

Segelfliegen in astronomischen Höhen!

1) Einführung Aufwind

Wer erinnert sich nicht an seinen ersten „Tausender“: „Ich bin mit dem Segelflugmodell in der Thermik auf 1000m über Startstelle gestiegen! Ich hab's geschafft!“ Und schon kommt der Kollege: „Ja wo? In den Alpen? Hast Du's auch schon mal in der Ebene probiert?“ Und ein dritter: „Ja mit Vario kann das jeder! Könnt Ihr das aber auch ohne Vario und in der Ebene?“

Wie hoch kommt man aber wirklich mit einem dafür optimierten Flugzeug, wenn als allerletzte und einzige Bedingung bleibt, dass es keinen Antrieb haben darf? Bis 8.000 m? Bis 10.000 m? In der Tat: Im Wellensegelflug hinter hohen Bergketten sind bei starkem Wind solche Höhen möglich.

2) Das Perlan-Projekt

Der bisherige Höhenweltrekord mit einem Segelflugzeug allerdings wird gehalten von Steve Fossett und Einar Enevoldson mit 15.460 m. Dieser Rekord wurde im Rahmen von Phase 1 des Perlan-Projektes (www.perlanproject.org) am 29.8.2006 erfolgt und von der FAI anerkannt. (<http://www.fai.org/record-gliding>, Gliding World Records, „absolute altitude“). Sie erflogen den Rekord in einer Eigenentwicklung namens „Perlan 1“ basierend auf einer stark modifizierten DG-505M. Die Piloten trugen Druckanzüge, die Kabine selbst war allerdings keine Druckkabine! (<http://weatherextreme.com/perlan-project/>)

Das Perlan-Projekt strebt aber nach höheren Zielen, ja greift beinahe nach den Sternen: In Phase 2 soll mit einem Segelflugzeug eine Höhe von 90.000 feet oder umgerechnet 27.432 m Höhe erreicht werden. Das wäre höher als der aktuelle Höhenrekord von Düsenflugzeugen im Horizontalflug, aufgestellt von einer Lockheed SR-71 Blackbird mit 25.929 m am 27. Juli 1976! (http://en.wikipedia.org/wiki/Lockheed_SR-71_Blackbird)

3) Die Atmosphäre in 27 km Höhe

In der Erdatmosphäre ändern

Troposphäre und Stratosphäre

Die Internationale Normatmosphäre ICAO stellt ein über die Wettereinflüsse gemitteltes Abbild der realen Erdatmosphäre dar. Sie gibt die Abhängigkeit von Temperatur, Druck, Dichte und anderen Größen von der Höhe über Normalnull (NN) wieder:

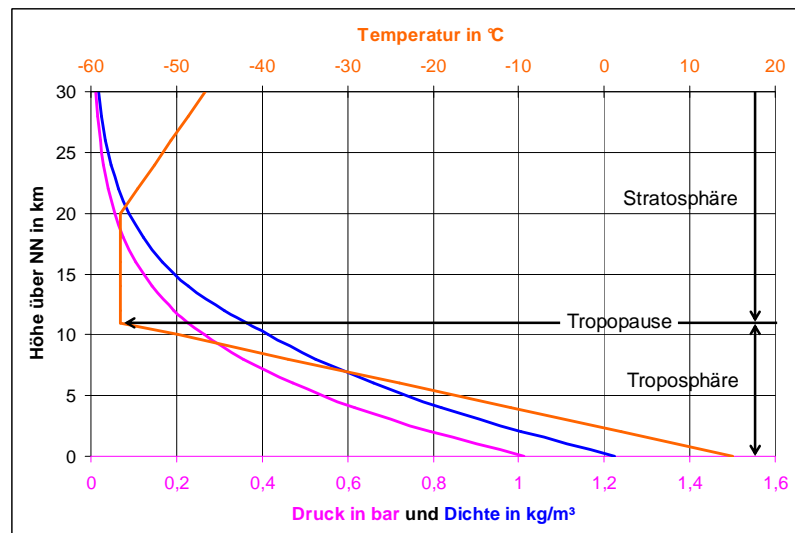


Diagramm 1: Temperatur, Luftdruck und Luftdichte in Abhängigkeit von der Flughöhe. (Daten mit <http://www.luizmonteiro.com/StdAtm.aspx>)

Den Höhenbereich von 0 - 11 km nennt man Troposphäre, in 11 km liegt die Tropopause als Grenzschrift, daran schließt sich bis 50 km Höhe die Stratosphäre an. In der Troposphäre sinkt z.B. die Temperatur von gemittelten 15°C auf Meeresniveau auf -56,5°C in 11 km Höhe. Danach bleibt sie konstant bis etwa 20 km Höhe. Darüber in der Stratosphäre findet ein Temperaturanstieg durch Absorption der UV-Strahlung statt. Diese Normatmosphäre stellt ein grob vereinfachtes und gemittelttes Abbild der realen Atmosphäre dar.

Der Atmosphärenbereich, in dem der Perlan 2 fliegen soll, wird von Meteorologen oft „Ignorosphere“ genannt. Das rührt daher, dass kein Flugzeug oder Satellit in dieser Höhe auf Dauer fliegen kann. Dieser Atmosphärenbereich ist also für Metereologen ziemlich uninteressant (<http://windward-performance.com/projects/perlan-project/>)

sich mit der Höhe über dem Meeresspiegel Luftdruck, Temperatur und Dichte in mehr oder minder komplexer Weise. (Siehe Box Troposphäre und Stratosphäre)

Dank vieler Messwerte und dank physikalischer Gesetze weiß man auch bei uns hier unten gut Bescheid über die physikalischen Größen in der Atmosphäre in einer Höhe von 27 km. Typische Werte sind:

- Die Temperatur beträgt $-49,2^{\circ}\text{C}$.
- Der Luftdruck liegt bei 17,6 mbar, also knapp 2% des Wertes von 1013 mbar an der Erdoberfläche.
- Die Luftdichte beträgt mit $0,02739\text{ kg/m}^3$ noch gut 2% der $1,225\text{ kg/m}^3$ an der Erdoberfläche.
- Die Schallgeschwindigkeit liegt bei 300 m/s in 90.000 ft, während sie am Erdboden bei ca. 340 m/s liegt. Die deutliche Abnahme der Schallgeschwindigkeit hat ihren Grund in der tiefen Temperatur.
- Die kinematische Viskosität liegt am Erdboden bei $0,0000146\text{ m}^2/\text{s}$, in 90.000 ft bei $0,000534\text{ m}^2/\text{s}$. Sie ist also auf das 37fache angewachsen. (<http://www.luizmonteiro.com/StdAtm.aspx>)

Im Folgenden wird erläutert, welchen Einfluss diese physikalischen Daten auf das Gelingen des Rekordfluges und vor allem auf die Konstruktion des Perlan 2 haben.

