Anhang C: Flugzeuge II

What we need to do is to look at how you make air travel more energy efficient, how you develop the new fuels that will allow us to burn less energy and emit less.

Tony Blair

Hoping for the best is not a policy, it is a delusion.

Emily Armistead, Greenpeace

◦Wo liegen die fundamentalen Beschränkungen bei Flugreisen? Erfordern die physikalischen Gesetze des Fliegens unvermeidbare Mengen an Energie, pro Tonne, pro Flugkilometer? Was ist die maximale Distanz, die eine 300-Tonnen Boeing 747 fliegen kann? Was die einer 1 kg schweren Pfuhlschnepfe, oder einer 100 g schweren Küstenseeschwalbe?

Genau wie Kapitel 3, wo wir den Verbrauch von Autos abschätzten, durch Anhang A weitergeführt wurde, so soll dieses Kapitel die Gedanken aus Kapitel 5 weiterführen und erhellen, wohin die Energie beim Fliegen geht. Die einzigen physikalischen Formeln, die dazu erforderlich sind, sind die Newtonschen Gesetze der Bewegung, die ich an den jeweils erforderlichen Stellen erläutern werde.

Diese Berechnungen werden es uns erlauben, Fragen zu beantworten wie „würde der Flugverkehr viel weniger Treibstoff verbrauchen, wenn wir mit langsameren Propellermaschinen reisen würden?“ Es stehen uns eine Menge Gleichungen bevor: Ich hoffe, Sie genießen sie!

Fig.C.1: Vögel: zwei Küstenseeschwalben, eine Pfuhlschnepfe, eine Boeing 747.

Wie man fliegt

Flugzeuge (und Vögel) bewegen sich durch die Luft, und erfahren dabei genau wie Autos oder Züge eine Luftwiderstandskraft; ein Großteil der benötigten Energie eines Flugzeugs wird verbraucht, indem das Flugzeug gegen diese Kraft vorwärts getrieben wird. Zusätzlich benötigen Flugzeuge im Gegensatz zu Autos oder Zügen Energie, *um oben zu bleiben*.

Flugzeuge bleiben oben, indem sie Luft nach unten drücken. Wenn ein Flugzeug Luft nach unten drückt, drückt diese Luft das Flugzeug nach oben (denn Newtons drittes Gesetz erfordert das). So lange dieser Druck nach oben, genannt Auftrieb, groß genug ist, das nach unten ziehende Gewicht des Flugzeugs aufzuheben, wird das Flugzeug einem Absturz entgehen können.

Wenn das Flugzeug Luft nach unten drückt, gibt es dieser Luft kinetische Energie. Die Erzeugung des Auftriebs erfordert also Energie. Die gesamte benötigte Leistung des Flugzeugs ist die Summe aus der zur Erzeugung des Auftriebs benötigten und der zur Überwindung des Luftwiderstands benötigten Leistung. (Die für den Auftrieb erforderliche Leistung wird übrigens auch „induzierter Luftwiderstand“ genannt. Aber ich nenne sie hier Auftriebsleistung P_{lift}.)

Die zwei Gleichungen, die wir benötigen, um die Theorie des Fliegens auszuarbeiten, sind das zweite Newtonsche Gesetz:

$$\text{Kraft} = \text{Rate der Impulsänderung} \tag{C.1}$$

und das oben schon erwähnte dritte Newtonsche Gesetz

$$\text{Kraft von A auf B} = -\text{Kraft von B auf A}\,. \tag{C.2}$$

Wenn Sie keine Gleichungen mögen, kann ich Ihnen jetzt die Pointe verraten: Wir werden herausfinden, dass die für den Auftrieb erforderliche Leistung *gleich* der zur Überwindung des Luftwiderstandes erforderlichen Leistung ist. Das Erfordernis des „oben Bleibens“ *verdoppelt* also die erforderliche Leistung.

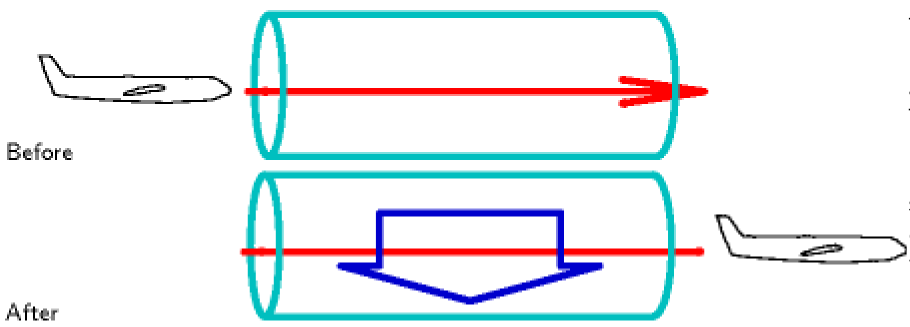


Fig.C.2: Ein Flugzeug durchfliegt eine Röhre von Luft. Sobald das Flugzeug durchgeflogen ist, wurde die Luft nach unten gedrückt. Die Kraft, die das Flugzeug auf die Luft ausübte und die sie nach unten beschleunigte ist gleich groß und entgegengesetzt zu der aufwärtsgerichteten Kraft, die die Luft auf das Flugzeug ausübte.

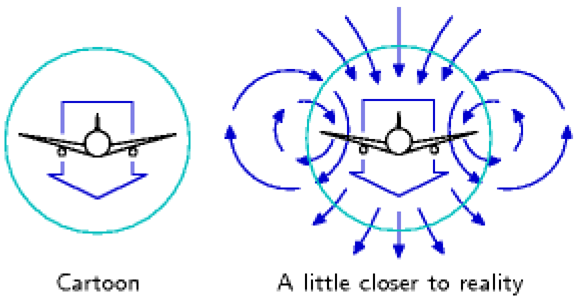


Fig.C.3: Unser Modell nimmt an, dass das Flugzeug eine Wurst von Luft in seinem Kielwasser zurücklässt, die sich nach unten bewegt. Ein realistisches Bild beinhaltet einen komplexeren verwirbelten Fluss. Die realen Verhältnisse sind in Fig.C.4 zu sehen.

Lassen Sie uns ein Modell erstellen für den Auftrieb eines Flugzeugs bei der Geschwindigkeit v. In einer Zeit t fliegt das Flugzeug die Strecke vt weiter und lässt hinter sich eine Wurst nach unten strömender Luft (Fig.C.2). Wir nennen die Querschnittsfläche dieser Wurst A_S. Der Durchmesser der Wurst ist etwa gleich der Flügelspannweite des Flugzeugs. (Innerhalb dieser Wurst ist eine kleinere Wurst wirbelnder Luft mit einer Querschnittsfläche vergleichbar mit der Aufstandsfläche der Flugzeugrumpfes.) Tatsächlich sind die Details der Luftwirbel viel interessanter als das Würste-Bild: Jede Flügelspitze hinterlässt einen Wirbel, in dem die Luft innerhalb der Flügelspitze schnell abwärts strömt, und die Luft jenseits (außerhalb) der Flügelspitze aufwärts (Fig.C.3 und C.4). Diese aufwärts strömende Luft wird von Vögeln genutzt, wenn sie in Formation fliegen: Genau hinter den Flügelspitzen des Vogels ist ein netter kleiner Aufwind. Wie auch immer, zurück zu unseren Würsten.

