

Flugreise

Daniel Antony De Silva

1 Einführung

Flugzeuge starten und landen, und die Passagiere denken kaum darüber nach, wie das eigentlich funktioniert und was dahintersteckt. Klarerweise muss das Flugzeug vor dem Start betankt werden – aber wie viel Treibstoff braucht man dafür eigentlich? Und die Landebahn sollte eine ausreichende Länge haben – wie lang? Und wenn man durchstarten muss, was sind die Bedingungen dafür? Nun, bevor Du Dir überlegst, nie wieder in ein Flugzeug einzusteigen, schauen wir uns etwas von der Mathematik an, die Piloten benötigen – und glaub' mir, sie können das alles!



Abb.1 United Airlines Flugzeug kurz nach dem Start

2 Lehrinhalte, die in dieser Einheit behandelt werden

- Terme mit Brüchen und Exponenten
- Prozentrechnung
- Interpretieren von Tabellen und Graphen
- Lineare Interpolation

3 Aufgabenstellungen

3.1 Treibstoffberechnung

Die Treibstoffmenge eines Passagierflugzeuges setzt sich aus mehreren Teilen zusammen, die vor jedem Flug berechnet werden. Durch das Verändern von Flughöhe oder Geschwindigkeit kann der Pilot während des Fluges etwas Treibstoff sparen. Schauen wir uns das Beispiel eines Fluges von Wien nach Dubai mit einer Boeing 737-800 an. Die Mindestmenge an Treibstoff setzt sich aus folgenden Teilen zusammen:

- a) Treibstoff zum Rollen von der Parkposition zur Startbahn (pauschal 200 kg).
- b) Treibstoff für die Flugstrecke Wien – Dubai.
- c) 5% von b) als Reserve (z.B. für falsche Windprognosen, niederere Flughöhe, Umwege, ...).
- d) Treibstoff für den Flug vom Zielflughafen zum Ausweichflughafen (z.B. wegen Schlechtwetter, blockierter Landebahn, ...). Berechnung ohne Wind mit einer Geschwindigkeit von 380 Meilen pro Stunde.
- e) Mindesttreibstoffmenge im Tank (nach der Landung muss noch Treibstoff für 30 Minuten Flug im Tank sein).

Die Länge der Flugstrecke Wien – Dubai beträgt 2450 Meilen. Der Ausweichflughafen (Muscat, Oman) liegt 160 Meilen von Dubai entfernt. Das Flugzeug fliegt durchschnittlich mit einer Geschwindigkeit von 400 Meilen pro Stunde. Es herrscht an diesem Tag Rückenwind von 34 Meilen

pro Stunde. Das Flugzeug verfügt über zwei Triebwerke, von denen jedes 1200 kg Treibstoff pro Stunde verbraucht.

Aufgaben:

- [1] Wie lange dauert der Flug?
- [2] Wie viel kg Treibstoff müssen für diesen Flug mindestens getankt werden? (Hinweis: Berechne den Treibstoff für den eigentlichen Flug, dann berechne und addiere den zusätzlichen Treibstoff für c), d), and e), und zähle den Treibstoff zum Rollen nach a) dazu).
- [3] Bei großen Flughäfen werden die Flugzeuge durch unterirdische Leitungen betankt. Dabei wird die Treibstoffmenge in Volumseinheiten (Liter) statt in Masseinheiten (kg) gemessen. Wie viele Liter Treibstoff müssen in die Flugzeugtanks gefüllt werden, wenn die Dichte des Treibstoffs 0,79 kg/l beträgt? Wie lange dauert das Betanken, wenn man mit 14 l/sec (Liter pro Sekunde) auftanken kann und sich vor der Betankung noch 3,2 t (Tonnen) Treibstoff in den Tanks befanden?
- [4] Die Piloten stellen die Überlegung an, tiefer als geplant zu fliegen, da es 4000 Fuß tiefer einen um 25 Meilen pro Stunde stärkeren Rückenwind gibt und man damit Treibstoff sparen kann. Allerdings erhöht sich der Treibstoffverbrauch pro 1000 Fuß tieferer Flughöhe um 1% pro Stunde. Kann man hier wirklich Treibstoff sparen, oder verbraucht man sogar mehr? Wie viel? (Hinweis: Addiere die Geschwindigkeit des Rückenwinds zur Fluggeschwindigkeit und wiederhole die Berechnungen aus [1]).
- [5] Die Piloten wollen Treibstoff sparen; sie möchten die Fluggeschwindigkeit reduzieren. Wie stark können sie die Geschwindigkeit reduzieren, wenn die Flugzeit höchstens 5 Stunden 46 Minuten betragen darf (sonst kommt die Maschine zu spät in Dubai an)? Wie viel Treibstoff sparen sie damit, wenn man mit 1% Reduktion der Geschwindigkeit 1% weniger Treibstoff verbraucht (Hinweis: Berechne mit Hilfe der gegebenen Entfernung von Wien nach Dubai die Geschwindigkeit für eine Flugzeit von 5 Stunden 46 Minuten, und berechne dann den notwendigen Treibstoff wie in [1]).