Doch zuerst ein absolut emotionaler Aspekt: Was sieht ein Pilot, der in 27 km Höhe aus dem Cockpit des Perlan 2 blickt?

Durch die „erhöhte“ Position der Piloten wäre es ihm bei sauberer und wolkenfreier Atmosphäre bei Tag (!) möglich, knapp 600 km weit bis zum Horizont zu sehen. Es ist aber bei weitem nicht so, dass man dank der erhöhten Position bereits die Kugelgestalt der Erde gut erkennen könnte.

Dennoch werden sich die beiden Piloten beim Blick aus dem Cockpit eher im All fühlen, weil der Blick nach oben den schwarzen Weltraum zeigt und keinen durch die Atmosphäre bläulich gefärbten Himmel. Der zeigt sich nur am Horizont des Blickfeldes als Saum oberhalb der Horizontes: 98% der ganzen Atmosphäre liegen unter dem Perlan 2!

Zurück zu den fünf physikalischen Größen: Jeder dieser Werte hat auf seine konkrete Weise mit dem Gelingen oder dem Scheitern der Mission und daher mit der Optimierung und der Konstruktion des Perlan 2 zu tun. Es dürfte klar sein, dass der Perlan 2 ein neues und hocheffizientes aerodynamisches Design benötigt.



Bild 2: So muss man sich den Flug des Perlan 2 in 27 km Höhe vorstellen. (<http://perlanproject.org/>)

a) Die **Temperatur von ca. -50°C** ist bei stundenlangen Flügen für Mensch und Gerät ein offensichtliches Problem, welches kaum einer weiteren Erläuterung bedarf.

b) Der **Luftdruck liegt mit 18 mbar** deutlich unter den 63 mbar des Armstrong-Limits (siehe Box).

Aufgrund der Dauer der Flüge musste man sich daher für eine Druckkabine entscheiden!

Sicherheitshalber werden die Piloten zusätzlich Druckanzüge tragen.

Soweit zwei eher „biologische“ Aspekte.

4) Die aerodynamischen Probleme

Zu c): Die **geringe Dichte von nur noch 2,2%** des Wertes an der Meeresoberfläche führt dazu, dass dem Flügel nicht mehr genügend Luftteilchen begegnen, die den erforderlichen Auftrieb liefern. Als einzige Abhilfe kommt schnelleres Fliegen in Frage: Wird in der

bekannten Formel für den Auftrieb $A = \frac{\rho}{2} \cdot V^2 \cdot c_A \cdot F$ (hierin sind ρ die Luftdichte, V die

Fluggeschwindigkeit, c_A der Auftriebsbeiwert und F die Flügelfläche) die Dichte auf 2,2% reduziert, so kann der ursprüngliche Auftrieb wieder erreicht werden, indem man die Geschwindigkeit auf das

6,7fache erhöht! Der Staudruck $\frac{\rho}{2} \cdot V^2$ hat dann wieder den gleichen Wert wie an der Erdoberfläche.

Damit liegt die Überziehgeschwindigkeit des Perlan 2 in der geplanten Rekordhöhe von 90.000 ft bei 444 km/h!! Erst ab dieser Geschwindigkeit begegnen dem Flügel wieder genügend Luftteilchen für den nötigen Auftrieb. Das geringste Sinken soll der Perlan 2 in dieser Höhe bei 498 km/h erreichen!!

Unglücklicherweise lässt sich die Fluggeschwindigkeit bei verschwindender Luftdichte aber nicht grenzenlos erhöhen. Das liegt an zwei Effekten, die bei großen Geschwindigkeiten zusätzliche Probleme verursachen:

Gegen das **Flatterrisiko** kann man strukturelle und konstruktive Maßnahmen ergreifen. Hier muss an erster Stelle die Verwendung von hochsteifen Kohlefasern genannt werden: Sie ermöglichen eine Reduktion der Gewichte der „beweglichen“ Teile und eine Erhöhung der Steifigkeit aller Teile. Beides erhöht die Frequenzen der einzelnen Schwingungsformen und damit die Geschwindigkeit, bei der die erste Eigenschwingung zu einem Flatterfall führt. Die sorgfältige Auslegung durch Gründer und Chef-Konstrukteur Greg Cole von Windward Performance stellt sicher, dass in keiner Flughöhe und bei keiner der erlaubten Fluggeschwindigkeiten Flattern auftritt.

Zu d): **Schallgeschwindigkeit:** Die sogenannte „Coffin Corner“ (englisch, wörtlich übersetzt: Sargecke) hingegen schlägt unbarmherzig zu:

Die „Mach-Zahl-Effekte“ (siehe Box) deuten sich bereits weit vor dem Erreichen der Schallgeschwindigkeit an. Beim Perlan 2 geht man ab einer Mach-Zahl von 0,65 von extrem negativen Effekten aus. Der Konstrukteur Greg Cole rechnet damit, dass der Perlan in diesem Bereich nicht mehr kontrollierbar sein wird. Man wird in jeder Höhe sehr sorgfältig einen Sicherheitsabstand von diesen Mach-Zahlen einhalten. In 27 km Höhe bedeutet das, deutlich unter der Geschwindigkeit von 702 km/h (= Mach 0,65) zu bleiben!

