

Ballone und Luftschiffe

*ein Überblick über Technik und Geschichte der Aerostatischen Luftfahrt
TU Berlin, ILR, F2, Projektwerkstatt Aerostatische Luftfahrt, Yousif Abdel Gadir*

Sommersemester 2001

Inhaltsverzeichnis:

A. Ballone.....	3
A.1. Die Anfänge der Luftfahrt	3
A.2. Die Montgolfière	3
A.3. Die Charlière.....	5
A.4. Die Rozière	7
A.5. Der Fesselballon	7
A.6. Aerostatik der Ballone	8
B. Luftschiffe.....	11
B.1. Vom Ballon zum Luftschiff.....	11
B.2. Allgemeine Luftschiff-Technologien.....	12
B.3. Prall-Luftschiffe.....	14
B.4. Halbstarre Luftschiffe	15
B.5. Starrluftschiffe	16
B.6. Hybridluftschiffe.....	17
C. Wirtschaftlichkeit von Luftschiffen.....	18
C.1. Produktnutzen und Nischen im Luftverkehrsmarkt.....	18
C.2. Einsatzzuverlässigkeit und Utilisation.....	19
C.3. Sicherheit	20
C.4. Umwelt & Infrastruktur	21
E. Quellen und weiterführende Literatur	22
E.1. Bücher und Zeitschriften.....	22
E.2. Internetadressen.....	23
F. Ballon- und Luftschiffhersteller:.....	23

A. Ballone

A.1. Die Anfänge der Luftfahrt

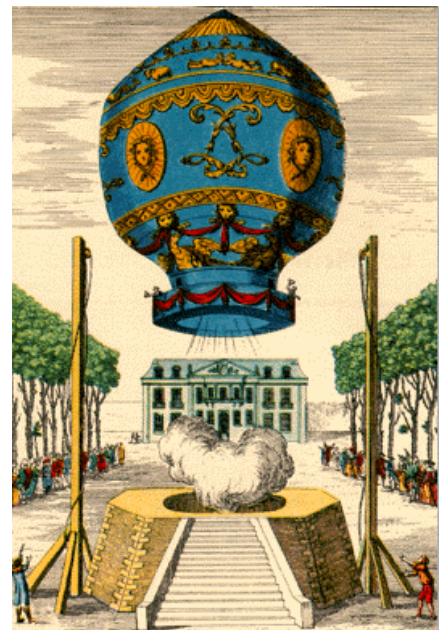
Lange vor den Gleitflügen von Otto Lilienthal (1891- 1896) und den ersten motorisierten Hüpfern von Orville Wright (1903) standen am Anfang der bemannten Luftfahrt die Aerostaten: Ballone und Luftschiffe.

Von sich durch die Luft bewegendem Maschinen und Menschen wird schon aus dem sagenumwobenen Altertum berichtet. Erste glaubhafte Berichte gibt es jedoch erst aus dem 18. Jahrhundert. 1709 führte Bartholomeo de Gusmao, ein brasilianischer Mönch, am portugiesischen Hof ein Experiment vor: er ließ kleine, mit Rauch gefüllte Ballone steigen. Das Kunststück entsprach wahrscheinlich den Festtagsbräuchen südamerikanischer Indianer. Die Inquisition verhinderte weitere Experimente.

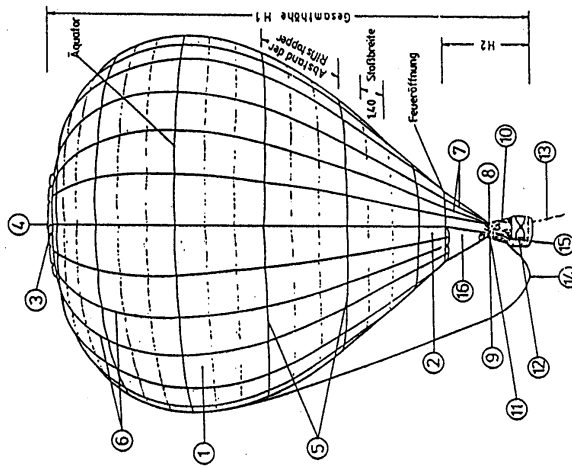
A.2. Die Montgolfière

Allgemein bekannt sind die Gebrüder Joseph und Etienne Montgolfier. Der Erfolg ihrer Experimente mit Luftkugeln aus Papier und Leinwand welche gefüllt mit Rauch von Stroh und Schafswolle vom Erdboden abhoben, waren die ersten in der Luft fahrenden Menschen: Marquis d'Arlandes und Pilâtre de Rozier fuhren am 21.11.1783 für eine halbe Stunde in der Luft. Die Montgolfière konnte sich Aufgrund praktischer Mängel (Brandgefahr, Steuerbarkeit) zunächst jedoch nicht durchsetzen.

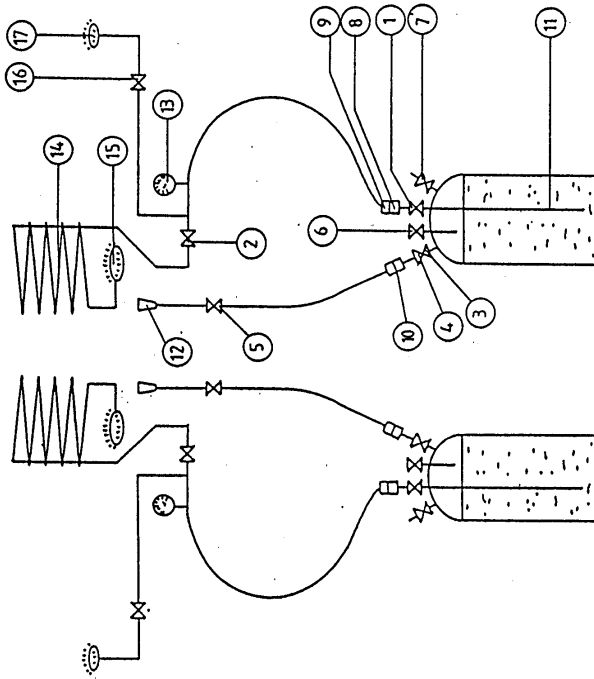
Der Heißluftballon (Hot Air Balloon) wurde erst Ende der 1960er Jahre wiederentdeckt. Verschiedene Manöver- und Schnellentleerungssysteme (Parachuteventil) sowie neue leichte, hitzebeständige, flammenhemmende Materialien und leistungsstarke Flüssigpropanbrenner führten zu einem praktischen Sport- und Tourismusluftfahrzeug. Die Fahrtzeit eines heute üblichen 3000m³ Sport-Heißluftballones für vier Personen beträgt circa 90 Minuten. Dabei werden etwa 50 kg Propangas verbrannt. Es gab 1997 laut Commission Internationale D'Aérostation (CIA) der Fédération Aéronautique Internationale (FAI) weltweit 12625 Heißluftballone und 13820 Heißluftballonpilotenlizenzen - davon 1237 Ballone und 1364 Piloten in Deutschland.



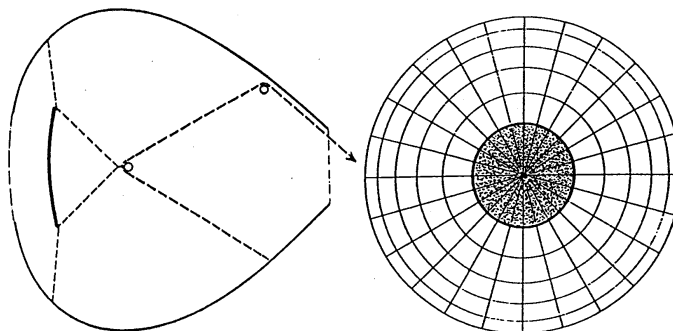
Der Heißluftballon - Gesamtansicht



- | | |
|----------------------------|----------------------------------|
| 1) Hüllentstoff | 9) Zug- und Brennerrahmen |
| 2) Nomexstoff | 10) Brennerstützen und Korbselle |
| 3) Parachute | 11) Doppelbrenner |
| 4) Topring | 12) Korb |
| 5) Horizontale Reißstopper | 13) Start- und Landeleine |
| 6) Vertikale Lastbänder | 14) Topleine |
| 7) Hüllenselle | 15) Ventilleine |
| 8) Sellschloß | 16) Windtuch |



- | | |
|---|------------------------------|
| 2) Flüssigkeits-Entnahmeventil | 10) Steckrippe |
| 3) Fahrventil | 11) Schnellkupplung Gasphase |
| 4) Gasphasen-Entnahmeventil | 12) Füllstandsanzeige |
| 5) Druckminderventil | 13) Pilotflamme |
| 6) Pilotflamme | 14) Druckmanometer |
| 7) Höchststandpeller (Schnüffelventil) | 15) Verdampfer |
| 8) kann auch in einem Überdruck- oder Sicherheitsventil, Entnahmeventil integriert sein | 16) Hauptdüse |
| | 17) Silentventil |
| | "Kühbrenner" |



Heißluftballon-Sonderformen

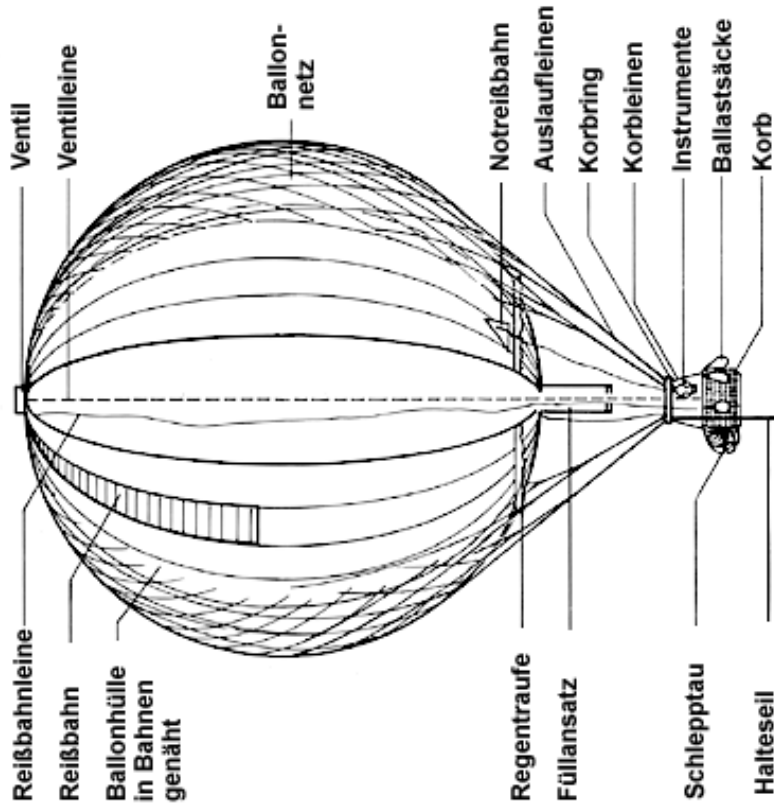
A.3. Die Charlière

Parallel zu den Brüdern Montgolfier entwickelte Prof. Jaques Alexandre César Charles den Wasserstoff-Gasballon. Nur wenige Tage nach dem Aufstieg der Montgolfière, hob am 1.12.1783 Prof. Charles mit seinem Mitarbeiter Noel Robert zu einer mehr als einstündigen Luftfahrt mit einer kontrollierten Zwischenlandung ab.