Fig.C.4: Luftstrom hinter einem Flugzeug. Foto vom NASA Forschungszentrum Langley.

Die Masse der Wurst ist

$$m_{\text{wurst}} = \text{Dichte x Volumen} = \rho\ vt\ A_s. \tag{C.3}$$

Sagen wir, die gesamte Wurst bewegt sich nach unten mit der Geschwindigkeit u und bestimmen nun, wie groß u sein muss, damit das Flugzeug eine Kraft erfährt, die gleich seinem Gewicht mg ist. Der Abwärtsimpuls der Wurst, der in der Zeit t erzeugt wird, ist

$$\text{Masse x Geschwindigkeit} = m_{\text{wurst}}\ u = \rho\ vt\ A_s\ u. \tag{C.4}$$

Und nach Newtons Gesetz muss dieser Impuls gleich dem Impuls sein, den die auf das Flugzeug wirkende Gewichtskraft in der Zeit t erzeugt, nämlich

$$mgt\ . \tag{C.5}$$

Umstellen dieser Gleichung liefert

$$\rho\ vt\ A_s\ u = mgt\ , \tag{C.6}$$

was wir nach der gesuchten Abwärtsgeschwindigkeit der Wurst auflösen können:

$$u = \frac{mg}{\rho v A_S}\ .$$

Interessant! Die Geschwindigkeit der Wurst ist umgekehrt proportional zur Geschwindigkeit v des Flugzeugs. Ein langsam fliegendes Flugzeug muss die Luft kräftiger nach unten drücken als ein schnelles, weil es weniger Luft pro Zeiteinheit trifft. Das ist auch der Grund, warum landende Flugzeuge, die langsam fliegen, ihre Landeklappen ausfahren: Sie erzeugen so einen größeren und steileren Flügel, der die Luft stärker nach unten drückt.

Was sind nun die Energiekosten für dieses Nach-unten-Drücken der Wurst mit der erforderlichen Geschwindigkeit u? Die erforderliche Leistung ist

$$P_{lift} = \frac{\text{kinetische Energie der Wurst}}{\text{Zeit}} \tag{C.7}$$

$$= \frac{1}{t}\frac{1}{2} m_{Wurst} u^2 \tag{C.8}$$

$$= \frac{1}{2t}\rho vt\ A_S \left(\frac{mg}{\rho v\ A_S}\right)^2 \tag{C.9}$$

$$= \frac{1}{2}\frac{(mg)^2}{\rho v A_S}\ . \tag{C.10}$$

Die gesamte Leistung, die das Flugzeug zum Fliegen benötigt, ist die Summe der Luftwiderstands- und der Auftriebsleistung:

$$P_{ges} = P_{Luftwiders\tan d} + P_{lift} \tag{C.11}$$

$$= \frac{1}{2} c_W \rho A_F v^3 + \frac{1}{2}\frac{(mg)^2}{\rho v A_S}\ , \tag{C.12}$$

wobei A_F die Aufstandsfläche des Flugzeugs ist und c_W sein Luftwiderstandsbeiwert (wie in Anhang A). Die Treibstoff-Effizienz des Flugzeugs, ausgedrückt in Energie pro Strecke, wäre dann

$$\left.\frac{\text{Energie}}{\text{Strecke}}\right|_{\text{ideal}} = \frac{P_{ges}}{v} = \frac{1}{2} c_W \rho A_F v^2 + \frac{1}{2}\frac{(mg)^2}{\rho v^2 A_S}\ , \tag{C.13}$$

wenn das Flugzeug die Leistung aus seinem Treibstoff mit 100% Effizienz in Luftwiderstands- und Auftriebsleistung umwandelt. (Tatsächlich ist ein anderer Name für „Energie pro zurückgelegter Strecke“ gerade „Kraft“ und wir können auch die beiden Terme oben als Luftreibungskraft $\frac{1}{2}c_W\rho A_F v^2$ und Auftriebskraft $\frac{1}{2}\frac{(mg)^2}{\rho v^2 A_S}$ identifizieren. Die Summe dieser Kräfte, der „Schub“, beschreibt genau, wie viel die Triebwerke drücken müssen.)

Reale Flugzeugtriebwerke haben eine Effizienz von etwa ε = 1/3, also ist die tatsächliche benötigte Energie eines Flugzeugs bei Geschwindigkeit v

$$\frac{\text{Energie}}{\text{Strecke}} = \frac{1}{\varepsilon}\left(\frac{1}{2}c_W\rho A_F v^2 + \frac{1}{2}\frac{(mg)^2}{\rho v^2 A_S}\right) \quad . \tag{C.14}$$

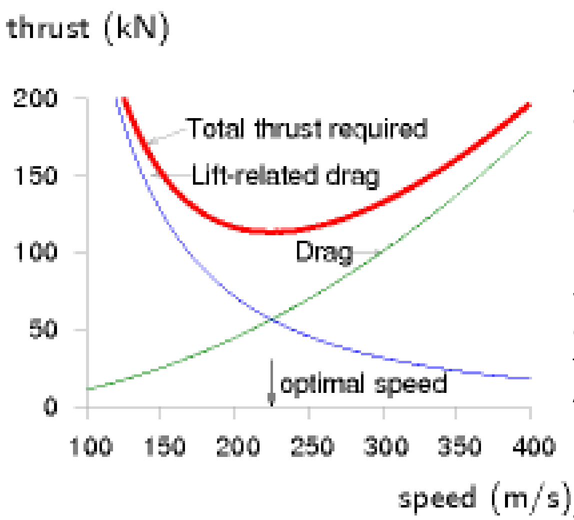


Fig.C.5: Die erforderliche Kraft, um ein Flugzeug in Bewegung zu halten, als Funktion der Geschwindigkeit v, ist die Summe der gewöhnlichen Luftwiderstandskraft $\frac{1}{2}c_W\rho A_F v^2$ - die mit höherer Geschwindigkeit ansteigt – und der Auftriebskraft (auch induzierter Luftwiderstand genannt) $\frac{1}{2}\frac{(mg)^2}{\rho v^2 A_S}$ – die mit höherer Geschwindigkeit abfällt. Es gibt eine ideale Geschwindigkeit v_{opt}, bei der die Kraft minimal wird. Da Kraft eine Energie pro Weg ist, minimiert man zusammen mit der Kraft auch den Treibstoff pro Weg. Um die Treibstoffeffizienz zu optimieren, fliege bei v_{opt}. Die Grafik zeigt die Modellrechnung des erforderlichen Schubs, in kN, für eine Boeing 747, Masse 319 t, Spannweite 64,4 m, c_W = 0,03, Aufstandsfläche 180 m², bei Luftdichte 0,41 kg/m³ (entspricht 10 km Höhe), als Funktion der Geschwindigkeit v in m/s. Unser Modell liefert eine optimale Geschwindigkeit bei v_{opt}=220 m/s. Für ein Modell, das auf Würsten basiert, eine gute Übereinstimmung mit der Realität!

