

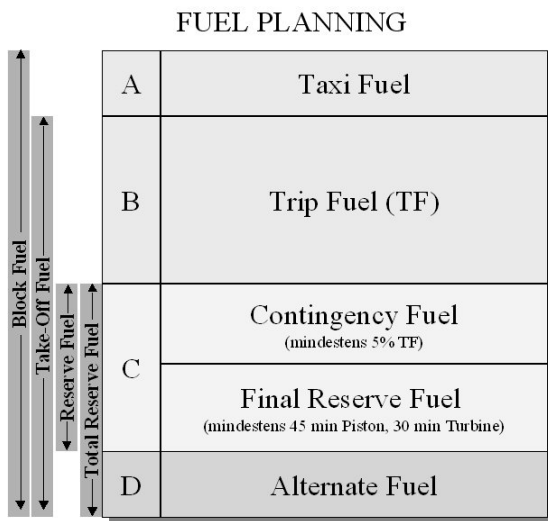
Das Best Range Paradoxon

(März 2006)

Long Range hat was. Ich meine Long Range Flüge, die wirklich an die Grenzen eines Flugzeugs gehen. In denke dabei - möglicherweise ausgelöst durch die geschilderte Leserreise nach China - an Legs mit maximaler Range über Wasser mit vielleicht 1000 - 1200 NM mit einer Zweimot wie einer PA30 oder vielleicht einer Cessna 414, vielleicht gibt es noch zusätzlich einen point-of-no-return, grenzwertig eben. Nun gut, wird man sagen, die Flugplanung läuft ab wie jede andere auch, nur dass man bei der Planung noch genauer arbeitet, am Ende sicher double bis triple checked.

Nun angenommen, meine Planung sagt „GO“ bei dem angenommenen Wind einer sehr akribischen Wetterauswertung von vielleicht 10-15 kts Gegenwind. Mein Flugzeug steht auf der Bahn Oberkante Kragenweite voll mit Sprit. Main, Tip und Nacelle Tanks sind zum Überlaufen voll, die Instrumente zum Leanen arbeiten ohne Mucken und ich habe vorsorglich noch eine Kopie des Range Profiles aus dem POH direkt im Trip Kit. Aber, bin ich wirklich bestens gewappnet für den Flug? Nun gut werden die meisten

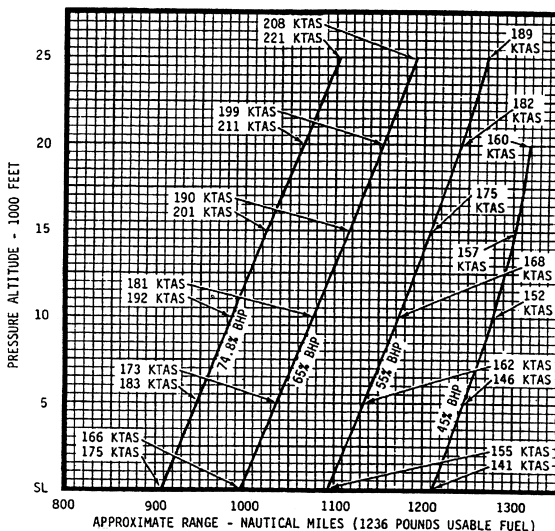
sagen, besser vorbereiten kann man sich nicht mehr und die Gase reinschieben. Das geht meistens auch gut und wow! Was für ein Flug wird man sagen, wenn man einmal mit fast leerem Tank angekommen ist.



Fuel Policy nach JAR OPS 1.255

Der ein oder andere hat dabei ein mulmiges Gefühl in der Magengegend und wird vielleicht vorher versuchen, sich an seine Ausbildung zu erinnern bei einer Frage, die dort meist nicht gestellt geschweige denn beantwortet wurde:

Wie ermittele ich eigentlich das Power-setting bzw. die Speed für Best Range bei Gegenwind? Das ist ja vielleicht nicht ganz unwichtig, wenn auf meinem Flug über Wasser der Headwind von 15 plötzlich auf 40 kts zunimmt. Nun gibt es sicher eine Menge Piloten wie z.B. Weltumflieger Elgen Long, die die Antwort sofort hin-



schreiben können. Wenn man es nicht weiß, geben die üblichen POH's hierzu keinerlei Antwort, Range Profile sind stets Angaben bei Zero Wind. Best Range fliegt man halt mit 45 % und möglichst hoch, z.B. etwa in FL200.

Es ist vielleicht nicht so schlecht, einmal ein wenig Theorie zu Range und Endurance nachzuholen.