Die Charlière wurde nur im Detail verbessert und um ein Schnellentleerungssystem (Reißbahn) ergänzt. Mit Wasserstoff, Helium oder Leuchtgas gefüllt wurden mit ihr die Meteorologie, Höhenstrahlung und Physiologie erforscht und weite, abenteuerliche Reisen unternommen. Vor wenigen Jahren wurde beim Gasballon durch netzlose Konstruktion, bessere Materialien und der Einführung des Gasballon-Parachuteventils weiteres Potential frei. Der den Heißluftballon in den Flugleistungen und Betriebsgrenzen weit übertreffende Gasballon wird heute als Sportluftfahrzeug eingesetzt. Ein heute üblicher 1000m³ Wasserstoff-Gasballon für vier bis fünf Personen ist pro Fahrt im Durchschnitt über fünf Stunden in der Luft. Mehrtägige Fahrten bis über 90 Stunden sind bei einer Besetzung von zwei Piloten und bei geeignetem Wetter möglich. Im Jahr 1997 gab es weltweit 144 Gasballone und 556 Gasballonlizenzen - in Deutschland kamen auf 44 Ballone 265 Piloten.

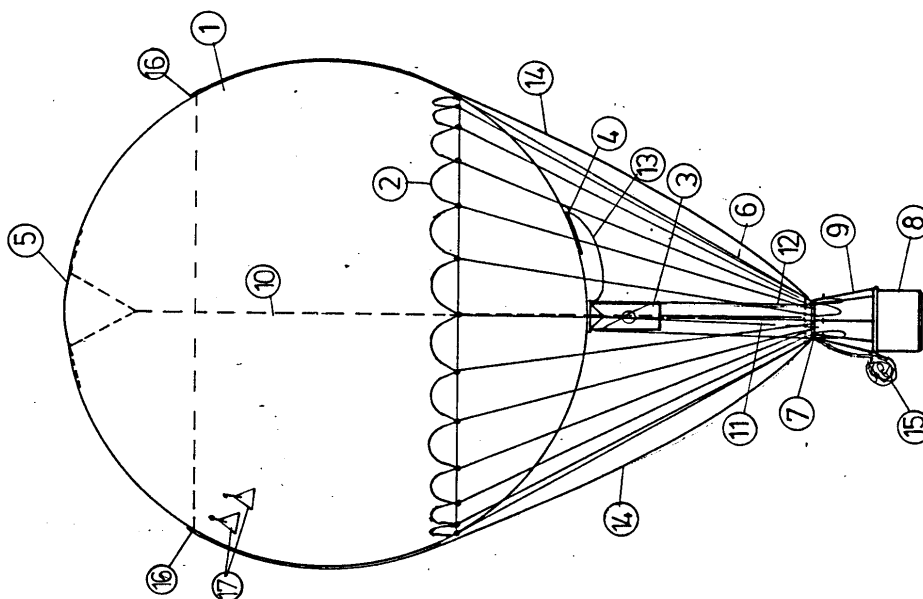
klassischer Gasballon mit Netz



moderner netzloser Gasballon

Erläuterung zur Übersicht

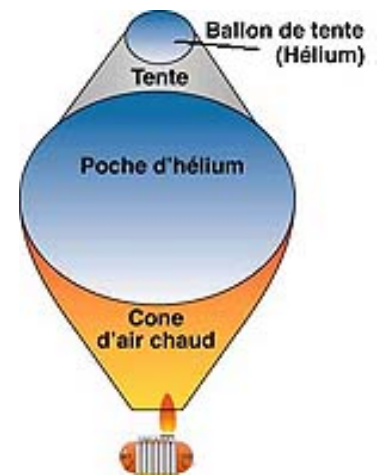
- 1 Hülle
- 2 Lastgurt
- 3 Füllansatz
- 4 Notöffnung
- 5 Parachute
- 6 Hüllenleinen
- 7 Korbring
- 8 Korb
- 9 Korbleinen
- 10 Parachuteleine
- 11 Füllansatzhalteleine
- 12 Zuziehleine
- 13 Notöffnungsleine
- 14 Halteseile
- 15 Schlepptau
- 16 Halteseilbefestigung
- 17 Niederhaltebefestigung



A.4. Die Rozière



Eine weitere, sehr seltene (1997: drei Stück), Freiballonart ergibt sich aus der Kombination des Heißluft- und des Gasballons. Mit einer solchen Rozière (nach ihrem Erfinder Pilâtre de Rozier) wurde vor kurzem einer der letzten Rekorde gebrochen: Die Umrundung der Erde. Die Rozière kann die Temperaturunterschiede zwischen nächtlicher Abkühlung des Traggases durch Abstrahlung und der solaren Aufheizung tagsüber ausgleichen. So können die bei Gasballonen üblichen großen Ballastverluste in der ersten Nachthälfte vermieden werden.



Breitling Orbiter 3, Piccard / Jones

A.5. Der Fesselballon



Im Gegensatz zu Freiballonen (Free Ballons) die mit dem Wind treiben, sind Fesselballone (Tethered Balloons, Ballon Captifs) am Erdboden gefesselt.

Fesselballone gibt es in vielen Varianten für verschiedene Anwendungen. Schon im 19. Jahrhundert wurden Ballone an Kabeln hochgelassen um damit feindliche Heeresbewegungen auszukundschaften. (Fleurus, rechts)

Um den Ballonkorb für Beobachtungen durchs Fernrohr ruhig zu halten und um bessere Steighöhen bei Wind zu erreichen, entwickelte Parseval den Drachenballon (links).



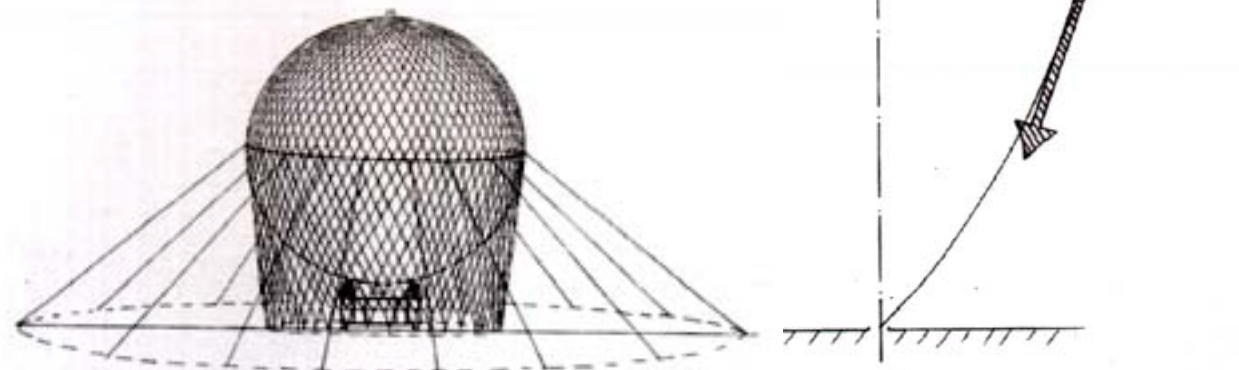
Im Jahr 1878 baute Giffard in Paris den bisher größten Fesselballon für touristische Zwecke: 25.000m³ Wasserstoff trugen 50 Passagiere bis in eine Höhe von 600m. Das aktuelle System von Aérophile hebt mit 5500m³ Helium bis zu 30 Passagiere auf 300m. Die Großfesselballone werden für längere Zeiträume fest installiert. Bei höheren Windgeschwindigkeiten werden sie tief an den Boden verankert. Erst ab Sturmwarnungen über 110 km/h wird ein Entleeren und Abrüsten notwendig.

Kleinere bemannte Fesselballone für ein bis zwei Personen werden als Attraktion für Volksfeste, zum Beobachten von Urwaldbiotopen bzw. als Baumsamen-entteballone eingesetzt. Einige Systeme können von mehreren fest installierten Seilwinden oder von einer Winde auf einem Fahrzeug bewegt werden.

Die am weitesten verbreitete Anwendung von kleinen unbemannten Fesselballonen ist neben der Luftbildfotografie vor allem die Werbung.

Die Firma CargoLifter arbeitet u.a. gerade daran, einen 110.000m³ großen Ballon als Kran für bis zu 75 Tonnen schwere Lasten einzusetzen.

Andere Projekte untersuchen z.Zt. die Machbarkeit gefesselte Aerostaten als Stratosphärenplattformen für Mobilfunktransponder oder für die Reparatur der Ozonschicht einzusetzen.



Aérophile-Fesselballon

A.6. Aerostatik der Ballone

Wie fährt ein Ballon ? Er schwimmt in der Luft !

Der Auftrieb (Buoyancy) eines Volumens ist gleich dem Gewicht der von ihm verdrängten Luftmasse. Die Tragkraft eines Traggases entspricht dem Auftrieb minus dem Eigengewicht des Traggases.

Den Zusammenhang von Volumen, Druck und Temperatur zeigt das ideale Gasgesetz:

$p \cdot V = n \cdot R \cdot T$, im Normzustand mit Druck $p = 1013,25 \text{ hPa}$, Volumen $V = 22,4 \text{ m}^3/\text{kmol}$, $n = \text{Molmenge in kmol}$, universeller Gaskonstante $R = 8,3144 \text{ kJ/kmol}\cdot\text{K}$ und $T = 273,15 \text{ K} = 0 \text{ }^\circ\text{C}$

Bei Temperaturveränderung beträgt die Änderung des Ausgangswertes vom Normzustand also etwa 1/273 pro Grad im gleichen Sinne bei Druck oder Volumen und im entgegengesetzten bei der Dichte [Masse/Volumen]. Bei Konstanthalten der Temperatur (isotherm) bewirkt eine Druckänderung eine gleichsinnige Dichteänderung und eine gegensinnige Volumenänderung.