3.2 Landung



Abb.2 US Airways Flug auf der Landebahn in Seattle

Die Landestrecke eines Passagierflugzeugs setzt sich aus verschiedenen Parametern zusammen. Vor jedem Flug wird die voraussichtliche Landestrecke berechnet und gegebenenfalls während des Fluges aktualisiert. Die Landestrecke hängt von folgenden Parametern ab:

- a) Aktuelles Gewicht des Flugzeuges: Summe aus Gewicht des leeren Flugzeuges, geschätztes Gewicht der Passagiere (Frauen werden mit 76 kg, Männer mit 84 kg angenommen), tatsächliches Gewicht des Gepäcks und der Fracht, geplantes Gewicht des Treibstoffs bei der Landung
- b) Seehöhe des Flughafens
- c) Wind
- d) Neigung der Landebahn
- e) Temperatur
- f) Geschwindigkeit des Flugzeugs beim Aufsetzen

- g) Schubumkehr
 h) Oberflächenbeschaffenheit der Landebahn
 i) Stellung der Landeklappen (Flaps)

Aus diesen Parametern wird die tatsächlich benötigte Landedistanz berechnet. Zu dieser Distanz werden bei trockener Landebahn 15%, bei nasser 65% addiert um Ungenauigkeiten zu kompensieren (spätes Aufsetzen, höhere Geschwindigkeit, rutschige Oberfläche,...) und einen Sicherheitspuffer zu schaffen. Das ergibt die benötigte Landestrecke.

Anbei finden Sie eine Tabelle für eine Boeing 737-800. Die Landung ist in Innsbruck mit Landeklappen 40 (maximale Landeklappen für minimale Geschwindigkeit) Richtung Westen geplant. Das Gewicht des Flugzeuges beträgt 35 160kg. Im Flugzeug befinden sich 95 Frauen und 80 Männer. Das Gewicht des Reisegepäckes beträgt 3 300kg, es wird keine Fracht mitgeführt. Das Gewicht des Treibstoffs bei der Landung beträgt 2 600kg. Gelandet wird mit automatisch aktivierten Bremsen - AUTOBRAKE 3, Anfluggeschwindigkeit 10 Knoten über der Mindestgeschwindigkeit bei Klappen 40 (vref 40 +10), die Schubumkehr wird nicht benutzt (NO REV). Innsbruck meldet die folgenden Daten: Trockene Landebahn, Seehöhe 2 000ft (Airport Pressure Altitude in Fuß), 10 Knoten Wind aus Westen (Headwind), Neigung der Landebahn 0% (Slope) – keine Korrektur der Landedistanz notwendig. Temperatur 11°C (Temperaturkorrektur braucht nicht vorgenommen werden). Der Flugzeughersteller hat die folgende Tabelle zur Landestrecke veröffentlicht:

BREAKING CONFIGURATION	REF DIST	WT ADJ	ALT ADJ	WIND ADJ PER 10 KTS		SLOPE ADJ PER 1%		VREF ADJ	REVERSE THRUST ADJ	
				HEAD WIND	TAIL WIND	DOWN HILL	UP HILL		PER 10 KTS ABOVE VREF40	ONE REV
MAX MANUAL	1375	90/-85	35	-60	220	35	-25	110	70	155
MAX AUTO	1495	95/-85	35	-60	225	35	-25	115	75	165
AUTOBRAKE 3	1745	115/-105	40	-75	265	15	-10	185	10	20
AUTOBRAKE 2	2200	165/-155	65	-100	365	30	-35	200	40	40

Tabelle 1 Landestrecken für eine Boeing 737-800 mit normaler Bremsfunktion

Aufgaben:

- [1] Berechne das voraussichtliche Landegewicht des Flugzeuges. (Hinweis: Addiere das Passagiergewicht, das Gewicht des Gepäcks und das Gewicht des leeren Flugzeugs)
- [2] Wie lange ist die notwendige Landestrecke? (Hinweis: Verwende die entsprechenden Tabelleneinträge)
- [3] Kann eine Landung in Innsbruck überhaupt erfolgen? Versuche dazu (z.B. im Internet) die Länge der Landebahn(en) in Innsbruck herauszufinden!
- [4] Wie lang ist die benötigte Landestrecke, wenn der Pilot MAX AUTO Bremsen wählt? Kann unter diesen Voraussetzungen eine Landung in Innsbruck erfolgen?