Dieser Ausdruck für Energie-pro-Strecke ist relativ kompliziert, er vereinfacht sich aber erheblich, wenn wir annehmen, dass ein Flugzeug so *konstruiert* ist, dass es bei seiner üblichen Reisegeschwindigkeit den Energieverbrauch-pro-Strecke *minimiert*. Die Energie-pro-Strecke hat als Funktion von v ein Optimum, wie man in Fig.C.5 sieht. Die Summe der beiden Größen $\frac{1}{2}c_W\rho A_F v^2$ und $\frac{1}{2}\frac{(mg)^2}{\rho v^2 A_S}$ ist am kleinsten, wenn beide Größen gleich sind. Das ist ein erfreuliches Phänomen sowohl in der Physik als auch im Maschinenbau: Zwei Größen, die offensichtlich nicht gleich sein *müssen*, *sind* aber tatsächlich gleich groß, oder zumindest vergleichbar innerhalb eines Faktors 2. Dieses Gleichheitsprinzip sagt uns, dass die optimale Geschwindigkeit eines Flugzeugs die Gleichung

$$c_W\rho A_F v^2 = \frac{(mg)^2}{\rho v^2 A_S} \tag{C.15}$$

erfüllt, d.h.

$$\rho v_{opt}^2 = \frac{mg}{\sqrt{c_W A_F A_S}} \quad . \tag{C.16}$$

Dies definiert die optimale Geschwindigkeit, wenn unser Modell des Fliegens zutreffend ist; das Modell versagt, wenn die Triebwerks-Effizienz ε signifikant von der Geschwindigkeit abhängt oder wenn die Fluggeschwindigkeit die Schallgeschwindigkeit

(330 m/s) übersteigt, weil man darüber ein anderes Modell für Luftwiderstand und Auftrieb benötigt.

Lassen Sie uns das Modell überprüfen, indem wir seine Vorhersagen für die optimale Fluggeschwindigkeit einer 747 und eines Albatros auswerten. Wir müssen dabei aufpassen, dass wir die korrekte Luftdichte verwenden: Wenn wir die optimale Fluggeschwindigkeit für eine 747 in 30.000 Fuß Höhe ermitteln wollen, müssen wir berücksichtigen, das die Luftdichte mit zunehmender Höhe z sinkt wie $\exp(-mgz/kT)$, wobei m die Masse der Stickstoff- oder Sauerstoffmoleküle ist und kT die thermische Energie (Bolzmannkonstante mal absolute Temperatur). Die Dichte ist in dieser Höhe etwa dreimal geringer.

Die vorhergesagten optimalen Geschwindigkeiten (Tabelle C.6) sind genauer als wir erwarten durften! Die optimale Geschwindigkeit der 747 berechnet sich zu 220 m/s (800 km/h) und für den Albatros 14 m/s (50 km/h) – beides sehr nah an den wahren Reisegeschwindigkeiten der beiden Vögel (895 km/h bzw. 50-80 km/h).

Vogel		747	Albatros
Designer		Boeing	natürliche Auslese
Masse (voll beladen)	m	363 000 kg	8 kg
Flügelspannweite	w	64,4m	3,3m
Aufstandsfläche*	A_F	180m²	0,09m²
Dichte	ρ	0,4 kg/m³	1,2 kg/m³
Luftwiderstandsbeiwert	c_W	0,03	0,1
Geschwindigkeit	v_{opt}	220m/s	14m/s
		= 540mph	= 32mph

Tabelle C.6: Abschätzung der optimalen Fluggeschwindigkeit für einen Jumbojet und einen Albatros.
* Die Aufstandsfläche der 747 errechnet sich aus der Kabinenbreite (6,1m) mal geschätzte Rumpfhöhe (10m) mal zwei für Flügel, Turbinen und Leitwerk; Aufstandsfläche des Albatros geschätzt auf 1 square-foot nach einem Foto.

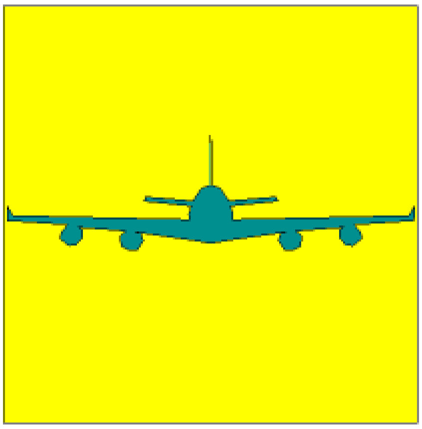


Fig.C.7: Vorderansicht einer Boeing 747, zur Abschätzung der Aufstandsfläche A_F des Flugzeugs. Das gelbe Quadrat hat die Fläche A_S (Flügelspannweite zum Quadrat).

Betrachten wir noch weitere Vorhersagen unseres Modells. Wir können vergleichen, ob die Kraft aus Gl. (C.13) vergleichbar mit dem bekannten Schub-Kennzahlen der 747 sind. Erinnern wir uns, dass unter optimalen Bedingungen die beiden Kräfte gleich sind, also müssen wir nur eine davon berechnen und verdoppeln:

$$\text{Kraft} = \left.\frac{\text{Energie}}{\text{Strecke}}\right|_{\text{ideal}} = \frac{1}{2} c_W \rho A_F v^2 + \frac{1}{2} \frac{(mg)^2}{\rho v^2 A_S} \tag{C.17}$$

$$= c_W \rho A_F v_{opt}^2 \tag{C.18}$$

$$= c_W \rho A_F \frac{mg}{\rho (c_W A_F A_S)^{1/2}} \tag{C.19}$$

$$= \left(\frac{c_W A_F}{A_S}\right)^{1/2} mg\ . \tag{C.20}$$

Wir wollen den Füllfaktor f_A definieren als das Flächenverhältnis:

$$f_A = \frac{A_F}{A_S}\ . \tag{C.21}$$

(Denken Sie sich dabei f_A als den Teil der Fläche des Quadrats aus Fig.C.7, der durch das Flugzeug bedeckt ist.) Dann ist

$$\text{Kraft} = (c_W f_A)^{1/2}(mg)\,. \qquad \text{(C.22)}$$

Interessant! Unabhängig von der Dichte des durchflogenen Fluidums ist der erforderliche Schub (für ein Flugzeug bei seiner optimalen Geschwindigkeit) nur eine dimensionslose Konstante $(c_W f_A)^{1/2}$ mal dem Gewicht des Flugzeugs.

Diese Konstante, ein Maß für das Luftwiderstands-zu-Auftriebs-Verhältnis des Flugzeugs, ist übrigens das Inverse der beim Flugzeugbau wichtigen sogenannten Gleitzahl (die dem Auftriebs-zu-Luftwiderstands-Verhältnis entspricht und in der englischsprachigen Literatur auch als „lift-to-drag-ratio" oder kurz „L/D", „aerodynamic efficiency" oder „finesse" benannt ist; einige typische Werte sind in Tabelle C.8 aufgeführt).

Airbus A320	17
Boeing 767-200	19
Boeing 747-100	18
Seeschwalbe	12
Albatros	20
„Solar Impulse"	35
Nimbus 4DM	60

Tabelle C.8: Gleitzahlen
rot: Außergewöhnliche Gleitflugzeuge (siehe Endnote)

Fig.C.9: Cessna 310N: 60 kWh pro 100 p-km. Eine Cessna 310 Turbo befördert 6 Passagiere (inkl. Pilot) mit einer Geschwindigkeit von 370 km/h. Foto von Adrian Pingstone.