Die Luft (ein Gasgemisch aus N_2 , O_2 , CO_2 ,...) hat eine durchschnittliche Molmasse von etwa 29. Die Dichte trockener Luft beträgt bei $0\text{ }^\circ\text{C}$ und $1013,25\text{ hPa}$ also etwa $29\text{ Kilogramm pro }22,4\text{ m}^3$:

$$\rho_{\text{Luft } 0\text{ }^\circ\text{C}} = 1,3\text{ kg/m}^3$$

Bei Heißluftballonen wird die Tragkraft durch die Erhöhung der Lufttemperatur in der prall gefüllten Hülle erzeugt. Heute werden Flüssigpropanbrenner mit Wärmeleistungen über 2500 kW zum Heizen benutzt. Diese sind nicht als Dauerbrenner ausgelegt. Sie werden nur in bis zu mehreren Sekunden langen Intervallen für etwa 20% der Zeit benutzt. Zum Steigen oder Sinken wird der Brenner öfter oder seltener benutzt um die Lufttemperatur in der Hülle und damit ihre Dichte zu regulieren. Die sich verändernde Luftmasse im Inneren kann am unteren offenen Ende der Hülle ein- und ausströmen. Die Dichte trockener Luft beträgt bei $100\text{ }^\circ\text{C}$ und $1013,25\text{ hPa}$:

$$\rho_{\text{Luft } 100\text{ }^\circ\text{C}} = 1,3 \cdot 273/373 = 0,95\text{ kg/m}^3$$

Das Wasserstoffmolekül H_2 hat ein Molgewicht von 2. Helium ist das leichteste Edelgas mit einem Molgewicht von 4. In der technischen Realität werden die rechnerischen Idealwerte nicht erreicht. Die real in Ballonhüllen vorhandenen Dichten von Wasserstoff oder Helium oder dem früher auch verwendeten Leuchtgas (ein Gasgemisch aus H_2 , CH_4 , CO ,...) sind bei $0\text{ }^\circ\text{C}$ und 1013 hPa etwa:

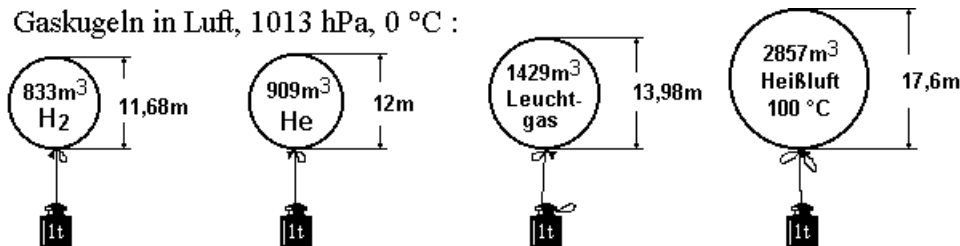
$$\rho_{H_2} = 0,1\text{ kg/m}^3$$

$$\rho_{He} = 0,2\text{ kg/m}^3$$

$$\rho_{\text{Leuchtgas}} \text{ etwa } 0,6\text{ kg/m}^3$$

Mit den obigen Formeln und Feststellungen kann man nun Tragkräfte errechnen:

Gaskugeln in Luft, 1013 hPa , $0\text{ }^\circ\text{C}$:



Der Luftdruck an einer Stelle der Atmosphäre ist durch die darüber liegende Luftmasse bestimmt. Es gilt die barometrische Höhenformel: $\text{Druck}[\text{hPa}] = \text{DruckMSL}[\text{hPa}] \cdot (1 - 6,5/288 \cdot \text{Höhe}[\text{km}])^{5,225}$. Da sich Luftschiene und Ballone im Normalbetrieb nur geringen Höhenänderungen bis etwa 3000 m aussetzen, kann man mit 1% Druck- bzw. Dichteänderung pro 80 m Höhenänderung linearisieren.

Beim Gasballon kann durch Ballastabgabe (Sand oder Wasser) eine Steigkraft oder durch Ventilzug eine Sinkkraft erzeugt werden. Um ein Platzen beim Aufsteigen zu vermeiden, ist er am unteren Pol offen. Erleichtert man den prall gefüllten Ballon, so steigt er und bläst unten am Füllansatz das sich mit der Höhe ausdehnende Traggas ab. Fällt der Ballon wieder wird er unprall. Der pralle Ballon enthält ein konstantes Gasvolumen - der unpralle Ballon eine konstante Gasmasse. Jede Ballastabgabe und jeder Ventilzug haben eine Vergrößerung der Höhe, wo der Ballon prall wird zur Folge. Diese Höhe wird Prallhöhe genannt.

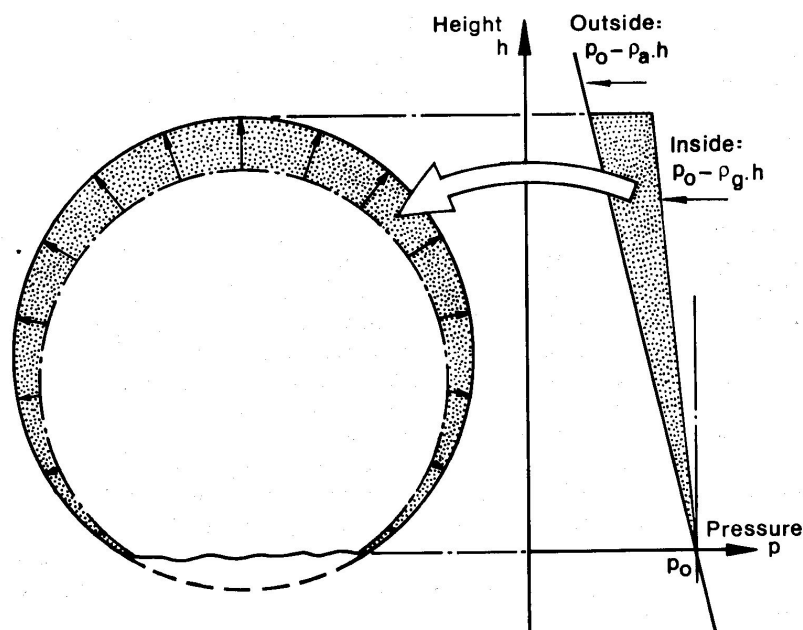
Wenn die Atmosphäre isotherm geschichtet ist, befindet sich der unpralle Ballon in einem indifferenten Gleichgewicht. Das bedeutet jede Steigkraft führt zu einem Steigen auf die Prallhöhe und jede Sinkkraft führt zur Landung. Bei normalem negativen Temperaturgradienten ($-6,5\text{ K/km}$) ist das Auftriebs-Gleichgewicht (Bouyancy Equilibrium) leicht instabil. Um z.B. für die Landung gleichmäßig zu Sinken braucht man also eine Ballastreserve um die Temperaturzunahme zu kompensieren. Bei einer Temperaturinversion pendelt der Ballon stabil um seine Gleichgewichtslage mit Schwingungsperioden von 5 bis 15 Minuten. Beim Auf- oder Absteigen in indifferenten oder stabilen Luftschichten ist oft ein stufenförmiger Verlauf zu beobachten. Die Stufen werden durch die adiabate Erwärmung oder Abkühlung des Traggases durch die Kompression oder Dekompression (ca. -10 K/km) bzw. durch den verzögerten Wärmetransport durch die Hülle verursacht.

Größere Temperaturunterschiede zwischen Umgebungsluft und Gasfüllung treten durch die Einstrahlung der Sonne auf die Hülle bzw. durch die Ausstrahlung z.B. bei sternenklarer Nacht auf (von + 50 K bis -15 K).

Die aerodynamischen Kräfte, die auf einen Freiballon während der Fahrt wirken, sind wegen den normalerweise niedrigen Steig- oder Sinkgeschwindigkeiten klein (1000m³-Kugelballon bei 1m/s ca. 38N). Wirft man bei einem sinkenden Gasballon genau die Menge Ballast ab, die er zu schwer ist, so würde er Aufgrund seiner Massenträgheit noch weitersinken (mehr als 80m). Darf er das nicht, muss er überworfen werden. Überwerfen bedeutet, dass mehr Ballast abgegeben wird als für das Gleichgewicht notwendig wäre. Der Ballon wird zu leicht und steigt bis zu seiner neuen Prallhöhe. Um dies zu vermeiden kann das Ventil gezogen werden. Bei dem Erreichen der Prallhöhe steigt der Ballon durch seine Trägheit einige Meter (ca. 20m) weiter und es wird zuviel Gas durch den Füllansatz abgeblasen. Um nicht gleich wieder ins Sinken zu kommen, kann etwas Ballast geopfert werden. Jedes Manövrieren oder jede Störung des aerostatischen Gleichgewichts führt also zu einem Ballastverbrauch und damit zu einer Fahrtzeitverkürzung.

Zum Landen kann man den Gasballon mit Hilfe des 15 bis 20 kg schweren und 30 bis 60m langen Schlepptaus ausrichten und abfangen. Durch das immer längere Aufliegen des schweren Taus auf dem Boden wird die horizontale Geschwindigkeit durch Reibung vermindert und der noch in der Luft schwebende Teil des Systems erleichtert.

Zum Führen eines Gasballons müssen von dem Piloten komplexere Zusammenhänge erkannt und genutzt werden als beim Heißluftballon, der in jeder Höhe stabil gefahren werden kann. Für den Heißluftballon ergeben sich Nachteile aus dem größeren Volumen und dem geringeren Innendruck.

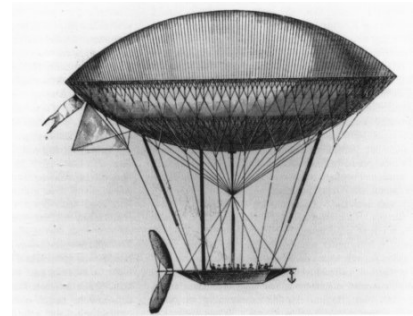


Der Innenüberdruck nimmt je nach Dichte des Füllgases mit der Höhe des Ballonkörpers nahezu linear zu $\Delta p = (\rho_{\text{ausenluft}} - \rho_{\text{gasfüllung}}) * h$. Am Füllansatz entspricht er dem Außenluftdruck. In 10 m Höhe ergibt sich bei Wasserstoff ein Innenüberdruck von etwa 120 N/m²; bei Heißluft nur etwa 34 N/m². Die Heißluftballonhülle kann leichter eingedrückt werden. Die Verformung lässt den Wind bei Start oder Landung besser angreifen. Das bei gleicher Tragkraft etwa dreizigfach trägere Füllvolumen eines Heißluftballons entweicht wesentlich langsamer durch die voll geöffnete Schnellentleerungsvorrichtung als beim Gasballon. Der Heißluftballonkorb kippt bei der Landung daher eher um und die Länge der Schleiffahrt ist höher.

B. Luftschiffe

B.1. Vom Ballon zum Luftschiff

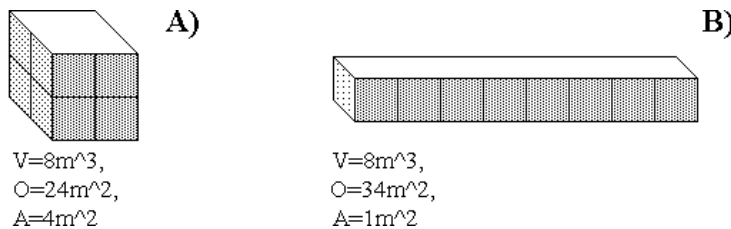
Freiballone sind in ihrer Flugrichtung von denen sie umgebenden Luftströmungen abhängig. Es gelingt mit Ballonen nur bei geeigneter Witterung und geschickter Strategie und Taktik des Aeronauten ein Ziel genau oder gar mehrfach anzufahren. Deshalb wurde schon sehr bald an der Lenkbarkeit des Freiballons experimentiert. Flügelschlagen und Rudern führten nicht zum gewünschten Erfolg. Verschiedene Luftschrauben wurden entwickelt und erprobt.