3.3 Durchstarten

Ein Passagierflugzeug muss für den Fall, dass es während eines Landeanfluges durchstarten muss, einen bestimmten Mindeststeiggradienten schaffen um Hindernisse sicher zu überfliegen. Für jede Anflugart auf jede Landebahn wird ein Manöver entwickelt und eine Entscheidungshöhe zum Durchstarten (Go-Around) festgelegt, sodass man mit genügend Sicherheitsabstand zu Hindernissen genügend Höhe gewinnen kann um einen neuen Anflug zu starten oder zu einem Ausweichflughafen fliegen zu können.

Wir planen einen Instrumentenanflug mit einer Boeing 737, bei der ein Triebwerk ausgefallen ist, auf Salzburg (ILS 16) in südöstlicher Richtung (siehe Abbildung unten). Die Temperatur beträgt 22°C (OAT...Outside Air Temperature), der Flughafen liegt 1400ft über dem Meeresspiegel (Airport Pressure Altitude), das Gewicht des Flugzeugs beträgt 60 t und die Landung erfolgt mit einer Geschwindigkeit von $V_{\text{ref}} 40+5$ (Speed). Die Klimaanlage bleibt für die Landung eingeschaltet (engine bleed for packs on), die Enteisung für die Vorderkante der Triebwerke bzw. der Tragflächen wird nicht benötigt (engine anti-ice off, wing anti-ice off). Aus der Anflugkarte ist abzulesen, dass die Entscheidungshöhe für einen Go-Around bei einer Boeing 737 (ein Flugzeug der Kategorie C) in 2 030 Fuß liegt, wenn das Flugzeug einen Steiggradient von mindestens 3% schafft. Liegt der Steiggradient zwischen 2,5% und 3%, so liegt die Entscheidungshöhe in 2 190 Fuß. Liegt er darunter kann nicht in Salzburg gelandet werden.

Aufgaben:

- [1] Ermittle den Steiggradienten aus Tabelle 2. Finde dazu den Steiggradienten im ersten Teil der Tabelle für die gegebene Temperatur und Höhe (verwende lineare Interpolation, wenn die Höhe nicht in der Tabelle aufscheint), und führe dann die Gewichtskorrektur und die Geschwindigkeitskorrektur nach den anderen Teilen der Tabelle durch.
- [2] Kann unter den gegebenen Voraussetzungen ein Landeanflug in Salzburg erfolgen? Falls ja, wie hoch ist die Entscheidungshöhe (verwende das Anflugblatt)?
- [3] Kann eine Landung erfolgen, wenn das Gewicht 65 t beträgt?
- [4] Was passiert, wenn die Enteisung eingeschaltet ist (engine and wing anti-ice on)?
- [5] Wie könnte man unter den Voraussetzungen aus [3] trotzdem landen?
- [6] Versuche, andere Anflugblätter zu finden und damit [2]-[4] durchzurechnen!