Die maximale Reichweite war seit den Anfängen der Fliegerei im Fokus der Aerodynamiker. Daher gibt es bereits seit vor 1920 eine Formel hierfür, die historische Breguet Best Range Formel für Propellerflugzeuge bei Zero Wind. Sie lautet:

$$Range = \frac{\eta_{pr}}{c} * \frac{L}{D} * \ln\left(\frac{W_0}{W_1}\right) \quad \text{Breguet, vor 1920}$$

η_{pr} ist dabei der Propellerwirkungsgrad in %, c der spezifische Benzinverbrauch des Motors z.B. in kg/PSh, L ist der Auftrieb (Lift), D der Widerstand (Drag), W_0 und W_1 sind die Massen des Flugzeuges vollgetankt

(MTOM) und mit leeren Tanks. Um die maximale Range zu erreichen, liest der Praktiker das Ganze dann so:

1. Fliege bei der Speed mit maximalem Quotienten Auftrieb/Widerstand.
2. Fliege bei maximalem Propellerwirkungsgrad
3. Fliege bei dem geringsten spezifischen Benzinverbrauch
4. Nimm die maximale Menge Sprit mit

Diese Erkenntnisse kommen nun wahrlich nicht verwunderlich. Allerdings fällt auf, dass in fast allen POH's die benötigte Speed ($L/D = c_L/c_D = \max$, in der Regel so bei 40 % Power) im Range Profile nicht mehr dargestellt wird, meist ist dort 45 % der geringste Wert.

Es gibt des weiteren eine klassische Endurance Formel, die ich hier nicht in der Formelsprache sondern nur in der Interpretation wiedergebe:

1. Fliege bei der Speed, bei der die $(c_L^{3/2})/c_D = \max$
2. Fliege bei maximalem Propellerwirkungsgrad
3. Fliege bei dem geringsten spezifischen Benzinverbrauch
4. Nimm die maximale Menge Sprit mit
5. Fliege bei der höchsten Luftdichte (auf Meereshöhe)

Außer vielleicht dem Wert bei Punkt 1 und Punkt 5, kommt auch das nicht überraschend. Wegen Punkt 5 sind die Endurance Profile Kurven übrigens alle nach links gebogen.

Jetzt kommen wir aber zum eigentlich interessanten Punkt, dem Einfluss des Windes.

Bleiben wir zunächst noch kurz bei der Endurance. Es dürfte jedem ziemlich schnell klar sein, dass die maximale Endurance nicht vom Wind abhängt. Die Geschwindigkeit, bei der man maximal lange in der Luft bleibt, ist ja eine Relativgeschwindigkeit des Flugzeuges gegenüber der Luft, durch die es fliegt. Ob sich diese Luft selbst relativ zum Boden bewegt oder nicht, ändert die Endurance nicht.

Das Gleiche gilt natürlich nicht für die maximale Reichweite. Ein einfaches Gedankenexperiment macht dies klar. Fliegt man mit einer True Airspeed von 120 Knoten bei einem Headwind von 120 Knoten, so ist die maximale Range

gleich null. Theoretisch könnte man also mit der maximalen Endurance, sagen wir einmal 8h gegenüber Ground auf der Stelle stehen bleiben und dann wieder exakt am selben Platz aufsetzen.

Aus diesem Gedankenspiel kann man auch eine Regel ableiten, die intuitiv nicht unmittelbar jedem klar ist, und die ich daher das Best Range Paradoxon nennen will. Um bei Gegenwind die maximale Reichweite zu vergrößern, muss man schneller (ggü. der Best Range Speed ohne Wind) fliegen bzw. mehr Leistung setzen. Zunächst stimmt die Regel für unser Beispiel, denn gibt man im geschilderten Fall mehr Gas, wird die Reichweite ja offensichtlich größer, nämlich zumindest größer als null.

Die genaue Analyse ergibt Folgendes: Um den Wind mitzuberechnen, muss man die obige Breguet Formel um das Verhältnis der Groundspeed zur True Airspeed erweitern:

$$Range = \frac{\eta_{pr}}{c} * \frac{v_{ground}}{v_{true}} * \frac{L}{D} * \ln\left(\frac{W_0}{W_1}\right) \quad \text{Breguet, mit Windeinfluss}$$

Nun können wir uns endlich der ursprünglichen Frage widmen. Mit welcher True Airspeed erreiche ich bei Gegenwind die maximale Reichweite?

Nun könnte man den optimalen Wert von v_{true} natürlich analytisch durch Ableiten und Null setzen ermitteln. Es geht aber auch grafisch.

Range wird ja bestimmt durch die Masse an Sprit, die pro nautischer Meile Entfernung über Grund verbraucht wird. Je weniger Masse an Sprit pro nautische Meile über Grund verbraucht wird, desto weiter kommt man, das leuchtet sicher jedem ein. Daher gilt

$$\frac{\text{kg verbrauchter Sprit}}{\text{NM über Grund}} = \frac{\text{spez. Verbrauch} * \text{Leistung}}{v_{ground}}$$

Man erhält offensichtlich eine minimale Zahl für die kg Sprit pro NM über Grund beim minimalen Wert für Leistung pro erzielter Groundspeed.