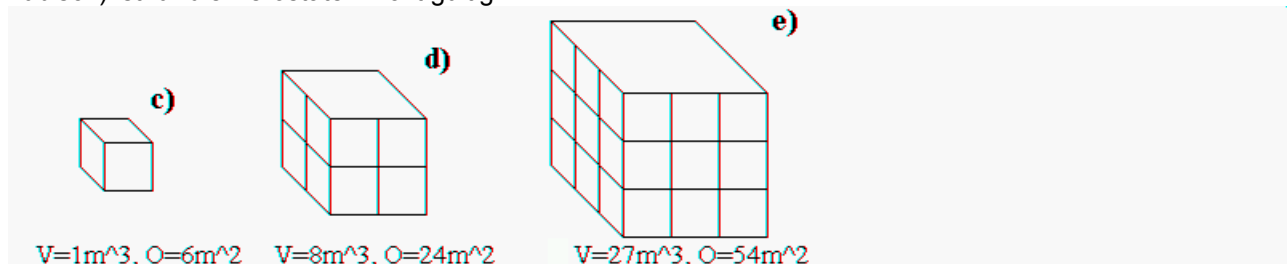
Der Energieaufwand der Fahrt steht in Abhängigkeit vom Quadrat der Geschwindigkeit. Die Widerstandsbeiwerte werden dabei auf die wichtigsten Geometriegrößen der Auftriebserzeugung oder der Widerstandserzeugung bezogen: $W = \rho/2 * v^2 * c_w * \text{Traggasvolumen}^{2/3}$ oder auch $W = \rho/2 * v^2 * c_w * \text{Hüllenoberfläche}$.

So entwickelten sich befriedigend lenkbare Luftschiffe (französisch: Dirigeables) erst nachdem Muskelkraft durch Motoren mit ausreichender Leistung und geringem Gewicht ersetzt wurde. Versuche mit Dampfmaschine (Giffard 1852), Leuchtgasmotor (Haenlein 1873), Elektromotoren (Tissandier sowie Renard und Krebs 1884), Benzinmotor (Wölfert 1897), Petroleummotoren (Santos Dumont) und Dieselmotoren führten zu Erfolgen.

Die Geometrie der Luftschiffe ist einerseits bestimmt durch die Forderung nach geringem Luftwiderstand durch Trägheitskräfte (Druckwiderstand) sowie nach kleiner Oberfläche, geringen Luftreibungskräften und geringem Eigengewicht des Körpers. Ausgehend vom kugelrunden Ballon wird bei gleichbleibendem Volumen (V) die Oberfläche (O) und damit das Strukturgewicht größer, je länglicher eine Luftschiffhülle ist. Die Querschnittsfläche (A) und der Druckwiderstand verringern sich. Achsenverhältnisse (Thickness Ratio, Durchmesser/Länge, D/L) von circa 1/3 bis 1/10 wurden gebaut.



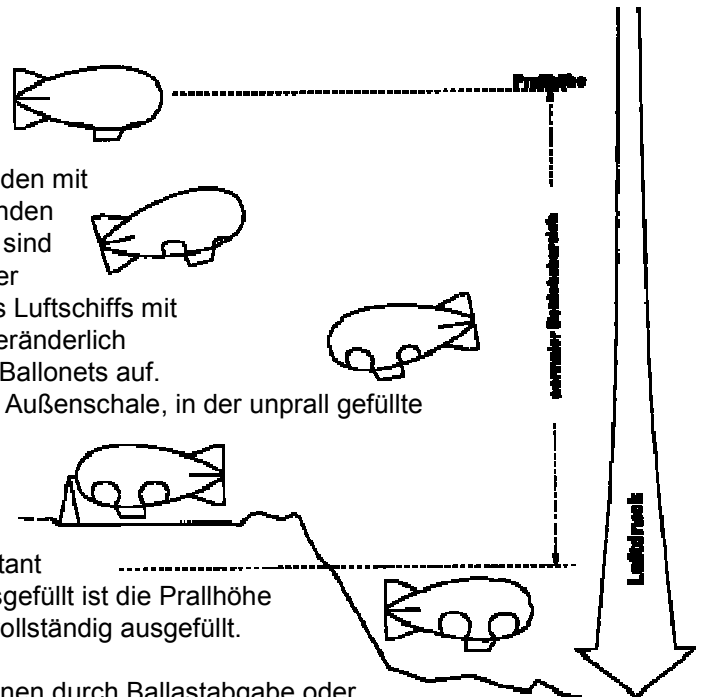
Weiterhin ist zu berücksichtigen, dass das Volumen (entsprechend dem Auftrieb) kubisch und Flächen quadratisch in Dimensionsvergleiche eingehen. Die Kraft, die durch den Innendruck auf die Hülle trifft, läuft in der zweiten Dimension mit: $F = \text{Druck} * p * \text{Radius}^2$. Die Membranspannungen in einer zylindrischen Hülle wachsen proportional mit dem Druck: $s = \text{Druck} * \text{Radius} / \text{Hüllendicke}$. Das Hüllengewicht wächst in erster Näherung kubisch (Oberfläche mal der Dicke). Da die Hülle neben der mechanischen Tragfunktion auch die Funktionen Gasdichtheit, Strahlungs- und Wetterschutz hat, ist die Dimensionsvergrößerung ihres Gewichtes zwischen quadratisch und kubisch anzunehmen. Das beschränkende „square-cube-law“ der Flugzeuge (Dimensionsvergrößerung mit gleicher Technologie: der aerodynamische Auftrieb wächst mit der Flügelfläche, also quadratisch, das Strukturgewicht läuft kubisch) ist für die Aerostaten nicht gültig.



B.2. Allgemeine Luftschiff-Technologien

Heute wird das Edelgas Helium wegen seiner Unbrennbarkeit als Traggas für Luftschiffe verwendet. Das Gas hat einen so hohen Preis, dass man im Normalbetrieb vermeiden möchte, es durch Ventile in die Atmosphäre abzulassen (verbunden mit einer dem aerostatischen Gleichgewicht entsprechenden Ballastabgabe). Druckfeste oder sehr flexible Hüllen sind nicht Stand der Technik. Luftschiffe werden also unter ihrer Prallhöhe betrieben. Um die äußere Form eines Luftschiffs mit membranartiger Hülle den Luftkräften möglichst unveränderlich entgegenzuhalten bläst man es mit Luftsäcken, den Ballonets auf. Sogenannte Starr-Luftschiffe haben eine biegesteife Außenschale, in der unprall gefüllte Gaszellen aufgehängt werden.

Das Luftvolumen und das Gasvolumen innerhalb des Luftschiffs verändern sich mit dem Umgebungsdruck und der Temperatur. Hat die konstant bleibende Traggasmasse das Volumen komplett ausgefüllt ist die Prallhöhe erreicht, die Ballonets sind leer, die Gaszellen sind vollständig ausgefüllt.



Steig- oder Sinkkräfte werden nicht wie bei Gasballonen durch Ballastabgabe oder Ventilzug sondern durch aerodynamische Kräfte erzeugt. Zur Erzeugung der aerodynamischen Kräfte werden klassischer Weise Propeller zum Vortrieb eingesetzt. Durch die Vorwärtsgeschwindigkeit können Steuerflächen wirksam werden und das Luftschiff kann in einen Anstellwinkel zur Anströmung gebracht werden um so mit dem gesamten Luftschiffkörper Auftrieb in die gewünschte Richtung erzeugen.

Aerodynamischer Auf- oder Abtrieb wird auch gebraucht um das durch den Kraftstoffverbrauch allmählich leichter werdende Luftschiff auszugleichen. Gestartet wird z.B. mit bis zu 5% Übergewicht um bei der Landung nicht zu leicht zu sein. Dieses Ballastproblem kann auch durch Abgaskondensation (Akron, Macon) oder einen Kraftstoff mit der Dichte von Luft gelöst werden (LZ130, Blaugas: Methan, Ethan, Propan,...).

Um unnötige Biegebelastungen in einer länglichen Tragwerksstruktur zu vermeiden, wäre es ideal, wenn sich Auftriebskräfte und Gewichtskräfte möglichst nah beieinander kompensieren (wie bei einem Nurflügelflugzeug). Will man in eine membranartige Hülle Kräfte einleiten, kann man Zugkräfte sehr gut an Linien tangential einleiten. An Hüllenteilen mit großen Radien und hohem Innenüberdruck (z.B. Luftschiffoberseite) bzw. an prall gefüllten Hüllen kann man über steife Auflageflächen in kleinerem Maße auch radial Zug- oder Druckkräfte aufbringen.

Die meisten Luftschiffe haben spindelförmige Körper, die nur recht wenig aerodynamischen Auftrieb vor allem auch im Verhältnis zum induzierten Widerstand erzeugen können. Spindelförmige Luftschiffkörper sind zudem richtungsinstabil, so dass sie Leitwerke am Heck benötigen. Die Steuerruder werden, wie bei Aeroplanen mit klassischer Drachenkonfiguration, meist als Wölbklappen an den Stabilisationsflächen ausgeführt. Die Anbringung von Stabilisatoren und Rudern am Heck bedeuten in mehrfacher Hinsicht Gewicht und Kräfte an einer ungünstigen Stelle. Die Hebelarme zum aerodynamischen Druckpunkt, zum Massenschwerpunkt und zum Auftriebsmittelpunkt sollten nicht zu klein werden, da die Leitwerke sonst zu groß und schwer würden. Das Heck hat meist kleinere Hüllensradien und damit kleinere Hüllenspannungen. Die Seitenleitwerksgröße und der Hebelarm wird oft derart minimiert, dass die Piloten eine merkbare Stabilitätsindifferenz um die Hochachse zu Regeln haben.

Da die Nutzlast und damit auch große Strukturgewichtsteile sinnvoller Weise unter dem Gasvolumen aufgehängt werden, liegt der Schwerpunkt von Luftschiffen meist weit unter dem Auftriebsmittelpunkt. Die dadurch entstehende rückstellende Pendelwirkung stabilisiert den Roll- und Nickwinkel. Da um die x-Achse spindelförmige Körper in keiner y-z-Schnittebene eine Vorzugsrichtung haben wird, auf eine Rollsteuerung bei den meisten Luftschiffen verzichtet. Der Nickwinkel eines

Luftschiffes wird mit Höhenrudern gesteuert und kann durch Umpumpen von Wasser oder Treibstoff oder durch unterschiedliche Befüllung der Ballonets durch Gebläse nach vorn oder hinten getrimmt werden. Je nach Bauart wird der maximale Anstellwinkel auf $\pm 30^\circ$ bis $\pm 70^\circ$ beschränkt. Ballonets sowie Wasser- oder Treibstofftanks die in Luftschiff längsrichtung eine zu große Ausdehnung haben, können ein Luftschiff durch Vor- oder Rückwärtsschwappen ungewollt vertrimmen. Auch eine unterschiedliche Wärmeverteilung des Traggases – insbesondere wenn es auf mehrere Traggaszellen aufgeteilt ist – kann das Luftschiff vertrimmen.

