

Lösung:**Labor im Flugzeugbau (zur Flugmechanik) – LFB-L
SS 2023**

Datum: 27.06.2023

Prof. Dr.-Ing. Dieter Scholz, MSME

Bearbeitungszeit: 60 Minuten

Zur Flugerprobung (Beschreibung und Berechnung)

- 1) Wie kann man den Fahrtmesser im Flugversuch kalibrieren, wenn am Boden zwei parallele Geländelinien vorhanden sind?

Es werden zwei parallele Geländelinien gesucht. Diese werden rechtwinklig überflogen. Gegebenenfalls wird das Flugzeug vom Seitenwind versetzt. Das ist unerheblich durch diese geschickte Versuchsanordnung). Es wird die Zeit für den Hinflug gestoppt. Nach einer Umkehrkurve werden die beiden parallelen Geländelinien in entgegengesetzter Richtung überflogen. Es wird die Zeit für den Rückflug gestoppt. Die beiden Zeiten werden gemittelt. Dadurch wird der Gegen- und Rückenwindeinfluss eliminiert. Die wahre Fluggeschwindigkeit (durch die Luft) also die True Air Speed (TAS) ergibt sich aus $v = s/t$, mit s als dem Abstand der beiden parallelen Linien und t der gemittelten Flugzeit. Mit der Flughöhe wird die Dichte nach der ISA ermittelt und damit aus der TAS die EAS und die CAS. Bei langsamen Flugzeugen ist $EAS \approx CAS$). Die CAS wird mit der IAS verglichen. $CAS - IAS$ ist die Korrektur der IAS.

- 2) a) Im Flug wird am Steuerhorn eine Handkraft gemessen (ziehen am Steuerhorn über eine Federwaage). Wie kann diese Kraft in das Moment am Höhenruder umgerechnet werden?
b) Am Steuerhorn mit mit einer Kraft von 50 N gezogen. Das Steuerhorn bewegt sich dadurch um 50 mm. Das Übersetzungsverhältnis der Höhensteuerung wurde mit $-0,2$ m/rad bestimmt. Bestimmen Sie den Ausschlag am Höhenruder (Betrag in $^\circ$ und Richtung) und das Scharniermoment am Höhenruder (Betrag und Vorzeichen).

a) $HM = F_p \frac{\Delta s_p}{\delta}$

- b) Ausschlag: $50 \text{ mm} / (-0,2) \text{ m/rad} = -0,25 \text{ rad} = -14,3^\circ$ (nach oben)
Nach a) $50 \text{ N} (-0,2) \text{ m/rad} = -10 \text{ Nm}$

- 3) a) Im Flugversuch wird Sinkrate und Fluggeschwindigkeit bestimmt. Wie kann daraus die Gleitzahl und der Widerstandsbeiwert ermittelt werden? Die Streckung beträgt $A = 10$.
 b) Bei 90 kt betrage der Gleitwinkel 5° , der Auftriebsbeiwert wird bestimmt: 0,5. Berechnen Sie Gleitzahl und Widerstandsbeiwert!

a) $\sin \gamma = V_v/V$, $\gamma = \sin^{-1} V_v/V$, $\tan \gamma = 1/E$, $E = 1/\tan \gamma$.
 Die Streckung, A wird nicht benötigt.

b) $E = \frac{1}{\tan \gamma} = 11.43 = \frac{C_L}{C_D}$, $C_D = \frac{C_L}{E} = \frac{0.5}{11.43} = 0.0437$.
 Die Geschwindigkeit von 90 kt wird nicht benötigt.

- 4) Es wird mit 5 unterschiedlichen Geschwindigkeiten geflogen. Wie in 3) beschrieben, werden jeweils Auftriebsbeiwert und Widerstandsbeiwert aus dem Flugversuch ermittelt. Wie müssen Sie Auftriebsbeiwert und Widerstandsbeiwert auftragen und weiter vorgehen, um aus einer Ausgleichsgeraden den Oswald-Faktor, e zu erhalten?

Die Widerstandsbeiwerte werden über dem Quadrat der Auftriebsbeiwerte aufgetragen. Es wird die Ausgleichsgerade ermittelt die bei $C_L = 0$ den Nullwiderstand anzeigt. Die Steigung der Geraden, k wird ermittelt und ist $k = \frac{1}{\pi A e}$. Daraus wird mit $e = \frac{1}{\pi A k}$ der Oswaldfaktor, e ermittelt.

- 5) a) Was versteht man unter "Schiebeflug"? Wie muss geflogen werden (Stellung der Ruder), um einen Schiebeflug zu erreichen?
 b) Der maximal zu erreichende Schiebewinkel wurde mit 30° gemessen. Die Anfluggeschwindigkeit beträgt 70 kt. Welche maximale Seitenwindkomponente kann damit ausgeglichen werden?

a) Beim Schiebeflug erfolgt die Anströmung des Flugzeugs nicht direkt von vorn, sondern etwas von der Seite. Der Schiebeflug nach rechts wird geflogen, indem das Querruder nach rechts ausgeschlagen wird und das Seitenruder so viel nach links, dass das Flugzeug den Kurs beibehält. Beim Schiebeflug nach links wird entsprechend das Querruder nach links ausgeschlagen und das Seitenruder so viel nach rechts, dass das Flugzeug den Kurs beibehält. Es wird also "mit gekreuzten Rudern" geflogen.

b) Die Seitenwindkomponente soll hier mit der Geschwindigkeit zur Seite durch Schieben ausgeglichen werden. Die ist die Anfluggeschwindigkeit multipliziert mit dem Sinus des Schiebewinkels. Hier kann also eine maximale Seitenwindkomponente von 35 kt ausgeglichen werden.