Das Armstrong Limit

Manch einer kennt das Problem beim Spaghetti Kochen in großen Höhen: Infolge des mit zunehmender Höhe abnehmenden Luftdruckes kocht Wasser bereits bei geringeren Temperaturen als auf Meereshöhe. Im Mittel liegt der Luftdruck in Meereshöhe bei 1013 mbar und Wasser kocht bei 100°C. Nimmt die Höhe zu, also der Luftdruck ab, so kocht Wasser immer früher und die Spaghetti brauchen immer länger: In 5000 m Höhe etwa liegt der Luftdruck bei 540 mbar; Wasser kocht dann bereits bei 83°C. Nimmt die Höhe noch weiter zu, so wird bei 63 mbar der Punkt erreicht, bei dem Wasser bereits bei 37°C kocht. Das bedeutet für den Menschen ein ernstes gesundheitliches Problem, denn alle Flüssigkeit auf der Körperoberfläche kocht und verdampft. Dazu gehören nicht nur Schweiß und Speichel, sondern schließlich auch die Feuchtigkeit in den Lungenbläschen. Das Blut ist nicht betroffen, weil bereits ein sehr tiefer diastolischer Blutdruck von 60 mm Hg einem Druck von 80 mbar entspricht.

Tatsächlich wird von einem Unfall im Jahr 1965 berichtet, bei dem ein Mensch einige Sekunden einem Beinahe-Vakuum ausgesetzt war: Seine letzte Wahrnehmung nach 14 Sekunden im Vakuum vor seinem Blackout war die von kochendem Wasser auf seiner Zunge. (http://imagine.gsfc.nasa.gov/docs/ask_astro/answers/970603.html)

Das Armstrong Limit ist der Name für genau diejenige Höhe, in der Wasser bei Körpertemperatur kocht. Sie liegt bei ca. 18.900 m. Oberhalb dieser Höhe können Menschen ohne Druckanzug oder Druckkabine nur sehr kurz überleben.

(http://en.wikipedia.org/wiki/Armstrong_limit#cite_note-2)

Mit dem Aufstieg in immer größere Höhen muss wegen der abnehmenden Luftdichte immer schneller geflogen werden: In der Höhe von 90.000 ft wachsen mit jedem Gewinn von 100 m die Minimalfahrt und die Geschwindigkeit des geringsten Sinkens um etwa 4 km/h. (siehe Diagramm 3)

Zu langsames Fliegen ergäbe einen Strömungsabriss und würde zu einem Abtauchen mit Fahrtaufnahme und großem Höhenverlust führen!

So wird das fliegbare Geschwindigkeitsfenster mit zunehmender Flughöhe immer kleiner und schrumpft schließlich auf wenige km/h (siehe Diagramm 3)! Dieses Geschwindigkeitsfenster schließt sich schlussendlich vollständig in einer Höhe, die „**Coffin-Corner**“ genannt wird.

([http://en.wikipedia.org/wiki/Coffin_corner_\(aviation\)](http://en.wikipedia.org/wiki/Coffin_corner_(aviation)))

Gleichzeitig ist damit die theoretisch maximal mögliche Rekordflughöhe erreicht. Zu bedenken ist hierbei, dass für Luftturbulenzen, für Manöver und für g-Lasten ausreichende Reserven vorgehalten werden müssen.

Gefährlich ist, dass damit sowohl zu langsames wie auch zu schnelles Fliegen zu einem Abtauchen führen! Der Pilot muss dennoch jederzeit genau wissen, ob auftretende Vibrationen (Buffeting) ein Überziehen andeuten oder aber ein Überschreiten der kritischen Mach-Zahl und er muss sofort richtig reagieren, nämlich ziehen oder drücken.

Mach-Zahl-Effekte

Die Mach-Zahl gibt an, mit welchem Anteil an der Schallgeschwindigkeit das Flugzeug fliegt. Eine Fluggeschwindigkeit von 702 km/h = 195 m/s = 0,65 * 300 m/s bedeutet (bei einer Schallgeschwindigkeit von 300 m/s in 27 km Höhe), dass die Machzahl 0,65 beträgt. Damit ist man scheinbar noch weit entfernt vom Erreichen der Schallgeschwindigkeit bei Mach 1. Es ist aber falsch, zu glauben, dass um das ganze Flugzeug die Strömungsgeschwindigkeit überall gleich der Fluggeschwindigkeit wäre. Vielmehr entstehen durch die Verdrängung und die Profilgestalt etwa auf der Flügeloberseite deutlich höhere Geschwindigkeiten! Diejenige Fluggeschwindigkeit, bei der diese erhöhten Strömungsgeschwindigkeiten erstmals die Schallgeschwindigkeit erreichen, nennt man kritische Mach-Zahl. ([http://rgl.faa.gov/Regulatory_and_Guidance_Library/rgAdvisoryCircular.nsf/0/e04e9b9732ba93fd86256caa005ca97e/\\$FILE/AC61-107A.pdf](http://rgl.faa.gov/Regulatory_and_Guidance_Library/rgAdvisoryCircular.nsf/0/e04e9b9732ba93fd86256caa005ca97e/$FILE/AC61-107A.pdf))
(<http://www.grc.nasa.gov/WWW/K-12/airplane/mach.html>)

Die Konsequenzen aus dem lokalen Erreichen der Schallgeschwindigkeit gehen von Schockwellen über Strömungsablösungen und Auftriebsverlust bis hin zu Verlust der Ruderfunktion oder gar zu Ruderumkehr oder zum „Mach tuck“. Bei letzterem wird das Flugzeug durch die drastischen Änderungen in der Profilmströmung stark kopflastig. Dies ändert die Flugbahn stark abwärts und die Geschwindigkeit nimmt fatalerweise weiter zu! Das Erreichen der kritischen Mach-Zahl zeigt das Flugzeug durch Vibrieren (eng: Buffeting, <http://de.wikipedia.org/wiki/Buffeting>) an.