Die Höhensteuerung mit einem Ruder an einer heckseitigen Höhenstabilisierungsflosse kann bei langsamen Fahrtgeschwindigkeiten zu einer Ruderumkehrwirkung führen: die Auftriebskräfte am gewölbten Leitwerk sind größer als die des angestellten Luftschiffkörpers und das Leitwerk zieht das Heck und damit das ganze Luftschiff in die entgegengesetzte Richtung. (Beispiel: der Pilot drückt bei sehr langsamer Fahrt am Höhenruder: Pitch down und Steigflug). Eine Lösung sind Pendelrunder, die vorn am Luftschiff angebracht werden und mit einer direkt gerichteten Kraft die gewünschte Ruderwirkung effektiv und schnell erzeugen (Parseval u.a.).

Für Luftschiffe bestehen operative Beschränkungen vor allem auch durch bodenbetriebliche Faktoren. Insbesondere das Ein- und Aushallen, das Heranschweben an Verankerungspunkte (z.B. Ankermast) und das Schweben auf der Stelle zum Nutzlastaufnehmen und -absetzen sind bei den trägen Körpern mit ihrer großen Windangriffsfläche schwierig. Während hierfür früher für große Luftschiffe mehrere hundert Mann zum festhalten und treideln abkommandiert werden konnten sind heute technische Lösungen gefragt. Durch ein Verschwenken von Propellerantrieben kann Schub direkt in die gewünschte Richtung erzeugt werden. Werden solche Schubvektorantriebe mit ausreichenden Hebelarmen zum Schwerpunkt angeordnet, kann man auch ein Luftschiff ohne Vorwärtsgeschwindigkeit um alle gewünschten Achsen rotieren lassen oder verschieben.



Schubvektorluftschiff Zeppelin NT07

Ballone und Luftschiffe haben bei ausgewogenem aerostatischen Gleichgewicht die gleiche Dichte wie die sie umgebenden Luftmassen. Um die beobachtete träge Masse der Systeme zu berechnen, wurden verschiedene Modelle erstellt, welche die am Schiff haftenden Luftmassen (Grenzschicht, Ablösegebiete, Nachlauf) mit berücksichtigen. Die zusätzliche Trägheit (apparent mass) gibt M. Munk je nach Richtung (translatorisch, rotatorisch) und Form mit bis zu 50% des Körpervolumens an. Die sich verändernden Luftmassen im Luftschiff (z.B. Ballonets) müssen ebenfalls berücksichtigt werden.

Mit unterschiedlichen Erfahrungen und Anforderungen in der Zielsetzung sind verschiedenste Luftschiffformen entworfen, gebaut und geflogen worden. Es lassen sich folgende Grundsysteme bzw. Luftschiffklassen erkennen: Pralle, halbstarre und Starrluftschiffe werden nach ihrem Strukturcharakter unterteilt. Hybridluftschiffe werden nach den Anteilen ihrer Auftriebserzeugung benannt. Für die Konstruktionsprozesse ergeben sich jeweils gemeinsame und spezifische Herausforderungen.

B.3. Prall-Luftschiffe

Blimps, non-rigid airships, unstarre Luftschiffe

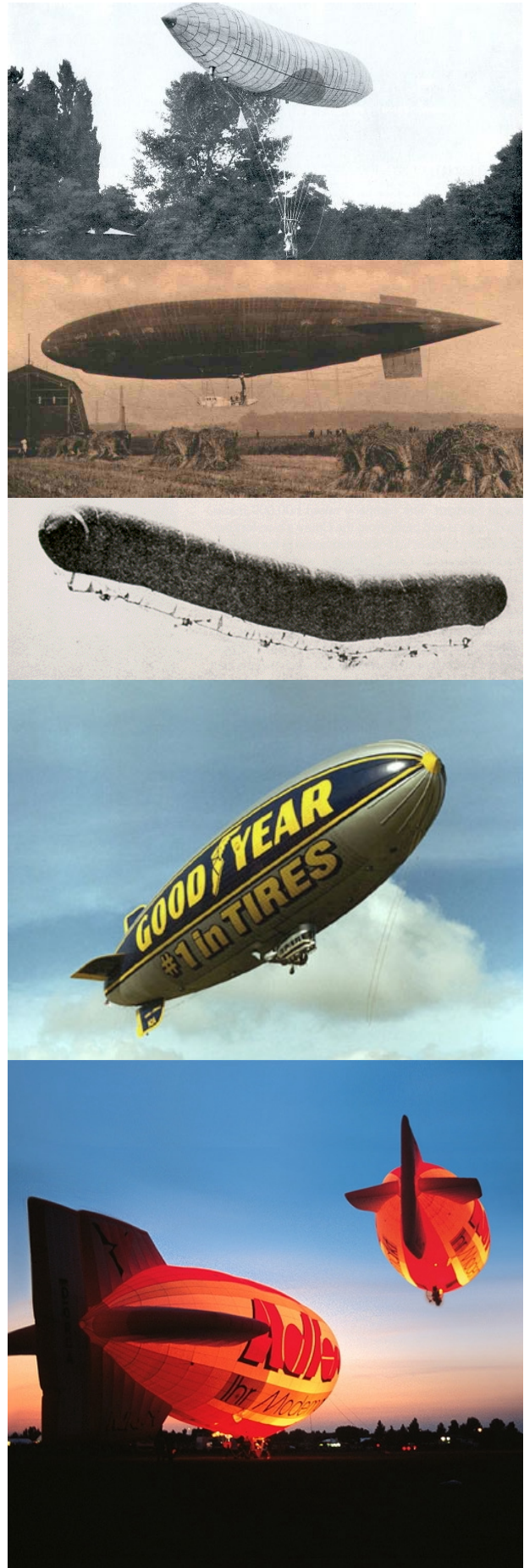
Blimps sind die am nächsten dem Freiballon verwandte Konstruktion. Um die geringe Steifigkeit der Prall-Luftschiffkonstruktion nicht zu überfordern, empfehlen sich kurze, dicke Luftschiffe mit nur einer Gondel im Schwerpunkt. Zur Verminderung des Luftwiderstandes kann die Gondel durch eine Innenaufhängung (erstmalig Baumgarten/Wölfert 1897) an die Hülle konstruktiv herangezogen werden. Die einfache Bauform - die weitgehend nur zugbelastete Konstruktion - weist theoretisch den besten Tragkraft-Nutzlast Koeffizienten auf. Ein ständiges Prallhalten des Luftschiffes durch Ballonetgebläse wird jedoch notwendig um z.B. die Funktion von Steuerflächen zu gewährleisten. Eine Teilung des Traggasvolumens auf einige wenige Traggaszellen aus Leckagegründen ist nur beschränkt sinnvoll.

Ein Prall-Luftschiff kann wie ein Freiballon nach Gebrauch oder bei Gefahr (Gewitter, Sturm) abgerüstet und in ungefülltem Zustand leicht transportiert und gelagert werden. Eine große Halle ist also nicht zwingend nötig - wird jedoch bei größeren Heliumluftschiffen wegen des hohen Preises des Edelgases wirtschaftlich sein. Bei kleineren Volumina wäre eine Rekompresseion lohnender.

Die einfache Zusammenlegbarkeit und eine gute Propangasinfrastruktur sind die wenigen Vorteile die Heißluft-Luftschiffe gegenüber Gasluftschiffen haben. Im Jahr 1997 existierten weltweit 50 Heißluftschiffe und 110 Lizenzen dafür - davon in Deutschland sieben Geräte und 20 Piloten. Von den 1997 international insgesamt 23 Gasluftschiffen, von denen vier in Deutschland gemeldet waren, ist ein Großteil den Prall-Luftschiffen hinzuzurechnen. Nur wenige der existierenden Gasluftschiffe haben eine halbstarre Bauweise, keines eine Starrbauweise. Es existierten 1997 laut FAI weltweit 78 Pilotenlizenzen für Gasluftschiffe - in Deutschland nur 10. Bisher werden in Deutschland Luftschiffe, unabhängig von ihrer Größe nur von Berufspiloten geführt. Eine Ausnahme bilden die kleinen Heißluft-Luftschiffe. Sie können mit einem erweiterten Ballonpilotenschein (PPL-D) gefahren werden. Die Einrichtung eines deutschen Privatpilotenscheines (PPL) für kleinere Gasluftschiffe ist mangels Bedarf bisher unterblieben.

Bilder von oben nach unten:

Santos Dumont, Parseval, Grenzen des Prallluftschiffes, Goodyear-Blimp, GEFA-Flug Heißluft-Luftschiffe

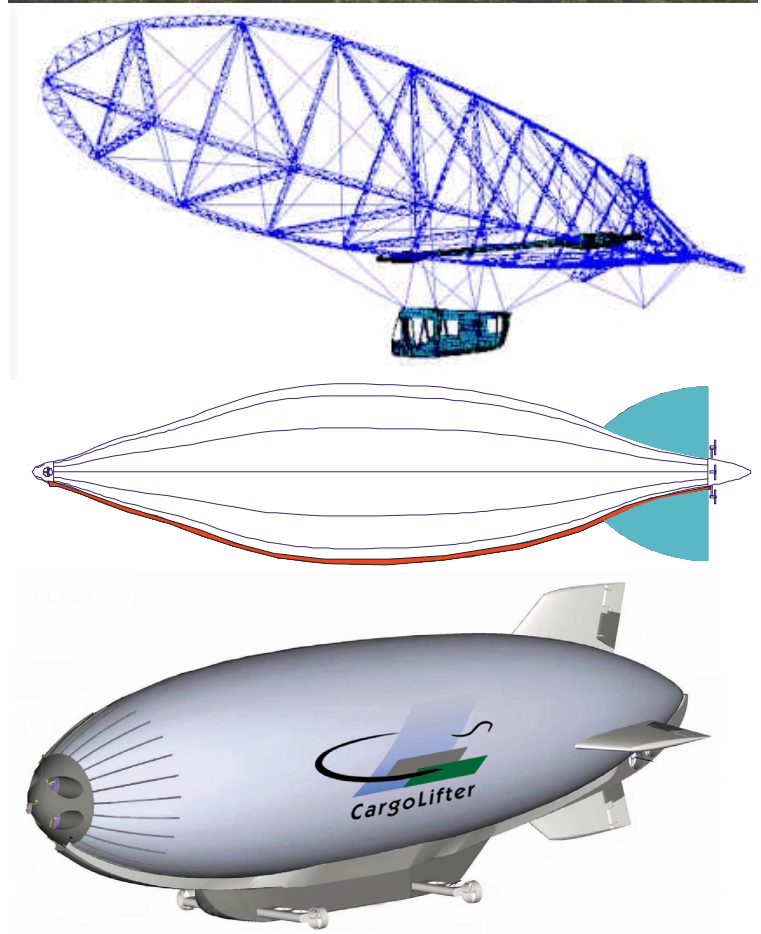


B.4. Halbstarre Luftschiffe semi-rigid airships, Kiel-Luftschiffe

Die Hülle wird auch hier durch ein oder mehrere Ballonets prall gehalten. Durch eine Aussteifung, meist einem Kiel, entsteht ein halbstarres System. Der Kiel verteilt die Anbringung der Einzellasten und Kräfte. Es können wirksame Hebelarme zum Schwerpunkt und zum aerodynamischen Druckpunkt konstruiert werden. Eine Durchbiegung des Hüllenkörpers wird verhindert. Falls der Kiel demontierbar und sogar zusammenlegbar ist, kann ein Bodentransport sowie eine platzsparende Lagerung im ungefüllten Zustand erfolgen. Die halbstarren Luftschiffe bilden variantenreiche Kompromisse zwischen den Blimps und den Starrluftschiffen. Die Bandbreite reicht von Kurzkielluftschiffen bis zur Konstruktion des Zeppelin-NT07, bei der das Gerüst fast die gesamte Länge, Höhe und Breite des Körpers umfasst.