Nehmen wir die Zahlen des Jumbos $c_W \approx 0{,}03$ und $f_A \approx 0{,}04$, berechnen wir den erforderlichen Schub zu

$$(c_W f_A)^{1/2} mg = 0{,}036\, mg = 130\ \text{kN}. \qquad \text{(C.23)}$$

Wie passt dies zu den Spezifikationen der 747? Tatsächlich hat jedes der vier Triebwerke einen Schub von 250 kN, doch dieser maximale Schub wird nur während des Starts genutzt. Während des Flugs ist der Schub viel geringer: bei einer 747 liegt er bei 200 kN, etwa 50% über unserer Modellrechnung. Das Modell weicht ein bisschen ab, weil unsere Annahme für die inverse Gleitzahl etwas zu niedrig lag.

Diesen Schub kann man direkt verwenden, um die Transport-Effizienz eines Flugzeugs zu bestimmen. Hierbei kann man zwei Arten von Effizienz unterscheiden: Die Energiekosten, um Gewicht zu transportieren, gemessen in kWh pro t-km, und die Energiekosten der Personenbeförderung, gemessen in kWh pro 100 p-km.

Effizienz im Hinblick auf Gewicht

Schub ist eine Kraft, und Kraft ist Energie pro Streckeneinheit. Die gesamte benötigte Energie pro Streckeneinheit ist um den Faktor $1/\varepsilon$ größer, wobei ε der Wirkungsgrad der Maschine ist, den wir wieder mit 1/3 annehmen.

Das sind die gesamten Transportkosten[23], definiert als die Energie pro Gewichtseinheit (des gesamten Flugzeugs) pro Streckeneinheit:

[23] Hier wie im folgenden sind mit „Kosten" stets die Energiekosten gemeint.

$$\text{Transportkosten} = \frac{1}{\varepsilon}\frac{\text{Kraft}}{\text{Masse}} \tag{C.24}$$

$$= \frac{1}{\varepsilon}\frac{(c_W f_A)^{1/2} m g}{m} \tag{C.25}$$

$$= \frac{(c_W f_A)^{1/2}}{\varepsilon} g\,. \tag{C.26}$$

Die Transportkosten sind also nur eine dimensionslose Größe (abhängig von der Form des Flugzeugs und dem Wirkungsgrad seines Antriebs) multipliziert mit der Erdbeschleunigung g. Diese Formel für die Gesamt-Transportkosten gilt für alle Flugzeuge und hängt nur von drei einfachen Eigenschaften des Flugzeugs ab: Seinem c_W-Wert, seiner Form und seinem Antriebs-Wirkungsgrad. Es hängt nicht von der Größe des Flugzeugs ab, auch nicht von seinem Gewicht und auch nicht von der Dichte der Luft. Setzen wir ε = 1/3 ein und nehmen eine Gleitzahl von 20 an, liefert unser Modell für jedes beliebige Flugzeug Transportkosten von

$$0{,}15\, g$$

oder (zur Umrechnung vgl. Anhang J)

$$0{,}4 \text{ kWh/t-km}\,.$$

Fig.C.10: „Legen Sie Ihre Sicherheits-Manschettenknöpfe an!“ Ein Bombardier Learjet 60XR befördert 8 Passagiere mit 780 km/h bei Transportkosten von 150 kWh pro 100 p-km. Foto von Adrian Pingstone.

Fig.C.11: Boeing 737-700: 30 kWh pro 100 p-km. Foto © Tom Collins

Kann man Flugzeuge verbessern?

Wenn der Wirkungsgrad des Triebwerks durch technischen Fortschritt nur begrenzt verbessert werden kann und die Form des Flugzeugs schon weitgehend perfekt ist, dann gibt es wenig, was man an dieser dimensionslosen Größe noch machen könnte. Die Transport-Effizienz ist nahe an ihrem physikalischen Limit. Die Aerodynamik-Spezialisten sagen, dass man durch die sog. Blended Wing Body (BWB) Form ein wenig gewinnen könnte und dass der Luftwiderstand reduziert werden könnte durch Einsatz der sog. LFC-Technik (laminar flow control), bei der etwa Luft durch kleine Öffnungen in der Flügelfläche gesaugt wird und so die Entstehung der Turbulenzen hinter den Flügeln unterdrückt wird (Braslow, 1999). Aufrüsten bestehender Flugzeuge mit LFC würde deren c_W-Wert um etwa 15% verbessern, für den Übergang zu BWB-Formen ist eine c_W-Wert-Verbesserung von 18% vorhergesagt (Green, 2006). Und Gleichung (C.26) sagt, dass die Transportkosten proportional zur Wurzel aus dem c_W-Wert sind, so dass die genannten Verbesserungen um 15% bzw. 18% eine Kostenreduktion von 7,5% bzw. 9% bewirken.

Die gesamten Transportkosten sind die Energiekosten pro bewegtem Gewicht, *einschließlich des Flugzeuggewichts*. Um die Energiekosten zur Frachtbeförderung pro Gewichtseinheit Fracht zu bestimmen, müssen wir durch den Bruchteil dividieren, den die Fracht am Gesamtgewicht ausmacht. Ein voll beladenes Frachtflugzeug vom Typ Boeing 747 besteht zu etwa 1/3 Fracht, also sind seine Transportkosten

$$0{,}45\, g\,,$$

oder etwa 1,2 kWh/t-km. Das ist etwas höher als die eines Lastwagens, der bei 1 kWh/t-km liegt.

Transport-Effizienz im Hinblick auf Passagiere

In gleicher Weise können wir nun die Effizienz einer 747 beim Passagiertransport bestimmen:

$$\text{Transport-Effizienz (p-km pro Liter Treibstoff)}$$

$$= \text{Anzahl Passagiere x} \frac{\text{Energie pro Liter}}{\frac{\text{Schub}}{\varepsilon}} \tag{C.27}$$

$$= \text{Anzahl Passagiere x} \frac{\varepsilon \times \text{Energie pro Liter}}{\text{Schub}} \tag{C.28}$$

$$= 400 \times \frac{1}{3} \frac{38\ \text{MJ/l}}{200.000\ \text{N}} \tag{C.29}$$

$$= 25\ \text{p-km pro Liter} \tag{C.30}$$

Das ist etwas effizienter als ein Auto mit einem Insassen (12 km/l). Mit dem Flugzeug zu reisen ist also energiesparender als Autofahren, so lange im Auto nur ein oder zwei Leute sitzen; und Autofahren ist energiesparender als Fliegen, wenn drei oder mehr Personen im Auto sind.

Kernpunkte

Wir haben nun schon eine Menge Fragen gelöst. Lassen Sie mich die Kernideen rekapitulieren. Die Hälfte der Arbeit beim Fliegen braucht das oben Bleiben, die andere das in Bewegung Bleiben. Die Treibstoff-Effizienz bei der optimalen Geschwindigkeit, ausgedrückt in Energie-pro-Reisestrecke, fanden wir in der Kraft (C.22), die einfach proportional zum Gewicht des Flugzeugs war; die Proportionalitätskonstante war die inverse Gleitzahl, die durch die Form des Flugzeugs bestimmt ist. Im Gegensatz zu Autos, wo geringere Tempolimits deren Energieverbrauch pro Strecke senken können, gibt es bei Flugzeugen keinen Grund, die Geschwindigkeit zu beschränken. Flugzeuge haben in der Luft ihre optimalen Geschwindigkeiten, jedes Flugzeug seine, abhängig vom Gewicht und sie fliegen bereits bei diesen optimalen Geschwindigkeiten. Würde man Flugzeuge anweisen, langsamer zu fliegen, würde das ihren Verbrauch erhöhen. Der einzige Weg, Flugzeuge noch treibstoffsparender zu machen, ist sie auf dem Boden zu lassen. Flugzeuge sind fantastisch optimiert, und es besteht keine Aussicht auf signifikante Verbesserungen ihrer Effizienz. (Siehe Seite 40 und 149 zur weiteren Diskussion der Aussage, dass neue Superjumbos „weitaus effizienter“ sind als alte, und Seite 39 zur Aussage, dass Turboprop-Maschinen „weitaus effizienter“ als Jets wären.)