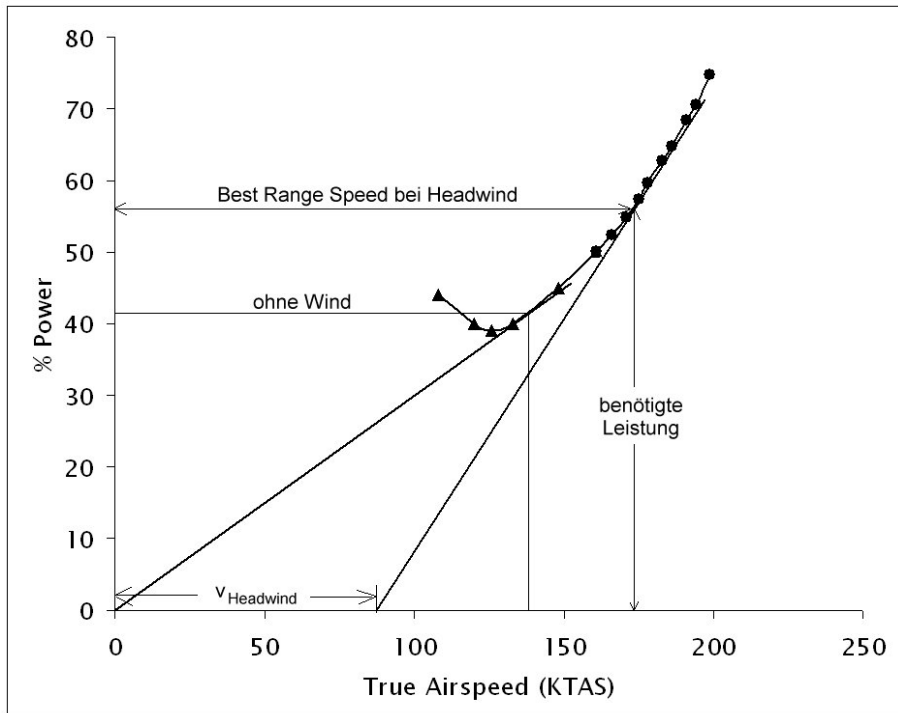


Abbildung 155: Grafische Bestimmung der Best Range Speed

Dies lässt sich grafisch aus der Leistung versus TAS Kurve ermitteln (siehe Abbildung 155). Trägt man den Headwind auf der x-Achse ab, dann ist die Differenz zur erzielbaren TAS gleich der Groundspeed, der zugehörige y-Wert die dafür benötigte Leistung. Der Wert mit minimaler Leistung pro erzielter Groundspeed ergibt sich als Schnittpunkt mit der Tangente an die Kurve.

Auf die gleiche Art lässt sich auch die Best Range Geschwindigkeit bzw. Leistung bei Tailwind ermitteln. Hierzu muss man nur den Tailwind auf der negativen X-Achse nach links auftragen und dann die Tangente ermitteln. Es ist klar, dass dabei eine Speed kleiner als die Best Range Speed ohne Wind nahe am Minimum der Kurve herauskommen muss.

Es gilt also insgesamt:

$$V_{\text{best range tailwind}} < V_{\text{best range}} < V_{\text{best range headwind}}$$

Es interessiert natürlich noch ein weiterer Punkt. Was gewinne ich denn ungefähr, wenn ich das Verfahren anwende? Um ein besseres Gefühl hierfür

zu bekommen, habe ich einmal ein Beispiel für eine Cessna 414A durchgerechnet. Die folgende Tabelle gibt Auskunft. Die Werte bei Windstille sind der Cruisetabelle des Handbuchs einer C414A entnommen, sofern sie über 50 % Power liegen, die zusätzlichen Werte darunter sind geschätzt. (siehe auch obige Kurve, nur die oberen Werte sind Handbuchwerte, der Rest ist geschätzt). Es geht mir im Folgenden nicht um genaue Werte, sondern um das generelle Verständnis. Die Tabelle enthält neben den Werten bei Windstille die zusätzlichen Werte bei einem Gegenwind von 30,50,80 und 100 Knoten. Die dazugehörigen Reichweiten sind jeweils über das Verhältnis %HP/Groundspeed errechnet. Die jeweiligen maximalen Reichweiten sind fett markiert. Man erkennt, dass die Geschwindigkeit bzw. das Powersetting für Best Range mit zunehmendem Headwind steigt. Allerdings ist der Effekt marginal bei Headwinds bis 30 Knoten. Bei 50 Knoten ist die optimale Power bei 52 % (+12 %), bei 80 Knoten Headwind bei 55 % (+15 %). Bei 100 Knoten Headwind ist das optimale Powersetting allerdings bereits bei 71 % (+31 %) also nahezu Vollgas.