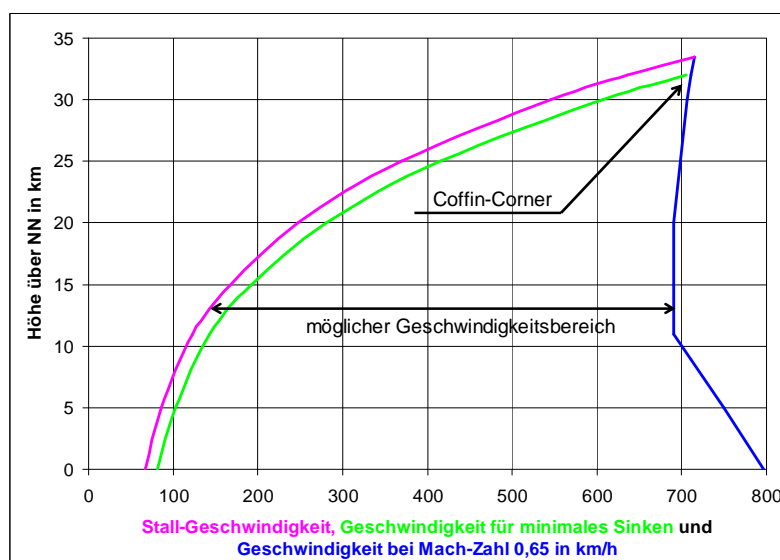


Diagramm 3: Der fliegbare Geschwindigkeitsbereich des Perlan 2 wird begrenzt durch Strömungsabriss (Stall) und durch die Mach-Zahl-Effekte!

e) Ein weiteres Problem ist die **kinematische Zähigkeit** ν (griechischer Buchstabe „nü“). Sie nimmt mit wachsender Höhe deutlich zu: Beträgt sie auf Meereshöhe noch $\nu = 0,0000146 \frac{m}{s^2}$, so wächst der

Wert auf $\nu = 0,000535 \frac{m}{s^2}$ in 90.000 ft. (<http://www.luizmonteiro.com/StdAtm.aspx>)

In der Konsequenz schrumpfen die Re-Zahlen beinahe auf Werte aus dem Modellflugbereich:

Zwar liegt am Boden die Re-Zahl an der Flügelwurzel (Tiefe 1.066 mm) bei minimalem Sinken ($V=21$ m/s) noch bei ca. 1,5 Millionen. Aber in 90.000 ft Höhe erreicht der Perlan 2 das geringste Sinken bei $V=138$ m/s und so nur eine Re-Zahl von 277.000! Am Höhenleitwerk und an den Flügelspitzen schrumpfen die Re-Zahlen gar bis fast 100.000! Diese Werte sind kurioserweise denen eines Scale-Nachbaues des Perlan als ferngesteuertes Modell mit 7 m Spannweite in „normalen“ Höhen sehr, sehr ähnlich!

Reynolds-Zahl

Die Mach- und die Reynolds-Zahl werden auch als Ähnlichkeitszahlen bezeichnet. Bei konstanter Re-Zahl

$$Re = \frac{V \cdot l}{\nu}$$

(mit der kinematischen Zähigkeit ν , der

Fluggeschwindigkeit V und der Flügeltiefe l)

wird eine gewisse physikalische Ähnlichkeit von Profilmströmungen erreicht, selbst wenn man Tiefe und Geschwindigkeit ändert (<http://www.iag.uni-stuttgart.de/laminarwindkanal/pdf-dateien/Vorlesung%20Messtechnik/Aehnlichkeitszahlen.pdf>) Die Reynolds-Zahl hat insbesondere großen Einfluss auf die Länge der erreichbaren laminaren Laufstrecken. In der weiteren Konsequenz hängt „die beste“ Profilkontur deutlich ab vom Re-Zahl-Bereich, in dem das Profil eingesetzt werden soll.

5) Die Auslegung des Perlan 2

Die Aufgabenstellung für den Konstrukteur Greg Cole lässt sich kurz so umschreiben:

- I. Die Sinkgeschwindigkeit muss in jeder Flughöhe so klein sein, dass die Rekordhöhe in vertretbarer Zeit erreicht werden kann.
- II. Die Coffin-Corner soll in eine möglichst große Höhe verschoben werden.

Zu I): Hochfliegende Wetterforschungsballons haben Wellenaufwinde bis in große Höhen von 32 km gemessen. (<http://www.techbriefs.com/content/view/2582/32/>) Aus diesen Messungen kann man auch lernen, dass die Aufwindstärke mit der Höhe zunimmt. Das ist enorm wichtig, weil ja die Sinkgeschwindigkeit des Perlan 2 genau wie seine Fluggeschwindigkeit mit der Höhe deutlich zunimmt. Wie schwierig es wird und wie lange es dauert, ein bestimmtes Höhenintervall zu durchsteigen, hängt davon ab, um wie viel der Wellenaufwind dort stärker ist als das Eigensinken des Flugzeuges. Diese Bilanz ergibt die härtesten Segelflugbedingungen zwischen 30.000 ft und 60.000 ft. In diesem Bereich muss das Flugzeug also ein besonders kleines Eigensinken haben. Laut Greg Cole wird gerade die Flugleistung in 60.000 ft über die Mission generell entscheiden, zumindest aber großen Einfluss auf die Missionsdauer haben. Aber auch die entscheidenden letzten Höhenmeter in 90.000 ft müssen gewonnen werden!