Reichweite

Eine weitere Modellvorhersage, die wir treffen können, ist die Reichweite eines Fliegers oder Vogels – was ist die weiteste Entfernung, die er ohne Nachtanken zurücklegen kann? Man könnte annehmen, dass größere Flugzeuge größere Reichweiten haben, doch die Vorhersage unseres Modells ist überraschend einfach. Die Reichweite eines Flugzeugs, die Strecke, die es ohne Auftanken zurücklegen kann, ist proportional zu seiner Geschwindigkeit und der Gesamtenergie des Treibstoffs, und umgekehrt zur Rate des Verbrauchs:

$$\text{Reichweite} = v_{opt}\frac{\text{Energie}}{\text{Leistung}} = \frac{\text{Energie}\times\varepsilon}{\text{Kraft}}\,. \qquad \text{(C.31)}$$

Nun ist die gesamte Energie gerade der Brennwert C des Treibstoffs (in Joule pro kg) mal seiner Masse; und die Masse des Treibstoffs ist ein bestimmter Bruchteil f_{Tr} der Gesamtmasse des Flugzeugs. Also gilt

$$\text{Reichweite} = \frac{\text{Energie}\times\varepsilon}{\text{Kraft}} = \frac{Cm\varepsilon\, f_{Tr}}{(c_W f_A)^{1/2}(m\,g)} = \frac{\varepsilon\, f_{Tr}}{(c_W f_A)^{1/2}}\frac{C}{g}. \qquad \text{(C.32)}$$

Eine einfachere Vorhersage kann man sich kaum vorstellen: Die Reichweite eines Vogels oder Flugzeugs ist das Produkt aus einem dimensionslosen Faktor $\left(\frac{\varepsilon\, f_{Tr}}{(c_W f_A)^{1/2}}\right)$, der die Motoreffizienz, den Luftwiderstand und die Vogelgeometrie berücksichtigt, und einer fundamentalen Länge

$$\frac{C}{g},$$

die eine Eigenschaft des Treibstoffs und der Erdanziehung ist, und sonst nichts. Keine Größe des Vogels, keine Masse des Vogels, keine Länge, keine Breite des Vogels; keine Abhängigkeit von der Luftdichte.

Was ist nun diese magische Länge? Es ist dieselbe Länge, egal ob Gänsefett oder Kerosin der Treibstoff ist: Beides ist im Grunde Kohlenwasserstoff $(CH_2)_n$. Kerosin hat einen Brennwert von C = 40 MJ pro kg. Die damit assoziierte Länge ist dann

$$d_{Tr} = \frac{C}{g} = 4000\ \text{km}\ . \qquad \text{(C.33)}$$

Die Reichweite des Vogels ist die intrinsische Reichweite des Treibstoffs, 4000 km, mal einem Faktor $\left(\frac{\varepsilon\, f_{Tr}}{(c_W f_A)^{1/2}}\right)$. Hat unser Vogel einen Motorwirkungsgrad ε = 1/3 und eine inverse Gleitzahl von $(c_W f_A)^{1/2} \approx 1/20$ und ist knapp die Hälfte des Vogels Treibstoff (eine voll beladene 747 ist etwa zu 46% Treibstoff), so finden wir für alle Vögel und Flugzeuge, egal welcher Größe, dieselbe Reichweite: etwa dreimal die intrinsische Reichweite des Treibstoffs – grob 13.000 km.

Die Modellaussagen sind wieder nahe an der Realität: Der Langstreckenrekord einer 747 (aufgestellt am 23.-24. März 1989) liegt bei 16.560 km.

Und die Behauptung, dass die Reichweite unabhängig von der Größe des Vogels ist, wird unterstützt durch die Beobachtung, dass Vögel jeder Größe, von Riesengraugänsen bis zur kleinen Küstenseeschwalbe, interkontinentale Wanderbewegungen machen. Der

> Man kann sich d_{Tr} vorstellen als die Strecke, die sich ein Treibstoff selbst schleudern kann, wenn er plötzlich seine gesamte chemische Energie in kinetische Energie umwandelt und sich auf eine parabolische Flugbahn ohne Luftwiderstand begibt. (Um genau zu sein: Die Strecke, die er auf der idealen Parabel erzielen kann, ist zweimal C/g.) Diese Strecke ist zugleich auch die vertikale Höhe, in die sich der Treibstoff katapultieren kann, wenn es keinen Luftwiderstand gibt. Eine andere amüsante Tatsache ist, dass der Brennwert C eines Treibstoffs, den ich in J pro kg angegeben habe, auch eine Geschwindigkeit zum Quadrat ist (so wie das Energie-zu-Masse-Verhältnis in Einsteins Gleichung $E=mc^2$ eine Geschwindigkeit zum Quadrat ist, nämlich c^2). 40 x 10^6 J pro kg sind $(6000\ \text{m/s})^2$. Man kann sich Fett also auch vorstellen als „Fett ist 6000 Meter pro Sekunde". Wenn man also Gewicht durch Jogging verlieren will, wären 6.000 m/s (etwa 21.000 km/h) die anstrebenswerte Geschwindigkeit, bei der man alles Fett in einer Runde verliert.

längste beobachtete Non-Stop-Flug eines Vogels lag bei 11.000 km, geflogen von einer Pfuhlschnepfe.

Wie weit kam Steve Fossett in seinem speziell konstruierten Scaled Composites Model 311 Virgin Atlantic GlobalFlyer? 41.467 km. [33ptcg] Ein ungewöhnliches Flugzeug: 83% seines Startgewichts waren Treibstoff; beim Fliegen nutzte er geschickt den Jet-Stream aus, um die Reichweite zu verlängern. Das äußerst zerbrechliche Flugzeug hatte einige Probleme während des Flugs.
Ein weiterer interessanter Punkt, den unser Modell zu Tage brachte: Fragen wir nach der optimalen Luftdichte, in der man fliegen sollte, finden wir, dass der erforderliche Schub (C.20) bei der optimalen Geschwindigkeit unabhängig von der Dichte ist. Das Flugzeug aus unserem Modell wäre also in jeder Flughöhe gleich glücklich, es gibt keine optimale Luftdichte, das Flugzeug könnte dieselbe Strecke pro Liter Treibstoff in jeder Dichte leisten. Aber die optimale Geschwindigkeit hängt von der Dichte ab ($v^2 \sim 1/\rho$, Gleichung (C.16)). Wenn alles andere gleich behalten wird, hätte unser Flugzeug die kürzeste Flugzeit, wenn es in der dünnst-möglichen Luftschicht fliegen würde. Nun sind die Wirkungsgrade realer Triebwerke nicht ganz unabhängig von Geschwindigkeit und Luftdichte. Wenn ein Flugzeug leichter wird, weil es nach und nach Treibstoff verbrennt, geht nach unserem Modell die optimale Geschwindigkeit ($v^2 \sim mg/(\rho(c_W A_F A_S)^{1/2})$) zurück. Ein Flugzeug, das in Luft konstanter Dichte fliegt, sollte also etwas langsamer werden, wenn es leichter wird. Doch ein Flugzeug kann auch bei konstanter Geschwindigkeit im Geschwindigkeitsoptimum bleiben, wenn es an Höhe gewinnt und so die Luftdichte abnimmt. Achten Sie bei Ihrer nächsten Flugreise darauf, ob der Pilot die Flughöhe während des Fluges erhöht, von sagen wir 31.000 Fuß bis 39.000 Fuß gegen Ende der Reise.

