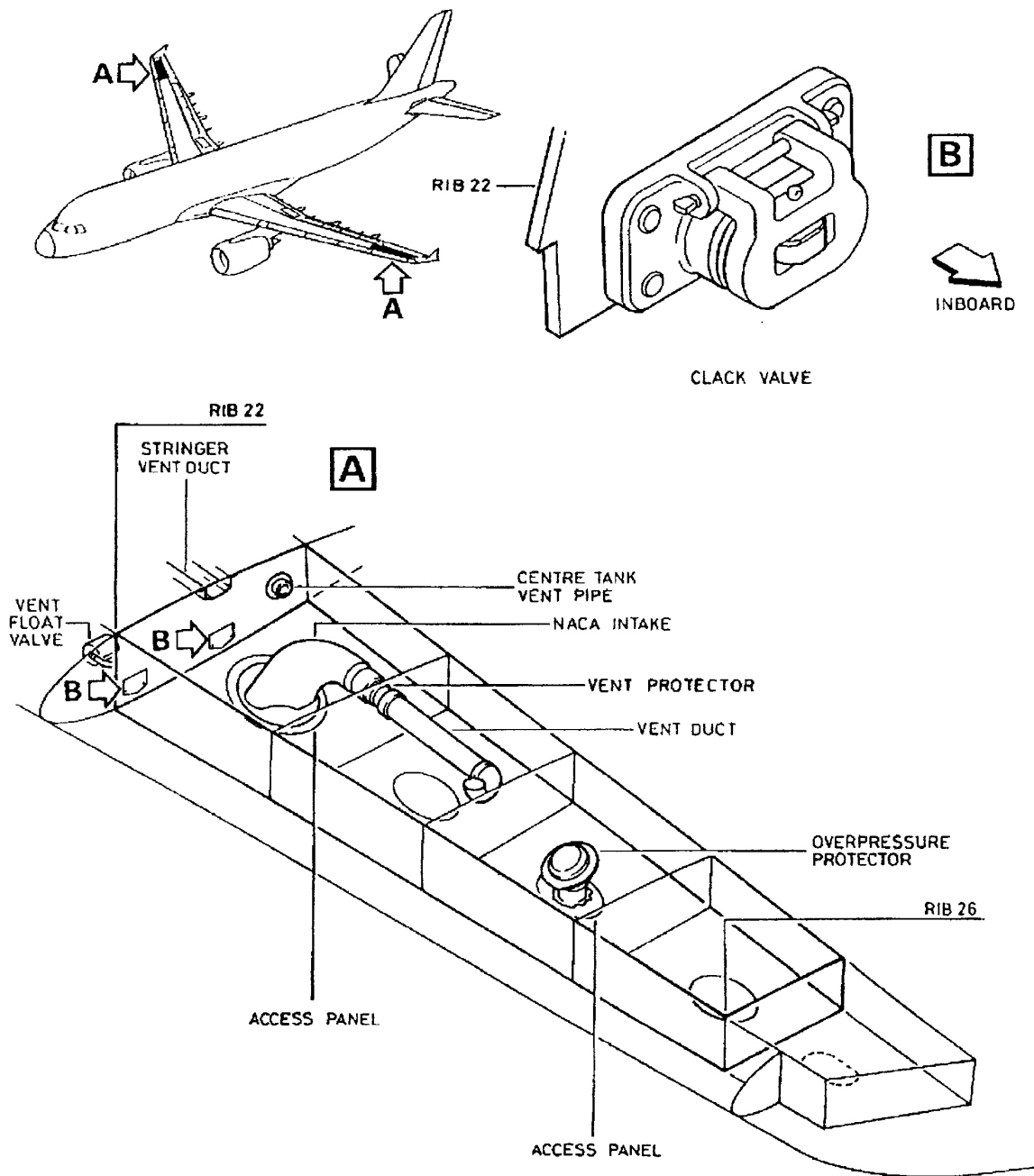


Bild 7.4 A321 Belüftungstank

Das Kraftstoffverteilungssystem (*fuel distribution system*) der A321 ist in Bild 7.5 abgebildet:

- Das Triebwerkversorgungssystem (*engine feed system*) bezieht den Kraftstoff aus den Flügeltanks und leitet ihn zu den Triebwerken. Zwei Hauptpumpen (Bild 7.1) befinden sich in jedem Flügeltank.
- Das Hauptumpensystem (*main transfer system*) ermöglicht das Umpumpen (transfer) von Kraftstoff aus dem Mitteltank in den linken und rechten Flügeltank. Dieser Vorgang ist üblich, um den Kraftstoff aus dem Mitteltank zu nutzen. Das Umpumpen wird mittels der Wasserstrahlpumpen (Bild 7.2) erreicht, die mit Kraftstoff von den Hauptpumpen betrieben werden.