Zodiac-Kielluftschiff E 9 (1933) vor der Halle in Paris-Orly

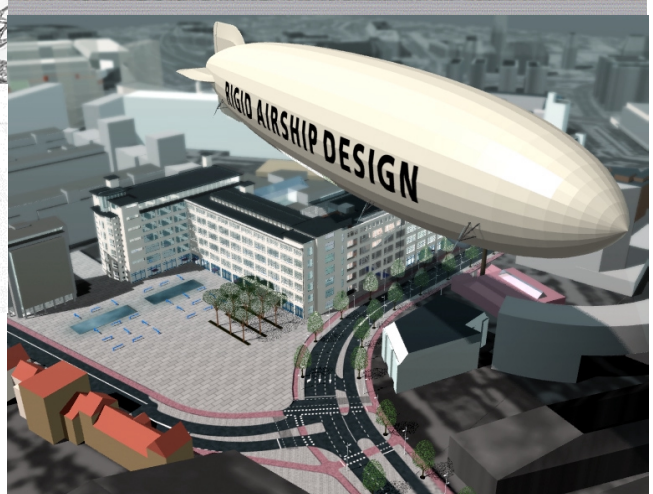
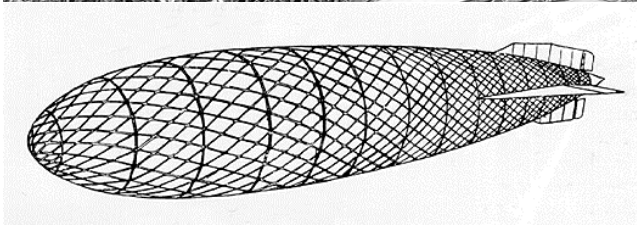
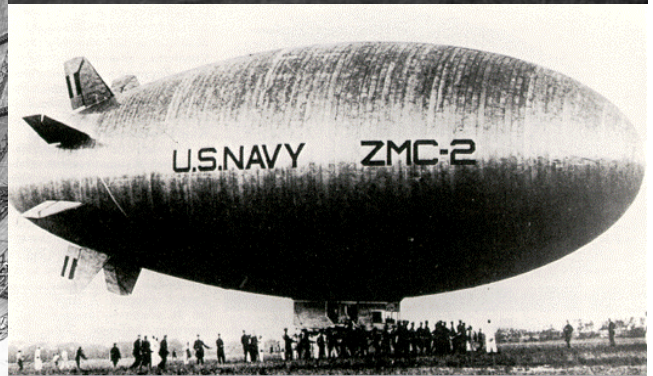
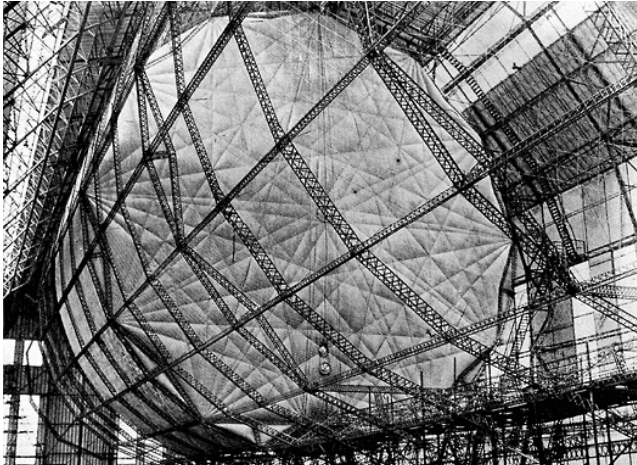


Bilder von oben nach unten:
Raab-Katzenstein,
Innengerüst des Zeppelin NT07,
Luftffisch N°1 mit Kielrohr,
CargoLifter CL160,
E9

B.5. Starrluftschiffe

Rigid airships

Die äußere Form wird durch ein steifes Gerüst, einen starren Rumpf, gebildet. Das Traggas ist in Zellen (Ballonen) im Rumpf untergebracht. Diese sind je nach Außenluftdruck mehr oder weniger gefüllt. Motoren, Gondeln, Steuerflächen können überall im oder an den Rumpf konstruiert werden. Die hohe Steifigkeit und der große Querschnitt der Struktur erlauben längere und schnellere Luftschiffe als bei Prall- oder Halbstarrbauweise. Aufgrund des höheren spezifischen Strukturgewichtes ist die Starrbauweise eher für große, schnelle Schiffe geeignet. Herstellungs-, Reparatur- und Wartungskosten sind höher als bei den anderen Systemen anzunehmen, da der Aufbau eines Starrluftschiffes komplexer ist und nicht durch Entleeren des Traggases verkleinert werden kann. Hallen für Reparatur und Wartung sind nötig.



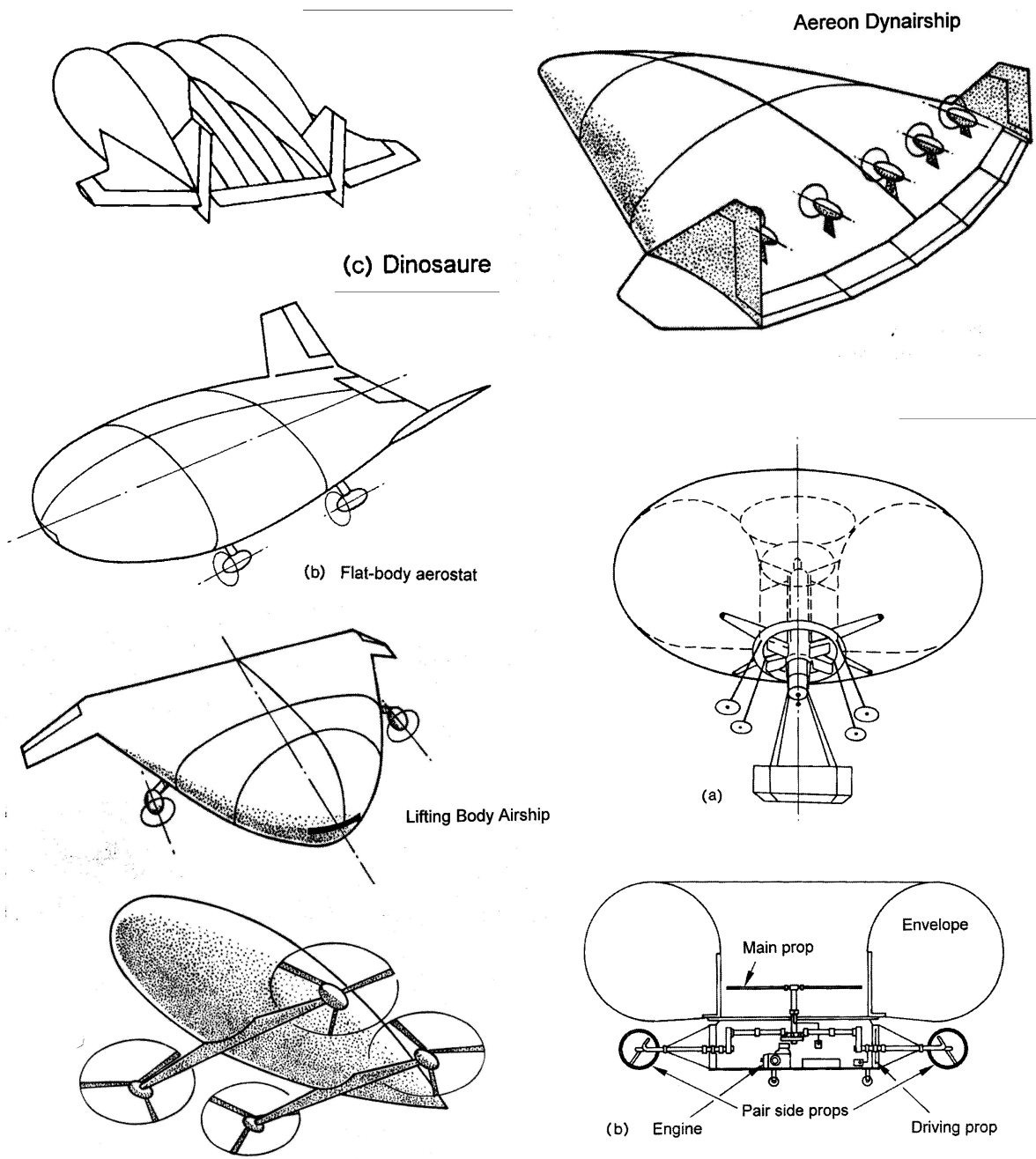
Bilder links von oben nach unten:
Gaszelle im Zeppelin, Zentraler Laufsteg im Zeppelin,
Struktur eines Schütte-Lanz-Luftschiffes

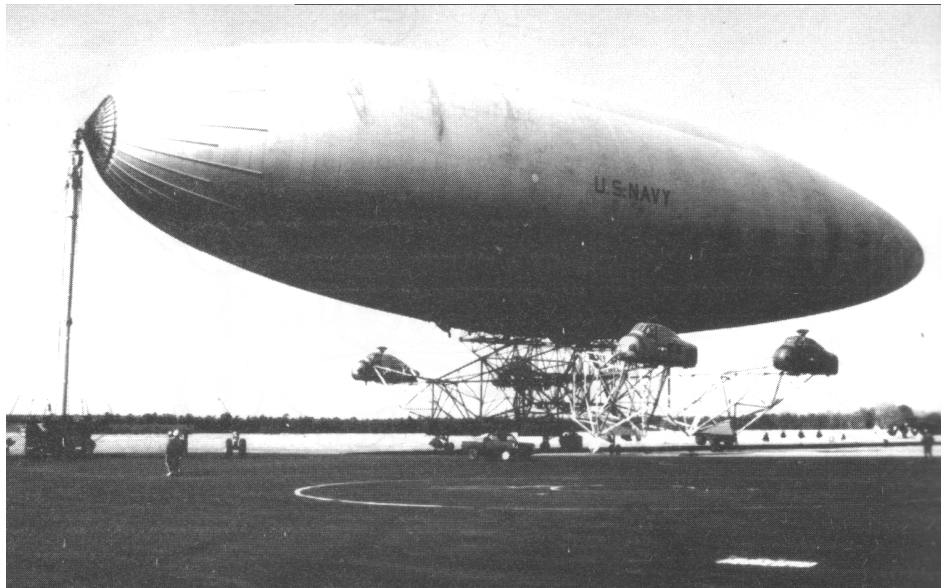
Bilder rechts von oben nach unten:
Zeppelin am Boden, Metalclad, Projekt RAD

B.6. Hybridluftschiffe

Der Entwurfsraum motorisch angetriebener Luftfahrzeuge kann als Dreiecksfläche zwischen Flächenflugzeug, Luftschiff und Hubschrauber betrachtet werden. Mischungen von Luftschiff und Flächenflugzeug (die weniger als 95% ihres Gesamtgewichtes durch aerostatischen Auftrieb tragen) werden Dynastaten, Hybride zwischen Luftschiff und Hubschrauber Rotastaten genannt.