Welchen Wirkungsgrad hätte ein Wasserstoff-Flugzeug?

Wir haben bereits gesehen, dass die Effizienz des Fliegens, als Energie pro t-km, nur eine dimensionslose Konstante mal g ist. Die Art des Treibstoffs zu wechseln ändert an diesem Argument nichts. Wasserstoff-betriebene Flugzeuge sind interessant, wenn wir hoffen, damit klimaschädliche Emissionen zu reduzieren. Sie könnten auch höhere Reichweiten erzielen. Erwarten Sie aber nicht, dass sie deutlich energie-effizienter wären.

Verbesserungsmöglichkeiten bei der Flugzeug-Effizienz

Formationsflug im Stil der Gänse könnte etwa 10% mehr Treibstoff-Effizienz bringen (weil die Gleitzahl der Formation höher ist als die eines einzelnen Flugzeugs), doch basiert dieser Trick natürlich wesentlich darauf, dass die Gänse alle zur selben Zeit an denselben Ort wandern wollen.

Optimierung der Zwischenstopp-Längen: Langstreckenflugzeuge (konzipiert für Strecken über ca. 15.000 km) sind nicht ganz so treibstoff-effizient wie Kurzstreckenflieger, weil sie mehr Treibstoff mitnehmen müssen und damit weniger Platz für Ladung und Passagiere haben. Es wäre effizienter, kleinere Teilstrecken in Kurzstreckenflugzeugen zurückzulegen. Das Optimum liegt bei Teilstrecken von etwa 5000 km Länge, also sollten typische Langstreckenflüge zwei Zwischenstopps zum Auftanken haben (Green, 2006). Zwischenstopps könnten Langstreckenflüge etwa 15% effizienter machen, doch würden sie natürlich auch zusätzliche Energiekosten verursachen.

Öko-Flugzeuge

Gelegentlich hört man von Leuten, die ökologisch verträgliche Flugzeuge bauen. Weiter oben in diesem Kapitel machten wir jedoch die Feststellung, dass die Transportkosten jedes Flugzeugs in der Gegend von

0,4 kWh/t-km

liegen. Nach unserem Modell sind die einzigen Möglichkeiten, diesen Wert zu verbessern, eine Reduktion des Luftwiderstandes (vielleicht durch einen neu erfundenen Staubsauger-im-Flügel-Trick) oder eine Veränderung der Flugzeuggeometrie (hin zum Gleiter, mit extrem weiten Flügeln im Vergleich zum Rumpf, oder vielleicht auch als „Nurflügler" ganz ohne Rumpf).

Blicken wir auf die jüngste Pressemeldung zu ökofreundlichen Flugzeugen und prüfen, ob eines dieser neuen die 0,4 kWh/t-km Marke knacken kann. Braucht ein Flugzeug deutlich weniger als 0,4 kWh/t-km, können wir daraus schließen, dass unser Modell fehlerhaft ist.

Die Elektra, ein Einsitzer aus Holz und Glasfaser, flog in 48 Minuten 50 km in den südlichen Alpen herum [6r32hf]. Die Elektra hat eine Spannweite von 9 m und einen 18 kW Elektromotor mit 48 kg Lithium-Polymer-Batterien. Das Startgewicht dieses Fliegers ist 265 kg (134 kg Flugzeug, 47 kg Batterie und 84 kg menschliche Fracht). Am 3. Dezember 2007 flog es 50 km. Wenn wir annehmen, dass die Energiedichte der Batterie 130 Wh/kg sei und der Flug 90% der vollen Ladung (5,5 kWh) verbrauchte, finden wir für die Transportkosten

0,4 kWh/t-km,

was exakt mit unserer Modellrechnung übereinstimmt. Die Elektra ist kein Niedrigenergieflugzeug, verglichen mit einem normalen Kerosinfresser.

Natürlich heißt das nicht, dass Elektroflugzeuge uninteressant wären. Wenn man traditionelle Maschinen durch Alternativen mit gleichem Energieverbrauch aber ohne Kohlenstoffemissionen ersetzen kann, ist das sicher eine nützliche Technologie. Und als Personentransporter liefert die Elektra respektable 11 kWh pro 100 p-km, vergleichbar mit unserem Elektroauto von Seite 144. Doch in diesem Buch ist die Schlusszeile immer: „Woher soll diese Energie kommen?"

Fig.C.12: Die Elektra F-WMDJ:
11 kWh pro 100 p-km. Foto von
Jean–Bernard Gache. www.apame.eu

Fig.C.13: Tragflügelboot.
Fotografie von Georgios Pazios

Viele Boote sind auch Vögel

Einige Zeit nachdem ich dieses Modell des Fliegens niederschrieb, realisierte ich, dass es auf mehr als nur die Vögel in der Luft anwendbar ist – es gilt auch für Tragflügelboote und auch andere Hochgeschwindigkeitsboote – alle, die höher im Wasser liegen, wenn sie in Bewegung sind.