Überhaupt scheint der Perlan im Gegensatz zu anderen Segelflugzeugen fast nur auf einen Betriebspunkt ausgelegt werden zu müssen: Den Punkt des geringsten Sinkens. Dieses allerdings für ein sehr breites Spektrum von Reynolds-Zahlen und Mach-Zahlen. Entsprechend sehen die optimierten Flügelprofile CSP4 bis CSP7 deutlich anders aus, als Profile von „normalen“ Segelflugzeugen. Die Profilformen des Perlan 2 lassen unschwer den anderen Re-Zahl-Bereich bereits an der äußeren Form erkennen. Sie ähneln eher den Profilen von Großsegler-Modellflugzeugen. Gleichzeitig sind die traumhaft geringen c_W -Werte moderner Segelflugzeugprofile bei deren viel höheren Re-Zahlen für den Perlan 2 von vorneherein

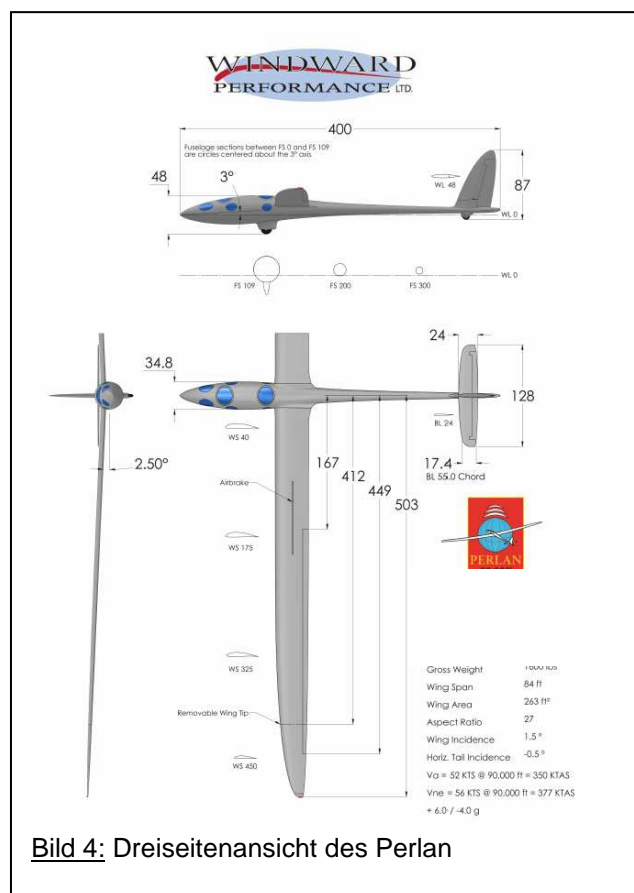


Bild 4: Dreiseitenansicht des Perlan

ausgeschlossen.

Für das geringste Sinken schädlich ist eine hohe Flächenbelastung. Allein aus diesem Grund sind eine große Flügelfläche bzw. eine nicht zu hohe Streckung und ein geringes Gewicht ausschlaggebend. Bei der Wahl der Flügelstreckung tritt zudem die Reynolds-Zahl als limitierender Faktor viel stärker in den Vordergrund als bei „normalen“ Segelflugzeugentwürfen: Bei kleinen Re-Zahlen nimmt mit wachsender Streckung der Profilwiderstand deutlich stärker zu als bei höheren. So liegt die Streckung des Perlan 2 bei moderaten 27. Gleichzeitig hat Greg Cole einen deutlich überelliptischen Flügelgrundriss gewählt. Dies erhöht den induzierten Widerstand kaum, vermeidet nach außen zur Flügelspitze hin aber allzu kleine Re-Zahlen mit entsprechend höheren Profilwiderständen.

Zu II): Diagramm 3 zeigt die Coffin-Corner, also die theoretisch größte Flughöhe als Schnittpunkt von zwei Linien. Werden diese auseinander geschoben, so tritt die Coffin-Corner erst in einer größeren (Rekord-) Höhe ein! Dazu gibt es prinzipiell vier Möglichkeiten:

2a) Schiebe die blaue Linie nach rechts, entwirf also ein Profil, bei dem die ersten Mach-Effekte erst etwas später eintreten. Dies wird erreicht, indem der Geschwindigkeitsanstieg auf der Profilerseite abgeschwächt wird.

2b) Reduziere die Geschwindigkeiten für Stall und minimales Sinken, indem das Profil (noch) größere Auftriebsbeiwerte ermöglicht. Unglücklicherweise widerspricht das der Forderung aus 2a)

2c) Baue ein leichteres Flugzeug. Dadurch werden die Fluggeschwindigkeiten kleiner.

2d) Baue ein größeres Flugzeug. Angesichts einer fixen Nutzlast werden auch dadurch die Flächenbelastung und damit die Fluggeschwindigkeiten reduziert.

In Phase 2 des Perlan-Projektes hat Greg Cole von Windward Performance in Bend, Oregon einen gigantischen Doppelsitzer entworfen: Der Perlan 2 bekommt eine Spannweite von 25,6 m bei einer Flügelfläche von 24,4 m². (Zum Vergleich: Die SB-10 hat bei 29 m Spannweite 22,95 m² Flügelfläche, die eta hat bei 30,9 m einen Flächeninhalt von 18,6 m².)

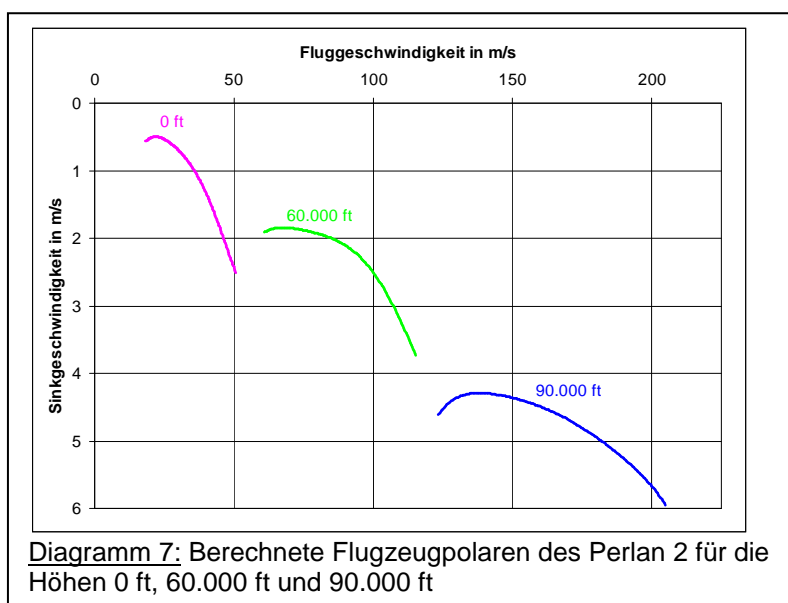
Tabelle 5: Technischen Daten des Perlan 2:

Leergewicht	573 kg
Abfluggewicht	816 kg
Spannweite	25,6 m
Flügelfläche	24,4 m ²
Streckung	27

Höhe in ft	Luftdichte in kg/m ³	Min. Fluggeschwindigkeit in m/s	Minimales Sinken				Beste Gleitzahl
			Geschw. in m/s	Sinkgeschw. in m/s	Re-Zahl an der Wurzel	Mach-Zahl	
0	1,2250	19	21	0,51	1.541.000	0,06	47
30.000	0,4590	31	34	0,86	1.129.000	0,11	46
60.000	0,1163	62	68	1,83	591.000	0,23	43
90.000	0,0274	123	138	4,27	277.000	0,46	36

Tabelle 6: Die berechneten Flugleistungen und Ähnlichkeitszahlen in unterschiedlicher Höhe

In der Summe aller Maßnahmen entsteht ein doppelsitziges Segelflugzeug mit Flugleistungen, die präzise auf das Aufgabenspektrum hin optimiert sind. Die Tabellen und Zeichnungen zeigen das Ergebnis der Optimierungen durch Greg Cole. Insbesondere zeigt auch Diagramm 3 bereits die für den Perlan 2 kalkulierten Geschwindigkeiten. Je nachdem, wie groß der Sicherheitsabstand von den Mach-Zahl-Effekten sein soll, könnte man die erreichte Coffin-Corner in ca. 100.000 ft sehen!



Bekannt wurde Windward Performances durch den Duck Hawk. Er gilt als revolutionärer Entwurf. Das Unternehmen Windward-Performance glänzt auch durch hochentwickelte Fasertechnologien. Nahezu alle Teile entstehen in Prepreg Spread-Tow-Kohlegelegen. Der Duck Hawk VNX ist zugelassen bis zu einer Maximalgeschwindigkeit V_{ne} von 225 KTS = 416 km/h in ruhiger Luft (<http://windward-performance.com/projects/duckhawk/models/>) und hält Beschleunigungen von +11 / -9 g

6) Rekordflugstrategie

a) Wellensegelflug

Im Grunde wird die Rekordhöhe "einfach nur" im Wellensegelflug erreicht. Im Gegensatz zu thermischen Aufwinden und zu Hangaufwinden reichen die Aufwinde, die durch Leewellen verursacht werden, in deutlich größere Höhen.

Leewellen entstehen hinter Bergketten, wenn

- der Wind mehr oder weniger senkrecht auf die Bergkette bläst ,
- bereits in niedrigen Höhen ein starker Wind bläst und
- die Windstärke mit der Höhe zunimmt

Bei den Leewellen handelt es sich um ortsfest im Raum stehende Wellen, also um abwechselnde Auf- und Abbewegungen der Luftschichten, während diese mit dem Wind hinter der Bergkette ins Lee versetzt werden. Die räumliche Struktur ist also ortsfest wie eine Minigolfbahn, während die Luftströmung dieser Wellenbahn wie ein Minigolfball folgt und sich dabei an bestimmten Stellen aufwärts bewegt (also Aufwind erzeugt).

Die obigen Windbedingungen treten häufig vor dem Heranziehen einer Warmfront auf. Das günstige Zeitfenster ist 8 - 15 Stunden weit.

(<http://perlanproject.org/wp-content/uploads/2011/12/NL3.pdf>)

Normalerweise vermögen die Leewellen die Tropopause nicht zu durchdringen, weil sie eine Inversionsschicht bildet. Wenn jedoch oberhalb der Tropopause der Wind weiterhin stark zunimmt, so entsteht eine Instabilität, die stärker ist als die Stabilität der Temperaturschichtung oberhalb der Tropopause. Unter diesen Bedingungen kommt es zu den "stratosphärischen Leewellen", die bis in Höhen von über 30 km reichen können.

b) Fluggebiet

Perlan-Project hat nun auf der ganzen Erde diejenige Region gesucht, die einerseits die richtigen topografischen Voraussetzungen mit einer ausgeprägten Bergformation bietet. Andererseits muss die Windrichtung der Stürme senkrecht zur Bergkette liegen und eine Konstellation von weiteren atmosphärischen Strömungen möglich sein, bei denen der Wind bis große Höhen immer mehr zunimmt. Einen solchen Ort hat man mit El Calafate in Argentinien gefunden. Es liegt auf dem 50ten Breitengrad auf der Leeseite der Anden.

Woher kommt der Name Perlan?

Polare Stratosphärenwolken werden wegen ihrer Farbgebung auch gerne als Perlmutterwolken bezeichnet. „Perlan“ ist isländisch und bedeutet zu Deutsch „Perle“



Bild 8: Perlmutterwolken über dem NASA Radom, McMurdo Station, Antarktis

(http://www.flickr.com/photos/alan_light/5273187814/, Autor: Alan Light, Charlotte, USA)

c) Globale atmosphärische Zirkulation

Denkt man nun daran, auch in größeren Höhen starken Wind zu finden, so muss man sich mit den globalen Erscheinungen innerhalb der Erdatmosphäre beschäftigen. Hier unterscheidet man drei globale Zirkulationen:

1) Vom Äquator bis zum 30. Breitengrad findet sich ein erster Bereich, die sog. **Hadley-Zellen**. In ihnen bewegt sich die Luft in Äquaturnähe infolge der höheren Sonneneinstrahlung aufwärts, während sie in der Nähe des 30. Breitengrades wieder absinkt. In den unteren Kilometern der Atmosphäre entsteht dadurch eine Strömung hin zum Äquator. Infolge der Corioliskraft wird die Strömung westwärts abgelenkt, so dass die bekannten "Passatwinde" aus Nordost entstehen. In großer Höhe von 10 - 15 km (Tropopause) bläst die Strömung entsprechend polwärts. Dabei wird sie ostwärts abgelenkt. Die Hadley-Zellen leisten einen wesentlichen Beitrag zum Wärmetransport innerhalb der Atmosphäre von den Äquatorialbereichen in gemäßigtere Breitengrade.