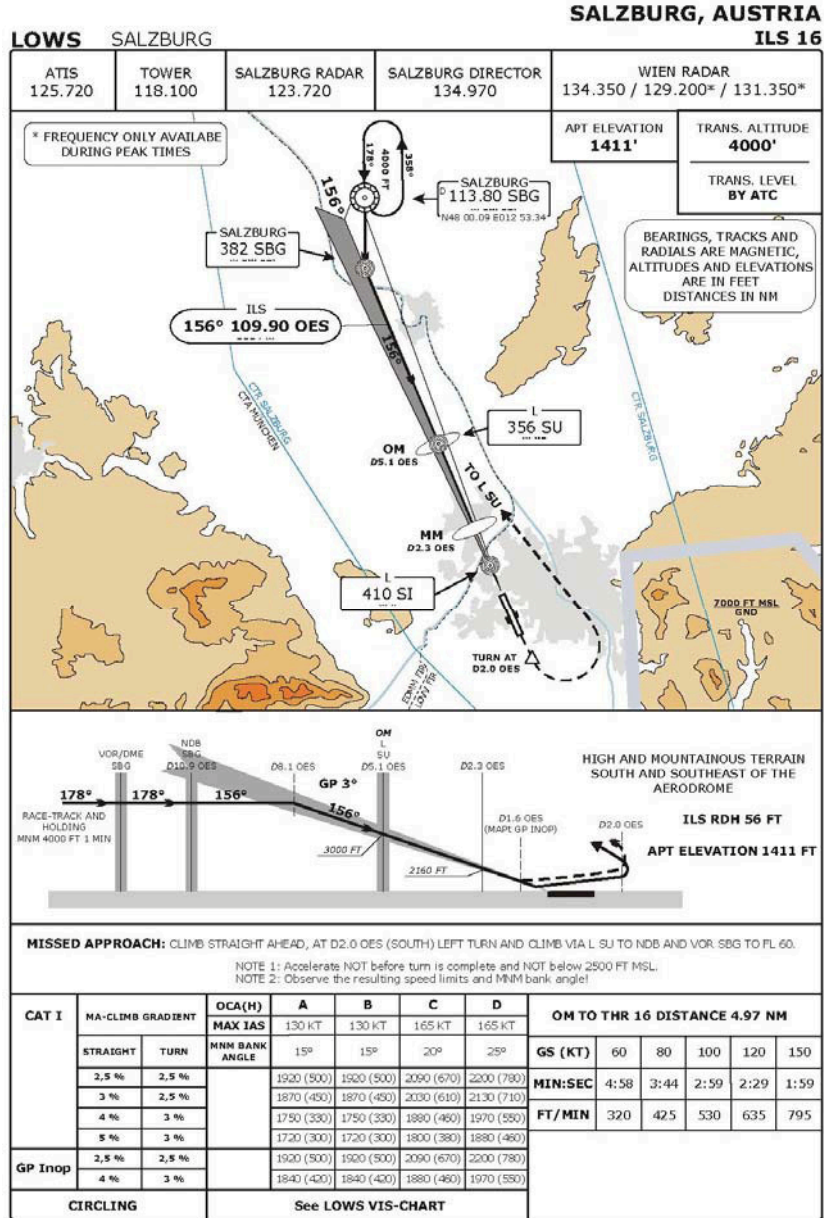


Abb.3 Anflugblatt ILS 16 für Salzburg (LOWS)

GO-AROUND CLIMB GRADIENT

Based on engine bleed for packs on and anti-ice off

TEMP °C	REFERENCE GO-AROUND GRADIENT (%)				
	PRESSURE ALTITUDE (FT)				
	0	2000	4000	6000	8000
30	6.27	5.17	4.11	3.00	1.79
26	6.31	5.72	4.63	3.49	2.22
22	6.33	5.74	5.19	4.02	2.69
18	6.36	5.77	5.21	4.51	3.25
14	6.38	5.79	5.23	4.53	3.85

Gradient adjustment for weight (%)

WEIGHT (1000 KG)	REFERENCE GO-AROUND GRADIENT (%)				
	0	2	4	6	
65	-2.35	-2.84	-3.36	-3.86	
60	-1.72	-2.06	-2.43	-2.79	
55	-0.93	-1.13	-1.34	-1.53	

Gradient adjustment for speed (%)

SPEED	WEIGHT ADJUSTED GO-AROUND GRADIENT (%)				
	0	2	4	6	8
VREF40	-0.33	-0.35	-0.36	-0.36	-0.36
VREF40+5	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
VREF40+10	0.17	0.18	0.19	0.18	0.18

With engine bleed for packs off, increase gradient by 0.3 %

With engine anti-ice on, decrease gradient by 0.1 %

With engine and wing anti-ice on, decrease gradient by 0.3 %

Tabelle 2 Steiggradient zum Durchstarten für Boeing 737-600 mit einem ausgefallenen Triebwerk**Weiterer Lesestoff**

- De Silva, D.A. *Sinnstiftende Aufgaben für den Mathematikunterricht*, Universität Wien, 2008
- Gruber, W. *Unglaublich einfach. Einfach unglaublich*, Ecowin Verlag, Wien, 2006
- Wolke, R. *Woher weiß die Seife, was Schmutz ist?* Piper Verlag, München, 1998