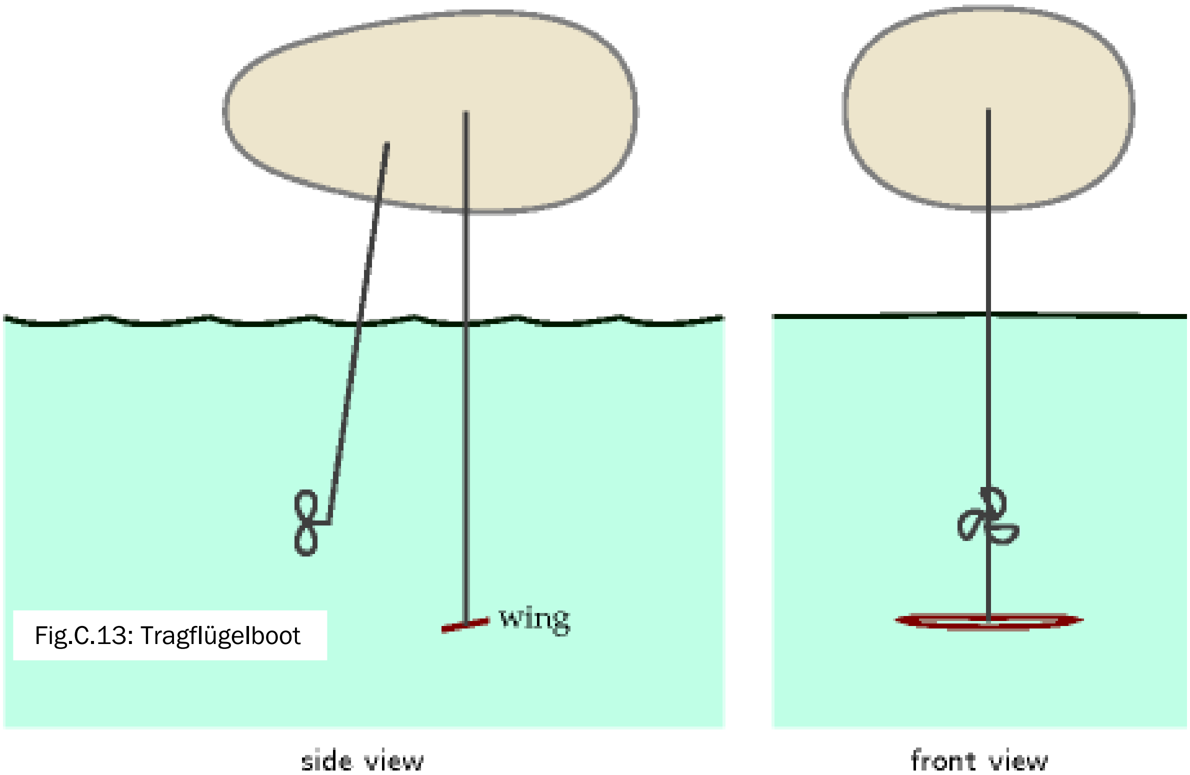


Fig.C.13 zeigt das einfache Prinzip der Tragflügelboote. Das Gewicht des Bootes wird getragen von einem geneigten Flügel unter Wasser, der im Vergleich zum Boot recht klein ist. Der Flügel erzeugt Auftrieb, indem er Wasser niederdrückt, genau wie das Flugzeug in Fig.C.2. Wenn wir annehmen, dass der gesamte Widerstand (Luft und Wasser) dominiert wird durch den Wasserwiderstand am Flügel, und dass die Dimensionen des Flügels und die Reisegeschwindigkeit auf minimalen Energieverbrauch pro Strecke optimiert wurden, ergeben sich die bestmöglichen Transportkosten, in Energie pro t-km, genau gemäß Gleichung (C.26):

$$\frac{(c_W f_A)^{1/2}}{\varepsilon} g \,, \tag{C.34}$$

wobei c_W den Widerstandsbeiwert des Unterwasserflügels bezeichnet und f_A wieder die o.a. dimensionslose Konstante, ε den Motorwirkungsgrad und g die Erdbeschleunigung.

Vielleicht sind c_W und f_A nicht ganz dasselbe wie bei einem optimierten Flugzeug. Doch eine bemerkenswerte Eigenschaft der Theorie ist die Unabhängigkeit von der Dichte des Fluids, in dem der Flügel fliegt. Deshalb wäre die vorausgesagte Größenordnung für die Transportkosten (Energie pro Strecke und Gewicht, einschließlich Fahrzeuggewicht) eines Tragflügelbootes *dieselbe* wie bei einem Flugzeug, nämlich 0,4 kWh/t-km.

Für Geräte, die die Wasseroberfläche berühren, wie Hochgeschwindigkeits-Katamarane oder Wasserskier, sollte ein genaueres Modell auch die Energie berücksichtigen, die in die Produktion von Wellen auf dem Wasser geht, doch bin ich versucht zu glauben, dass diese Tragflügelboot-Theorie im Groben schon stimmt.

Ich konnte bisher keine Daten zu Transportkosten von Tragflügelbooten finden, doch die verfügbaren Daten für einen Katamaran zur Personenbeförderung mit 41 km/h scheinen ganz gut mit der Theorie überein zu stimmen: Es benötigt rund 1 kWh pro t-km.

Es war für mich überraschend zu lernen, dass ein Inselspringer, der mit dem Flugzeug von Insel zu Insel hüpft nicht nur schneller ist als einer, der mit dem Boot fährt - sondern sehr wahrscheinlich auch noch weniger Energie verbraucht.

Andere Möglichkeiten, oben zu bleiben

Luftschiffe

In diesem Kapitel haben wir festgestellt, dass man Flugzeuge nicht effizienter machen kann, indem man langsamer fliegt, da jeder Vorteil des dabei geringeren Luftwiderstandes dadurch aufgehoben wird, dass man die Luft dann kräftiger nach unten drücken muss. Kann dieses Problem durch einen Strategiewechsel gelöst werden: nicht Luft nach unten drücken, sondern leichter als Luft sein? Ein Luftschiff, ob Blimp oder Zeppelin, benutzt einen enorm großen heliumgefüllten Ballon, der leichter als die Luft ist, um das Gewicht einer kleinen Kanzel zu kompensieren. Der Nachteil dieser Strategie ist, dass der riesige Ballon den Luftwiderstand des Gerätes ziemlich erhöht. Die Energiekosten eines Luftschiffs (pro Gewicht, pro Strecke) kann man klein halten, indem man sich langsam bewegt, eine fischförmige Form wählt und sehr groß und lang ist. Erstellen wir ein Modell zum Energieverbrauch eines idealisierten Luftschiffs.

Fig.C.14: Die 239 m lange USS Akron (ZRS-4) über Manhattan. Sie wiegt 100 t und könnte 83 Tonnen zuladen. Die Gesamt-Maschinenleistung ist 3,4 MW, sie befördert 89 Mann Besatzung mit Waffen bei 93 km/h. Sie wurde auch als Flugzeugträger eingesetzt.

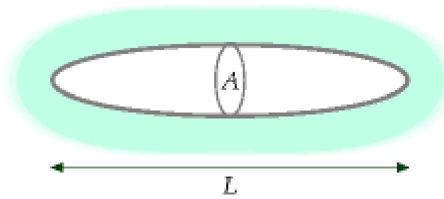


Fig.C.15: Ein ellipsoidales Luftschiff

Ich will annehmen, dass der Ballon ellipsoidal ist, mit einer Querschnittsfläche A und einer Länge L. Das Volumen ist $\frac{2}{3}AL$. Schwebt das Luftschiff stabil in Luft der Dichte ρ, muss die gesamte Masse des Luftschiffs, einschließlich Ladung und Helium $m_{\text{ges}}=\rho V$ sein. Bewegt es sich mit der Geschwindigkeit v, hat der Luftwiderstand die Kraft

$$F = \frac{1}{2} c_W A \rho v^2, \tag{C.35}$$

wobei wir den Luftwiderstandsbeiwert c_W basierend auf den Werten für Flugzeuge mit 0,03 annehmen. Die aufzuwendende Energie pro Streckeneinheit ist gleich F dividiert durch den Wirkungsgrad ε des Antriebs. Die Brutto-Transportkosten – die Energie pro Stecken- und Masseneinheit – ist

$$\frac{F}{\varepsilon m_{ges}} = \frac{\frac{1}{2} c_W A \rho v^2}{\varepsilon \rho \frac{2}{3} AL} \tag{C.36}$$

$$= \frac{3}{4\varepsilon} c_W \frac{v^2}{L} \tag{C.37}$$

Das ist ein sehr schönes Ergebnis! Die Brutto-Transportkosten dieses idealisierten Luftschiffs hängen nur von seiner Geschwindigkeit v und der Länge L ab, nicht von der Luftdichte ρ oder der Aufstandsfläche A.

Dieses Modell ist ohne Änderungen auch auf Unterseeboote anwendbar. Die Brutto-Transportkosten (in kWh pro t-km) eines Luftschiffs sind identisch mit denen eines Unterseebootes gleicher Länge und Geschwindigkeit. Das Unterseeboot wird 1000mal mehr Masse beinhalten, da Wasser 1000mal dichter als Luft ist, und es kostet 1000mal mehr, es zu bewegen. Der einzige Unterschied zwischen den beiden werden die Werbeeinnahmen sein.