2) Vom 30. bis zum 60. Breitengrad schließen sich die sog. Ferrel-Zellen an. Die Verhältnisse entwickeln sich analog, lediglich die Drehrichtung innerhalb der Zelle ist entgegengesetzt: Bei 30° Breite sinken die Luftmassen ab, bei 60° steigen sie auf. Entsprechend ergeben sich durch die Corioliskraft auf der Nordhalbkugel in diesen Bereichen eher Süd- bis Westströmungen.

3) Das polnahe Drittel der Breitengrade ist nun von der Polar-Zelle bestimmt: Die Drehrichtung ist erneut entgegengesetzt. Die Höhe der Zellen nimmt Richtung Pol ab. Die drei Zellen existieren analog auf der Südhalbkugel. Alle Verhältnisse sind an der Äquatorebene zu spiegeln.

Bei aller scheinbaren Systematik der atmosphärischen Zirkulation muss man sich vor Augen halten, dass die obige Beschreibung sehr idealisiert ist: Die Grenzen zwischen den Zellen stellt man sich besser zeitlich und örtlich variabel vor.

d) Polarjets

Im oberen Kontaktbereich der Polarzelle und der Ferrelzelle entsteht in der Gegend des 60ten Breitengrades der **Polarjet**. Die Luftmassen an der Grenze zwischen zwei Zellen haben sehr unterschiedliche Temperaturen. Das sorgt für große Dichte- und Druckunterschiede, und entsprechend starke Ausgleichsströmungen. Die Corioliskraft lenkt diese Strömungen nach Osten ab und formt schließlich einen Strahlstrom, den sog. Polarjet. Dieser Polarjet mäandert grob in der Gegend des 50. – 80.

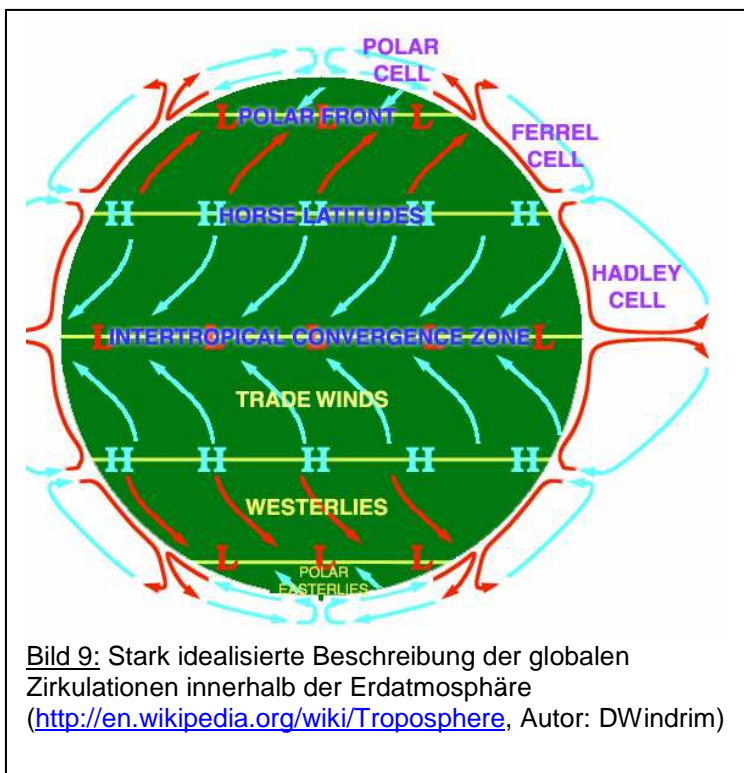


Bild 9: Stark idealisierte Beschreibung der globalen Zirkulationen innerhalb der Erdatmosphäre (<http://en.wikipedia.org/wiki/Troposphere>, Autor: DWindrim)

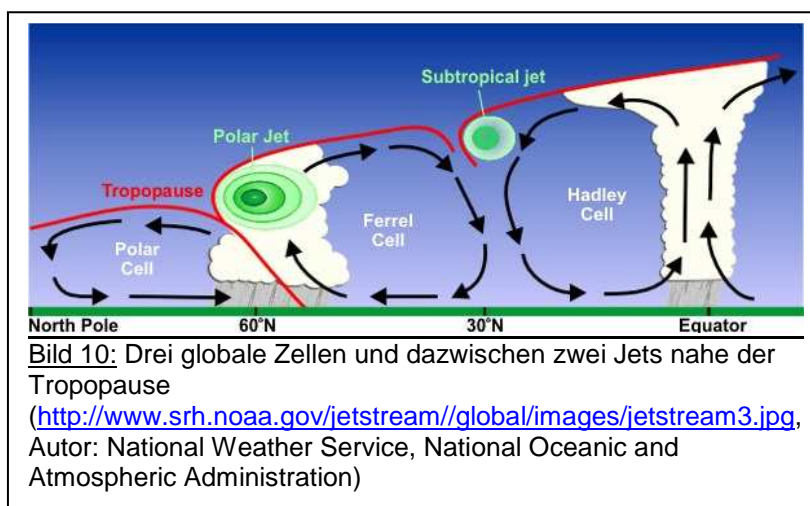


Bild 10: Drei globale Zellen und dazwischen zwei Jets nahe der Tropopause (<http://www.srh.noaa.gov/jetstream//global/images/jetstream3.jpg>, Autor: National Weather Service, National Oceanic and Atmospheric Administration)

Breitengrades in Höhen von 7 bis 12 km. Die Breite des Polarjets liegt bei wenigen hundert Kilometern, seine Dicke bei grob 5 km. Er erreicht Geschwindigkeiten von bis zu 400 km/h!! (<http://perlanproject.org/wp-content/uploads/2011/12/NL3.pdf>)