Die Motivation Hybridluftschiffe zu konstruieren ist, die Vorteile der verschiedenen Auftriebsprinzipien miteinander zu kombinieren. Man verspricht sich vor allem die Vereinfachung von Landemanövern und des Be- und Entlade-Ballastierungsproblem (Austausch von Nutzlast gegen Ballast) sowie die Lösung des Problems der Veränderung der Kraftstoffmasse während des Fluges. Eine Erhöhung der Fluggeschwindigkeiten und eine höhere Agilität könnten weitere Optimierungsziele sein. Eine Kernfrage von Hybridluftschiffideen ist die nach einem realisierbaren Optimum zwischen gespartem Traggasvolumen und entsprechend geringerem Reibungswiderstand versus einem höheren induziertem Widerstand, höherem Strukturgewicht und ggf. höherem Kraftstoffverbrauch.





Eine Experimental-Kombination von einem Blimp und vier Hubschraubern, der Helistat von Piasecki

C. Wirtschaftlichkeit von Luftschiffen

C.1. Produktnutzen und Nischen im Luftverkehrsmarkt

Die Flugleistungen wie Flugdauer, Reichweite sowie die Nutzlastkapazitäten der Luftschiffe übertrafen die der Flugzeuge am Anfang des zwanzigsten Jahrhunderts um ein vielfaches. Die Entwicklung der Aerodynamik wurde wahrscheinlich vor allem durch deren militärische Bedeutung besonders gefördert. Am Ende des ersten Weltkrieges wurden die Luftschiffe in den Leistungen Geschwindigkeit und Flughöhe durch Kampfflugzeuge eingeholt und boten ein großes und träges Ziel. Die wirtschaftliche Nutzung der Luftschiffe hatte in den zwanziger und dreißiger Jahren dieses Jahrhunderts ihren Höhepunkt: Expeditionen, transozeanischer Post- und Passagierverkehr sowie Reklameflüge mit Lichtwerbung verursachten viele hunderttausende Flugkilometer.

Die direkten Betriebskosten können für Transporte von A nach B in Kosten pro Transportarbeit [€/t km], [€/Pax km], für touristische Zwecke in Kosten pro Zeit und Passagier [€/Pax h] oder für Werbung und Beobachtung in Kosten pro Zeit [€/h] verglichen werden. Die Transportarbeit [t km] ergibt sich aus der jeweiligen Nutzlast mal der zurückgelegten Strecke. Die Transportleistung entspricht der Transportarbeit pro Zeit [t km/h] also der effektiven Nutzlast mal der effektiven Geschwindigkeit. Die theoretische Transportleistung, die theoretische Produktivität, setzt sich aus maximaler Nutzlast und Designgeschwindigkeit zusammen.

Die Transportleistungen der langsamen Luftschiffe wurden von den Flugzeugen im zweiten Weltkrieg überholt. Heutige Großraumflugzeuge übertreffen die Transportleistungen der Luftschiffe um ein vielfaches:

LFZ-TYP	max.Nutzl. [t]	Vreise [km/h]	Produktivität [t km/h]
LZ Bodensee	10	132	1320
LZ-127	15	110	1650
Cargolifter	160	90	14400
Transall	16	500	8000
B747-230B	53,8	842	45299
B747Fracht	105	842	88410

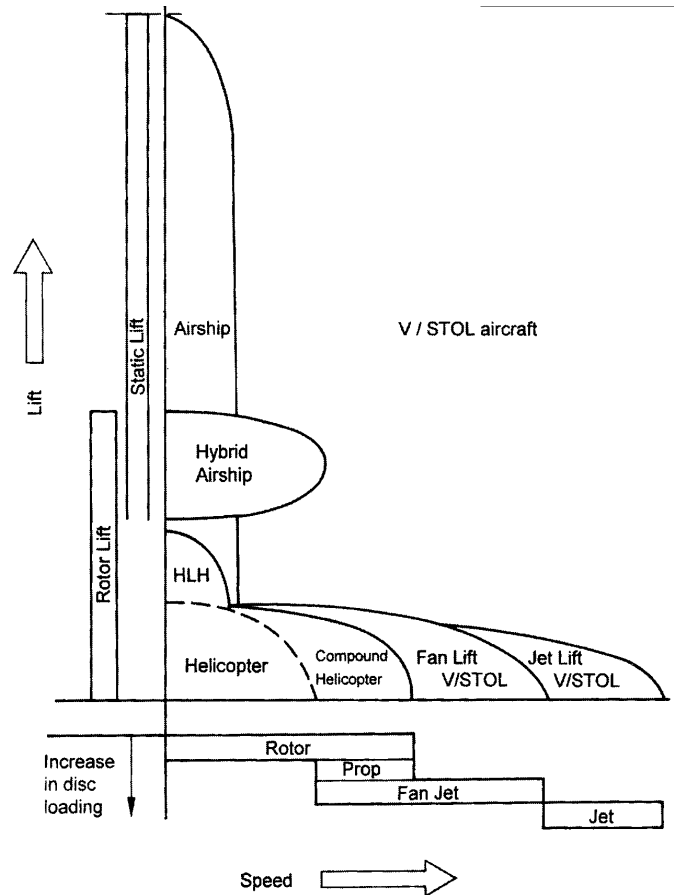
Luftschiffe im aerostatischen Gleichgewicht haben im Gegensatz zu Flugzeugen keine Mindestgeschwindigkeit. Die erforderliche Leistung beim Langsamflug nimmt nicht, wie beim Starrflügler oder Drehflügler zu - sie nimmt ab. Die Reisegeschwindigkeit und damit auch der Kraftstoffverbrauch lassen sich je nach Flugaufgabe in einem weiten Bereich variieren.

Man kann den Luftwiderstand (F_w) eines Luftschiffes als proportional zum Quadrat seiner Geschwindigkeit (v) sehen: $F_w \sim v^2$.

Vernachlässigt man die Energie zur Versorgung der diversen Betriebsausrüstungen ist die Brennstoffmenge (M_{Br}) proportional zur Vortriebsarbeit aus Kraft mal Weg (Reichweite R): $F_w * R \sim M_{Br}$. Beim Verbrauch der gleichen Brennstoffmenge ist also die Reichweite: $R \sim 1/v^2$.

Mit der Reichweite als Produkt von Reisedauer (T) und der Geschwindigkeit, $R = v * T$, wird die Reisedauer: $T = R / v \sim 1/v^3$

Technisch und ökonomisch werden Luftschiffe Flugzeuge, Hubschrauber, Wasser- oder Landfahrzeuge in ihren Einsatzbereichen nicht ersetzen können. Es gibt jedoch Nischen, in denen Marktanteile übernommen oder sogar neue Angebote gemacht werden können. Überwachungsfüge, Langzeitbeobachtungen und Tourismus profitieren von der fehlenden Mindestgeschwindigkeit und der Umweltfreundlichkeit des Luftfahrzeugs. Für touristische Anwendungen (z.B. Kreuzfahrten) ist es günstig, dass primär die Flugdauer bezahlt wird - nicht die Produktivität [Sitz * km /h]. CargoLifter versucht die Nische des Schwertransportes von Punkt zu Punkt zu besetzen.



C.2. Einsatzzuverlässigkeit und Utilisation

Der intelligente Einsatz von Luftschiffen kann durch Häufigkeit und Dauer von Leerfahrten, des Auslastungsgrades, der Utilisation (Stunden / Jahr) sowie durch Mehrfachnutzen (z.B.: Passagierflug und Verkehrsüberwachung und Werbung) gemessen werden.

Die Einsatzzuverlässigkeit sowie die Utilisation eines Luftschiffes hängt im starken Maße vom Wetter ab. Bei starker Thermik, starkem Wind oder gar Gewitter ist ein Luftschiff einem Flugzeug oder Hubschrauber unterlegen. Die mäßige Eigengeschwindigkeit macht ein Umgehen des Wetters oder ein Gegenhalten schwierig. Andererseits kann das kluge Ausnutzen von Windsystemen viel Energie sparen. Die Optimierung des Flugbetriebs in Abhängigkeit vom Wetter und geografischen Erhebungen wurde schon zu Zeiten der großen Zeppeline verfeinert.

Die flugmeteorologische Beratung für Luftschiffe oder Gasballone braucht neben der Einschätzung lokaler Wettersysteme vor allem auch längerfristige und großräumigere Prognosen zur Flugvorbereitung und insbesondere zur fortlaufenden Planung des weiteren Flugverlaufes als dies für Flugzeuge heute üblich ist. Die Leistungsfähigkeit einer intensiven meteorologischen Flugplanung und -durchführung wurde mit der Weltumrundung der Ballonfahrer Piccard und Jones gezeigt.

Meteorologische Navigation metreological navigation



C.3. Sicherheit

Auch wenn am bekannten Unglück der Hindenburg LZ 129 wahrscheinlich nicht die Wasserstofffüllung ursächlich war, wird heute – außer bei Freiballonen – das chemisch inerte Helium als Füllgas benutzt. Die Struktur der Gaszellen oder der Hüllen von Aerostaten muss derart konstruiert und bemessen sein, dass keine größeren Leckagen entstehen können (z.B. Rissstopper). Das Traggas auf viele Kammern oder Zellen aufzuteilen hat nur bei halbstarren oder starren Konstruktionen einen Sinn. Blimpkonstruktionen verlieren beim unprall werden meist ihre Steuerbarkeit. Die Ballonetgebläse solcher Luftschiffe unterliegen also erhöhten Anforderungen.