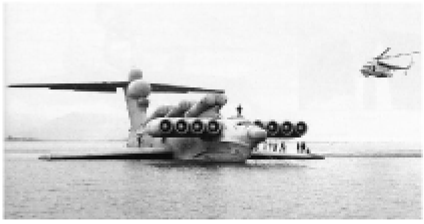
Setzen wir ein paar Zahlen ein. Nehmen wir an, wir wollen mit einer Geschwindigkeit von 80 km/h reisen (eine Atlantiküberquerung dauert also drei Tage). In SI-Einheiten sind das 22 m/s. Nehmen wir einen Motorwirkungsgrad von $\varepsilon = 1/4$ an. Um die geringsten Transportkosten zu erhalten, müssen wir uns fragen, was die größtmögliche Länge für so einen Zeppelin wäre. Die Hindenburg war 245 m lang. Sagen wir L = 400 m, erhalten wir

$$\frac{F}{\varepsilon m_{ges}} = 3 \times 0{,}03 \frac{(22\text{ m/s})^2}{400\text{ m}} = 0{,}1\text{ m/s}^2 = 0{,}03\text{ kWh/t-km}.$$

Macht Nutzlast die Hälfte der Masse des Luftschiffs aus, sind die Netto-Transportkosten dieses Monster-Luftschiffs bei 0,06 kWh/t-km – vergleichbar mit der Eisenbahn.

Ekranoplan

Ein Ekranoplan, oder Bodeneffektfahrzeug, ist ein Flügelboot: ein Flugzeug, das ganz nah an der Wasseroberfläche fliegt und seinen Auftrieb weder aus dem Niederdrücken von Luft wie ein Flugzeug, noch aus dem Niederdrücken von Wasser wie ein Tragflügelboot erhält, sondern auf einem Kissen von komprimierter Luft, die zwischen den Flügeln und der nahen Wasserfläche eingeschlossen ist, gleitet. Diesen Bodeneffekt kann man nachstellen, indem man eine Spielkarte über einen flachen Tisch schnippt. Das Aufrechterhalten des Luftkissens erfordert sehr wenig Energie, so dass sich ein Bodeneffektfahrzeug fast wie ein normales Fahrzeug ohne Rollwiderstand verhält. Sein Haupt-Energieverbrauch entsteht durch die Luftreibung. Erinnern Sie sich, dass beim normalen Flugzeug die Hälfte der Energie gegen die Luftreibung, die andere Hälfte für den Auftrieb eingesetzt wird. Die Sowjetunion entwickelte das Ekranoplan als Militärtransporter und Raketenträger in der Ära Chruschtschow. Das Lun Ekranoplan lief 500 km/h, der gesamte Schub seiner acht Triebwerke lag bei 1000 kN, wobei dieser Schub nicht mehr benötigt wurde, sobald das Gefährt sich aus dem Wasser erhoben hatte. Nehmen wir an, der Schub während der Fahrt lag bei einem Viertel des Maximums, die Triebwerke wären 30% effizient und von den 400 Tonnen Gesamtgewicht wären 100 Tonnen Fracht, dann ergäben sich Netto-Transportkosten von 2 kWh pro t-km. Ich stelle mir vor, dass das Ekranoplan, wenn es auf zivilen Frachttransport optimiert würde, etwa die Hälfte der Frachtkosten eines herkömmlichen Flugzeugs hätte.



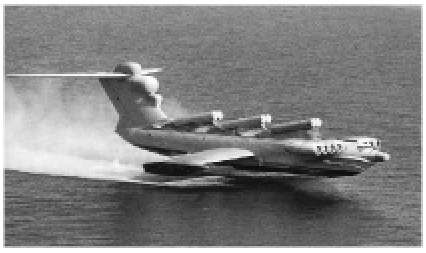


Fig.C.16: Das Lun Ekranoplan – etwas länger und schwerer als eine Boeing 747. Fotografien: A. Belyaev.

Sagen und Mythen

Das Flugzeug wäre ohnehin geflogen, deshalb war mein Flug energie-neutral.

Das ist aus zwei Gründen falsch: Erstens, Ihr zusätzliches Gewicht erfordert zusätzliche Energie, um Sie oben zu halten. Zweitens, Fluggesellschaften reagieren auf Nachfrage und fliegen bei Bedarf mehrere Maschinen.

Anmerkungen und Literaturhinweise

Seite

301 Reale Flugzeugtriebwerke haben eine Effizienz von etwa ε = 1/3, Typische Triebwerk-Wirkungsgrade liegen im Bereich 23%–36% vgl. *adg.stanford.edu/aa241 /propulsion/sfc.html*. Für das typische Flugzeug liegt die Gesamt-Effizienz im Bereich 20% und 40%, die besten Bypass-Treibwerken liefern im Gleitflug 30–37% *www.grida.no/climate/ipcc/aviation/097.htm*. Sie können aber nicht einfach das effizienteste Triebwerk auswählen, weil es eventuell schwerer ist (ich meine, es könnte größere Masse pro Schubeinheit haben) und damit die Gesamteffizeinz des Flugzeugs reduzieren.

296 Boeing 747 Luftwiderstandsbeiwert der 747 von www.aerospaceweb.org. Übrige 747-Daten von [2af5gw]. Albatros-Daten von [32judd].

297 ♦Solar Impulse Die Crew rund um dieses solarbetriebene Flugzeug arbeitet daran, 2013 eine Weltumrundung zu schaffen: 63,4 m Spannweite („mehr als ein Airbus A340"), 1600 kg Gesamtgewicht (weniger als ein Audi A4). Der Trick: tagsüber steigen auf ca. 9000 m und dabei die Akkus (400 kg Li-Polymer-Akkus für 80 kWh) aufladen, nachts segelflugmäßig sinken auf 1500 und dann bis Sonnenaufgang mit Akkuantrieb die Höhe halten. [c6zlecd] Nimbus 4DM Ein deutsches Segelflugzeug mit 26 m Flügelspannweite, mit dem wegen seiner außergewöhnlichen Ärodynamik viele Rekorde aufgestellt wurden. [7jw5pau]°

301 Der längste beobachtete Non-Stop-Flug eines Vogels *New Scientist* 2492. "Bar-tailed godwit is king of the skies. – Pfuhlschnepfe ist der König der Lüfte" 26. März 2005. 11. September 2007: "Schnepfe fliegt 11.500 km non-stop von Alaska nach Neuseeland". [2qbquv]

301 Das Optimum liegt bei Teilstrecken von etwa 5000 km Länge Quelle: Green (2006).

303 Daten für einen Katamaran zur Personenbeförderung Aus [5h6xph]: Verdrängung (voll beladen) 26,3 Tonnen. Auf einer 1050 Seemeilen langen Fahrt verbrauchte sie 4780 Liter Treibstoff. Ich berechne daraus Fracht-Transportkosten von 0,93 kWh pro t-km. Hier nehme ich übrigens das Gesamtgewicht des Schiffs. Die *Passagier*-Transporteffizienz desselben Schiffs ist etwa 35 kWh pro 100 p-km.

305 Das Lun Ekranoplan Quellen: www.fas.org [4p3yco], (Taylor, 2002a).

Weiterführende Literatur: Tennekes (1997), Shyy et al. (1999).