Doch damit nicht genug: Jenseits der Tropopause kann in der Stratosphäre ein weiteres Windfeld liegen, die sogenannten

e) Polarnachtjets

In den Wochen und Monaten der Polarnächte bildet sich ein zweiter Jet aus, der Polarnachtjet, der in etwa 60° Breite ostwärts bläst. In den Polarnächten ist nämlich die Temperaturdifferenz zwischen der polaren und der äquatorialen Stratosphäre extrem groß. Diese Bereiche der Atmosphäre sind dann praktisch isoliert voneinander. Warme Luft aus Äquatorregionen strömt in der Stratosphäre zu den Polen, wird aber durch die Corioliskraft nach Osten abgelenkt und bilden den Polarnachtjet. Die warme Luft kann also nicht weiter polwärts vordringen, als bis in den Polarnachtjet. So bildet dieser Polarnachtjet eine starke Isolierung für den "Polarvortex". So nennt man den vom Polarnachtjet eingeschlossenen Atmosphärenbereich: Dabei handelt es sich um große Zyklonen über dem Nord- und dem Südpol. Auf der Südhalbkugel drehen sie sich im Uhrzeigersinn. Vereinfacht kann man sich eine Kreisbewegung um den Südpol vorstellen. Sie reichen von der mittleren Troposphäre bis in die obere Stratosphäre. (<http://perlanproject.org/wp-content/uploads/2011/12/NL3.pdf>)

Gleichzeitig kühlt der Polarvortex innerhalb des Polarnachtjets im Laufe eines Winters zunehmend aus, weil das Sonnenlicht ausbleibt und weil er gleichzeitig Wärme ins All abstrahlt. Über Monate führt dies zu enormen Temperatur- und Druckdifferenzen in der Stratosphäre. Die größte Abkühlung tritt auf der Nordhalbkugel also Ende Winter / Anfang Frühling auf, also auf der Südhalbkugel Ende Juli, Anfang August. Je größer diese Temperaturdifferenzen, umso stärker schließlich der Polarnachtjet!

Kurz zusammengefasst besteht das Rekordwetter also aus drei verschiedenen Windphänomenen, die gleichzeitig und im Raum genau übereinander auftreten müssen:

- In der unteren Troposphäre naht eine Warmfront, verbunden mit einem starken Westwindfeld.
- Dieses trifft senkrecht auf die südlichen Anden und erzeugt auf der Leeseite Wellenaufwinde.
- Darüber liegt im Bereich der Tropopause der gleichgerichtete Polarjet mit Windgeschwindigkeiten bis 400 km/h
- Erneut darüber bis weit in die Stratosphäre hinauf bläst der wiederum gleichgerichtete Polarnachtjet mit bis zu 500 km/h

So bilden sich stratosphärischen Leewellen aus. Sie finden sich auf der Nordhalbkugel etwa im Bereich von 60° bis 70° Breite. Auf der Südhalbkugel liegen sie tendenziell etwas näher am Äquator. Weil außerdem der Polarvortex auf der Südhalbkugel tendenziell starker ausgeprägt ist und besser vorherzusagen ist, fiel die Wahl schließlich auf El Calafate in Argentinien. Man erwartet pro Jahr für insgesamt etwa 2 Wochen solches Rekordwetter. Die ersten Rekordversuche sind für den August 2015 geplant.

(<http://soaringcafe.com/2012/03/ssa-2012-the-perlan-project-an-interview-with-greg-cole/>)

Mich persönlich fasziniert das Perlan-Projekt durch seine riesige Bandbreite an Themen aus der Meteorologie, aus der Aerodynamik, aus dem modernen Faserverbundleichtbau, aus der Medizin usw.. Ganz am anderen Ende fesselt die Vorstellung, ohne Antrieb bis an den „Rand des Weltalls“ segeln zu können. Wer wäre davon nicht begeistert?

Perlan Project setzt auch auf diese emotionale Attraktivität ihres Unterfangens. Sie pflegen viele Partnerschaften und richten Veranstaltungen in Museen, Schulen und Universitäten aus, um das Interesse junger Leute für Mathematik, für Natur- und Ingenieurwissenschaften und für die Forschung zu fördern!

Tatsächlich hat das Projekt aber nicht nur ideellen Wert: Nach den Rekordflügen bietet der Perlan 2 eine endlos wieder verwendbare Plattform zur wissenschaftlichen Untersuchung und Erforschung der Stratosphäre. Dazu zählen auch wichtige Fragen unserer Klimaproblematik, wie etwa die Ozonschicht und im speziellen die Ozon-Loch-Problematik über dem Südpol.

7) Sponsoren gesucht!

Als Non-Profit-Unternehmung verdient dieses Projekt allerhöchste Anerkennung! Ganz anders als der Fallschirmsprung von Felix Baumgartner aus der Stratosphäre will man hier keinen österreichischen Getränkehersteller als Hauptsponsor.

Das Perlan-Project verfügt über keine Werbeeinnahmen, es ist angewiesen auf weitere Spenden und die Unterstützung durch Sponsoren. Im aktuellen Newsletter (<http://perlanproject.org/wp-content/uploads/2013/07/The-Perlan-Project-Newsletter-May-June-2013-1.pdf>) ist zu lesen, dass bereits 3,65 Mio. US\$ gespendet und investiert wurden. Allein bis zur Fertigstellung des Perlan 2 für den Erstflug werden aber noch 1,446 Mio. US\$ benötigt. Wie sagte Greg Cole? „Wir sind so nahe dran und doch so weit weg ...“

Im Grunde ist das Perlan-Projekt ein Projekt der weltweiten Segelfluggemeinde auf der Suche nach den Grenzen des Machbaren. Ich persönlich finde, ein äußerst vielseitiges und interessantes Projekt. Und auf jeden Fall ein unterstützenswertes!

Sicher haben auch Sie schon diesen anonymen Passanten kennengelernt, der Sie nach der Landung lüchelt: „Wie lange können Sie damit oben bleiben, wie weit können Sie damit fliegen und wie hoch kommen Sie damit?“ Vielleicht können Sie bald darauf eine Antwort geben: „Tja, der Rekord bei Segelflugzeugen liegt bei über 27 km und ich habe dazu beigetragen!“

Dr. Michael Wohlfahrt
Logo-Team