- Das Kreuzschaltssystem (*crossfeed system*) verbindet das linke und rechte Kraftstoffversorgungssystem. Im Triebwerkversorgungssystem befindet sich ein Kreuzschaltventil (*crossfeed valve*). Dies ermöglicht entweder eine Isolation oder eine Kopplung des linken (Triebwerk 1) und des rechten (Triebwerk 2) Kraftstoffversorgungssystems herzustellen. Unter normalen Bedingungen ist das Kreuzschaltventil geschlossen und die beiden Teilsysteme damit getrennt.
- Das Be-/Enttanksystem (*refuel/defuel system*):
 - Betanken: Kraftstoff wird den Kraftstofftanks über die Tanköffnung im rechten Flügel zugeführt. Eine zweite Tanköffnung im linken Flügel ist optional.
 - Enttanken: Der Kraftstoff wird aus den Tanks gepumpt und verlässt sie über die Tanköffnung. Das Enttankkreuzventil (*defuel transfer valve*) ist dabei geöffnet.
 - Kraftstoff umpumpen: Dieses System wird verwendet, um Kraftstoff zwischen den verschiedenen Tanks auszutauschen. Das Enttankkreuzventil (*defuel transfer valve*) ist dabei geöffnet.
- Das Hilfstriebwerkversorgungssystem (*APU feed system*) bezieht den Kraftstoff von dem Triebwerkversorgungssystem und leitet ihn zum Hilfstriebwerk (APU).

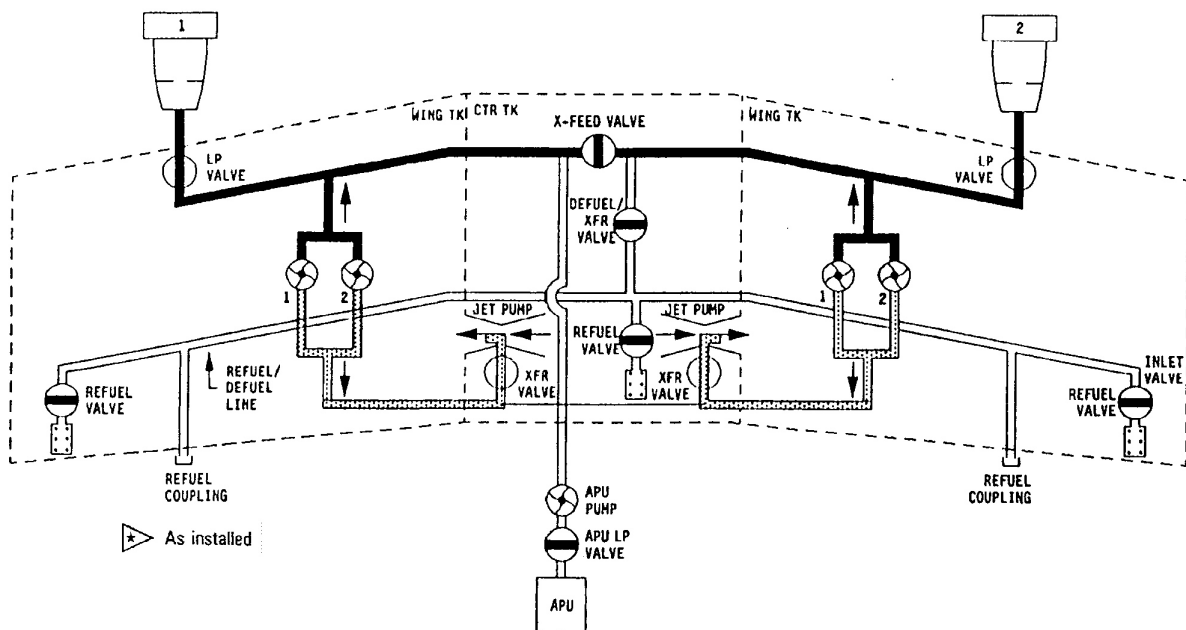


Bild 7.5 A321: Kraftstoffverteilungssystem

Schwarze Linien	Triebwerkversorgungssystem (engine feed system)
Graue Linien	Hauptumpensystem (transfer system)
Weißer Linien	Be-/Enttanksystem (refuel/defuel system)
	sowie Hilfstriebwerkversorgungssystem (APU feed system)
X-FEED	Kreuzversorgung (cross feed)
XFR	Umpumpen (fuel transfer)