Cessna 414A, FL 150, ISA, Long Range tanks 1.236 Pounds usable fuel

	Headwind			Headwind		Headwind		Headwind		Headwind	
	0		Max	30	Max	50	Max	80	Max	100	Max
% BHP	KTAS	%HP/GS	Range	GS	Range	GS	Range	GS	Range	GS	Range
74,8	199	0,376	1.058	169	899	149	792	119	633	99	526
70,6	194	0,364	1.093	164	924	144	811	114	642	94	530
68,4	191	0,358	1.111	161	936	141	820	111	645	91	529
64,9	186	0,349	1.140	156	956	136	833	106	650	86	527
62,7	183	0,343	1.161	153	970	133	844	103	653	83	526
59,6	178	0,335	1.188	148	988	128	854	98	654	78	520
57,4	175	0,328	1.213	145	1.005	125	866	95	658	75	520
54,9	171	0,321	1.239	141	1.021	121	877	91	659	71	514
52,4	166	0,316	1.260	136	1.032	116	880	86	653	66	501
50,2	161	0,312	1.276	131	1.038	111	879	81	642	61	483
45	148	0,304	1.308	118	1.043	98	866	68	601	48	424
40	133	0,301	1.322	103	1.024	83	825	53	527	33	328
39	126	0,310	1.285	96	979	76	775	46	469	26	265
40	120	0,333	1.193	90	895	70	696	40	398	20	199
44	108	0,407	976	78	705	58	524	28	253	8	72
Gewinn NM ggü. 45%HP			14	0		14		58		105	
Gewinn in % ggü. 45%HP			1,1%	0,0%		1,7%		9,7%		24,8%	

Abbildung 156: Ein durchgerechnetes Beispiel

Der Effekt tritt offensichtlich erst bei Windstärken über 50 Knoten zutage. Darunter bewegt sich der mögliche Reichweitengewinn bei einer Twin im Bereich von 1–2 %. Über 50 Knoten Gegenwind bringt ein verändertes Powersetting allerdings einen merkbaren Reichweitengewinn. Je stärker der Gegenwind ist, desto stärker ist der Effekt.

Soweit zur Theorie. Das grafische Verfahren ist relativ einfach anzuwenden. Allerdings gibt es ein Problem. Die üblichen Pilot Operating Handbooks enthalten keine vollständige Power Required Kurve. In den Cruise Tabellen ist meist bei 50 % Power Schluss.

Was also tun? Nun in Zeiten von GPS und Bordcomputern lässt sich das Ganze auch anders optimieren. Wer einen digitalen Fuelflow-Computer hat, kann den aktuellen Fuelflow im Flug ablesen und ihn per Taschenrechner für jeweils benachbarte Powersettings durch die auf dem GPS ablesbare Groundspeed teilen. Wie bereits dargelegt, die maximale Reichweite ist bei minimalen Wert von Fuelflow/Groundspeed. Wenn man dann noch weiß, in welchem Bereich dieser Wert bei Gegenwind wahrscheinlich minimal wird, lässt sich das während des Fluges durch Probieren ermitteln. Manche Fuelflowcomputer gestatten eine Kopplung mit dem GPS und zeigen die jeweilige Max Range direkt als Wert in NM an. Dies ist natürlich optimal, aber auch hierbei muss man wissen, was man zu erwarten hat. Wer die Theorie nicht kennt, und bei starkem Gegenwind die Gase noch weiter herausnimmt, wird sich vielleicht wundern, wenn die Reichweite schlechter statt besser wird. Vielleicht wird er oder sie denken, dass der Fuelcomputer spinnt und mit dem suboptimalen Setting weiterfliegen.

Der ein oder andere mag nun sagen, dies sei doch reine Theorie, der Effekt vernachlässigbar und für die praktische Fliegerei uninteressant, die Range Profile Grafiken im POH vollkommen ausreichend. Und überhaupt würde man ja erst schauen, ob man in anderen Höhen bessere Winde hat. Das ist sicher ein vertretbarer Standpunkt, aber andererseits gilt auch: Wer seine Feinde gut kennt, kann sie besser besiegen. Und vielleicht sind es genau die 10 NM mehr, die man irgendwann braucht, um anzukommen. Und ein Bisschen mehr Theorie zu kennen, hat noch nie geschadet und selbst wenn es nur dazu hilft, das Gehirn langsamer altern zu lassen.

Quellennachweis:

- [1] John.D.Anderson, Jr, Aircraft Performance und Design, WCB/McGraw-Hill, 1999, ISBN 0-07-001971-1
- [2] Cessna C414 Pilot Operating Handbook, Cessna Aircraft