Ein Vorteil von klassischen Luftschiffen ist die nicht vorhandene Mindestgeschwindigkeit. Aerostatisch ausgewogene Luftschiffe werden selbst nach Ausfall aller Motoren und aerodynamischen Steuerungseinrichtungen nur langsam sinken und wie ein unkontrollierter Freiballon mit der jeweiligen Bodenwindgeschwindigkeit eine Notlandung und gegebenenfalls am Boden eine längere Schleiffahrt machen. Bei einer unkontrollierten Freiballonlandung, also nach Ausfall aller Steuerungsmöglichkeiten, schätzt man mit einer über 80%igen Überlebenschance für die Passagiere. Bei Flugzeugen und Hubschraubern ist bei einem Totalausfall der Steuerung und des Antriebes die Überlebenschance sehr gering. Luftschiffe werden sich je nach Bauart und Größe zwischen den beiden Extremen befinden. Hybride oder der CargoLifter im lang andauernden Schwebeflug während seiner Load Exchange Procedure (LEP) haben höhere Anforderungen an die Ausfallsicherheit von Triebwerken und Steuerung.

Der Betrieb von Luftschiffen erfordert auch heute noch größere Bodenmannschaften zum Treideln, Anmasten und Ein- und Aushallen. Durch verbesserte Flugmechanik und Automation (drehbare Triebwerke, Heck- und Bugstrahlruder, aktive Stabilisierung, Vorhersage von Böen, Thermikablösungen, neuartige Verankerungstechnologien) könnte der Personalaufwand minimiert und die Zuverlässigkeit und Sicherheit erhöht werden. Die Weiterentwicklung von sicheren und effektiven Bodenbetriebsverfahren hat eine hohe Priorität.



Zum Heranbringen eines landenden Großluftschiffs an den Ankermast waren oft mehrere hundert Mann erforderlich.



Verwirrspiel an den Haltespinnen von LZ 127 »Graf Zeppelin«.

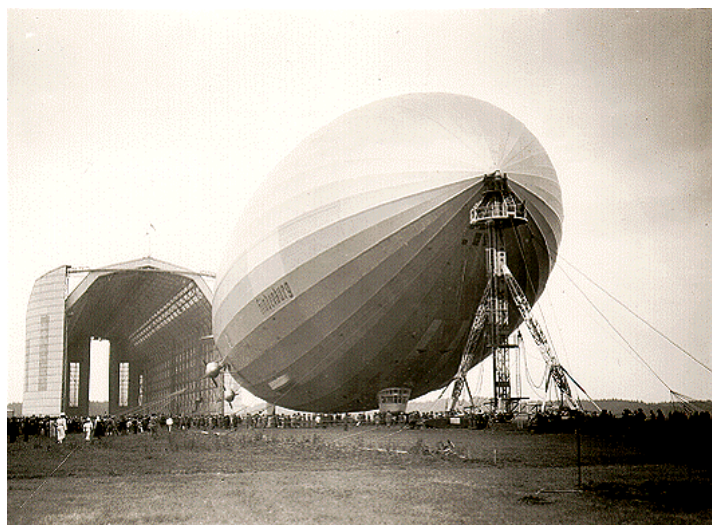
C.4. Umwelt & Infrastruktur

Luftschiffe bieten durch ihre physikalischen Gegebenheiten ein großes Potential für Lärminderung. Die langsame Fluggeschwindigkeit sowie die großen Volumina ermöglichen Lärmkapselung und große, langsamrotierende Propeller. Aerostatisch ausgeglichene Luftschiffe bei denen die Transportfunktion von A nach B zweitrangig ist (z.B. Werbung oder touristische Zwecke), können während langer Zeiten des Reisefluges mit einem minimalen Energiebedarf für den Vortrieb betrieben werden.

Bei der Verbrennung von fossilen Energievorräten entstehen als giftige Schadstoffe Kohlenmonoxid, unverbrannte Kohlenwasserstoffe, Ruß und Stickstoffoxide. Kohlendioxid soll durch Klimaveränderung als Schadstoff wirken. Auch der Einbringungsort der Schadstoffe ist von Bedeutung. Die Schadstoffbelastung der Tropopause und der Stratosphäre durch Verkehrsflugzeuge ist weiterhin Diskussions-thema. Luftschiffe werden, um allzu große Ballonets zu vermeiden, nur für die Überwindung von wenigen tausend Höhenmetern konstruiert. Die Abgase werden also in die Troposphäre eingebracht. Da beim Luftschiff das Gewicht und weniger das Volumen des Energievorrats kritisch ist, sind Alternativen zu Mogas, Avgas oder Kerosin zahlreich (z.B. Erdgas, LH₂, Solarantrieb).

Luftschiffe können sich weitgehend der Infrastruktur, die für Flugzeuge vorgehalten wird bedienen. Bei Sichtflugbedingungen wird ein Luftschiff aufgrund seiner Größe und seiner mäßigen Geschwindigkeit jedem anderen Luftraumbenutzer früh auffallen und genügend Zeit für Ausweich- oder Überholmanöver lassen. Auch wenn die heutigen Luftschiffe alle nach Sichtflugregeln (VFR oder NightVFR) fliegen, ist ein Verkehr bei schlechteren Sichten unterhalb der Limits denkbar und gegebenenfalls ökonomisch sinnvoll. Der Instrumentenflug von Luftschiffen müßte jedoch nach anderen, noch zu entwickelnden, Regeln und Verfahren durchgeführt werden. Das Abfliegen von starren Airways würde nicht nur die schnelleren Flugzeuge behindern. Die zum Wettergeschehen optimale Route, Geschwindigkeit und Flughöhe könnte sich bei langen Reisezeiten öfter ändern. Viele Änderungen des Flugplanes während des Fluges wären die Folge. Zudem wird ein optimaler Flugweg eines Luftschiffes ggf. auch die Reichweiten von klassischen Funknavigationshilfen bzw. die Radar Vectoring Altitudes der jeweiligen Luftverkehrskontrollen unterschreiten. Um ein Controlled Flight into Terrain (CFIT) unter Instrument Meteorological Conditions (IMC) zu vermeiden wären die Möglichkeiten einer Navigation nur auf Basis von Satellitennavigationsystemen (GPS, DGPS) näher zu untersuchen. Die Flugführung durch die Piloten könnte durch ein Terrain Augmentation und Warning System (TAWS) erleichtert werden.

Der Landschaftsverbrauch durch Luftschiffe ist im Vergleich zu Flugzeugen geringer anzunehmen. Die Flugplatz-Infrastruktur für Luftschiffe benötigt zwar keine langen Landebahnen - große Werfthallen und Ankermasten mit Schwojeradien brauchen aber auch ihre Flächen. Die Versiegelung von Oberflächen durch Beton oder Asphalt wird sich auf Luftschifflandeplätzen in Grenzen halten können. Es werden nur Bodenanker bzw. Fahrwege für fahrbare Ankermasten sowie für Versorgungsfahrzeuge und den Nutzlasttransport benötigt. Die Fahrwege müssen nicht die Gesamtmasse der Luftschiffe tragen. So sind mit mobilen Ankervorrichtungen auch Außenlandungen für kleine und mittelgroße Luftschiffe durchführbar. Das Lastabsetz- und Lastaufnahmesystem des CargoLifters soll mit geringster Infrastruktur auskommen. Mehrere Bodenanker und ausreichend vorrätiges Ballastwasser sollen genügen. So soll ein Punkt-zu-Punkt-Transport von schweren, sperrigen Gütern möglich werden.



E. Quellen und weiterführende Literatur

E.1. Bücher und Zeitschriften

Aerodynamic Theory, W. F. Durand, Dover Publications, Volume VI:
Division Q: Aerodynamics of Airships, Max M. Munk,
Division R: Performance of Airships, K. Arnstein, W. Klemperer

Airship Technology, Gillett & Khoury, Cambridge Aerospace Series 10

Ballon Sport Magazin, Deutscher Freiballon-Sportverband e.V.

Bau und Betrieb von Prall-Luftschiffen, Teile 1 und 2, Richard Basenach, Verlag Franz Benjamin Auffarth 1912

Bitterfelder Traditionen als Luftschiff- und Freiballonstadt, Teil1, Dr. Jürgen Seifert, Kreismuseum Bitterfeld 1988

Die großen Zeppeline, Kleinheins, VDI-Verlag, 2.Aufl.1996

Die Luftschiffahrt, v. Zeppelin u.a., Stuttgart 1909

Grundlagen der Ballonführung, Prof. Robert Emden, B. G. Teubner 1910

Handbuch für Freiballonführer, Deutscher Freiballon-Sportverband e.V., Ausgabe 1991

Jane's all the World's Aircraft, verschiedene Jahrgänge

Konzeption der Navigationsausrüstung von Luftschiffen, Florian Böhm, TU Berlin 2000

Leichter als Luft - Ballone und Luftschiffe, Die deutsche Luftfahrt Bd.26, Haaland, Knäusel, Schmitt, Seifert, Bernard & Graefe Verlag 1997

Luftschiff und Binnenschiff, TU Berlin, Verkehrswesenseminar, Projekt 97/98

Proceedings of International Airship-Conference, Universität Stuttgart 1993 und 1996

Verfahren zur Optimierung von Luftschiffen, Ingolf Schäfer, Universität Stuttgart 1997
(Kleinluftschiffe bis 100 kg)

Zeppelin, die Geschichte der Luftschiffahrt, Zeppelin Museum Friedrichshafen, CD-ROM, 1997

E.2. Internetadressen

<http://spot.colorado.edu/~dziadeck/airship.html>

www.aeronauticum.de/indexstart.htm

www.airship.com

www.americanblimp.com

www.ballonbau.de

www.blimpguys.com/outdoor-md.htm

www.cargolifter.com

www.globalskyships.com

www.goodyear.com/us/blimp/index.html

www.heliliner.de

www.luftschiff.de

www.luftschiff2000.de

www.myairship.com/index.html

www.pilotundluftschiff.de

www.rigidair.com

www.transatlantische.com

www.tu-berlin.de/~LUFTFFISCH

www.wdl-luftschiff.de

www.zppelin-nt.com

F. Ballon- und Luftschiffhersteller:

21st Century Airships Inc, 110 Pony Drive, Newmarket, Ontario, Canada L3Y 4W2

ABC, American Blimp Corporation, 1900 North-East 25 Ave., Suite 5, Hillsboro, Oregon 97124, U.S.A.

Advanced Technologies Group, No. 2 Hangar, Cardington Field, Shortstown, Bedford MK42 0TJ, UK

Ballonbau Wörner GmbH, Zirbelstraße 57c, 86154 Augsburg

Cameron Balloons LTD, St John's Street, Bedminster, Bristol BS3 4NH, UK

CargoLifter Development GmbH, CargoLifter Werft Briesen - Brand 1, 15910 Krausnick

GEFA-Flug, Gesellschaft zur Entwicklung und Förderung Aerostatischer Flugsysteme GmbH,
Weststraße 24c, 52074 Aachen

Lindstrand Balloons LTD, Maesbury Road, Oswestry, Shropshire SY10 8ZZ, UK

Schröder fire balloons GmbH, Am Bahnhof 1, 54338 Schweich

WDL Luftschiffgesellschaft mbH, Flughafen Essen-Mühlheim, 45470 Mühlheim/Ruhr

Zeppelin Luftschifftechnik GmbH, Allmannsweiler 132, 88046 Friedrichshafen