Anmerkung: Die Seitenwindkomponente kann auch durch einen Vorhaltewinkel kompensiert werden (oder in Kombination von Vorhaltewinkel und Schiebeflug).

- 6) a) Was ist die Phygoide? Nach wie viel Perioden ist diese Schwingung in etwa ausgeklungen?
b) Ein Flugzeug fliegt ausgetrimmt in 5000 ft mit 100 kt. Eine Phygoide wird eingeleitet. Nach deren Abklingen beträgt die Flughöhe nur noch 4000 ft. Wie kann das erklärt werden?

- a) Die Phygoide ist eine der Eigenformen der Längsbewegung von Flächenflugzeugen. Dabei kommt es zum Austausch von potentieller Energie (Flughöhe) mit kinetischer Energie (Fluggeschwindigkeit). Es ist also eine Art Achterbahnbewegung. Die Frequenz ist nicht sehr hoch und die Dämpfung gering, so dass sich diese Eigenform sehr gut beobachten lässt.
- b) Dadurch, dass das Flugzeug nicht mehr mit der ausgetrimmten konstanten Geschwindigkeit fliegt, sondern teils schneller und teils langsamer wird insgesamt mehr Energie für den Flug benötigt (weil der Widerstand quadratisch von der Geschwindigkeit abhängt). Die fehlende Energie nimmt sich das Flugzeug aus der Flughöhe.

- 7) Was ist Dutch Roll? Nach wie viel Perioden ist diese Schwingung in etwa ausgeklungen?

Dutch Roll ist eine Eigenform der Seitenbewegung. Es ist eine Gier-Roll-Schwingung. Wenn die Flügelstiele aus dem Flugzeug beobachtet wird, dann führt die Flügelstielspitze vor dem Horizont elliptische Bewegungen aus. Die Frequenz lässt eine Beobachtung gut zu. Die Dämpfung ist bei kleinen Flugzeugen hoch. Die Bewegung ist nach etwa drei Schwingungen ausgeklungen.

- 8) Wie wird im Flugversuch geflogen, um ein Lastvielfaches von Null zu erzielen?

Das Lastvielfache von Null wird im Parabelflug erreicht. Dazu wird das schnell fliegende Flugzeug recht steil nach oben gezogen und dann so stark am Steuerhorn gedrückt, dass das gewünschte Lastvielfache von Null erreicht wird. Die entstehende Flugbahn ist eine Parabel.

- 9) Im Flugversuch wird eine instabile Spiralbewegung vorgeführt. Zum Zeitpunkt 0 s beträgt der Hängewinkel 10° , nach 15 s beträgt der Hängewinkel 20° . Welchen Wert hat die "time to double amplitude"? Nach welcher Zeit wird vermutlich ein Hängewinkel von 80° erreicht?

Die "time to double amplitude" beträgt 15 s. Nach weiteren 15 s werden 40° erwartet und nach weiteren 15 s werden 80° erwartet. Vom Hängewinkel 10° bis zum Hängewinkel 80° vergehen also bei diesem Flugzeug insgesamt 45 s.

- 10) Wie wird im Flugversuch geflogen, um ein Lastvielfaches von 2g konstant für etwas längere Zeit zu erzielen?

Das geschieht im Kurvenflug mit 60° Hängewinkel.

Professionelles Fliegen

11) Was bedeutet VFR, IFR, VMC, IMC? Wie hängt das alles zusammen?

VFR: Visual Flight Rules
 IFR: Instrument Flight Rules
 VMC: Visual Meteorological Conditions
 IMC: Instrument Meteorological Conditions

Ein Flug nach VFR erfordert VMC. Liegen IMC vor, dann kann der Flug nur nach IFR durchgeführt werden. IFR kann in VMC und in IMC geflogen werden.

12) IFR: SID, Luftstraße (airway), STAR, Approach Chart. Wie hängt das alles zusammen?

SID: Standard Instrument Departure
 STAR: Standard Arrival Route

Wenn nach IFR geflogen wird, dann erfolgt der Abflug i.d.R. nach einer SID. So gelangt das Flugzeug auf eine Luftstraße (airway). Das Ziel wird über eine oder mehrere Luftstraßen angesteuert. Von der Luftstraße zum Flugplatz geht es über eine STAR zum Initial Approach Fix. Oft werden die Flugzeuge aber auf individuellen Routen direkt vom Fluglotsen zum Anflug geführt, der auf Anflugkarten (Approach Charts) dokumentiert ist.

13) Wie funktioniert ein ILS (aus Sicht des Luftfahrzeugführers)?

Das Instrumentenlandesystem (engl. instrument landing system, ILS) ist ein bodengestütztes System, das die Piloten im Endanflug bei der Navigation zur Landebahn unterstützt. Es erlaubt den Flugbesatzungen, auch bei schlechten Sichtverhältnissen (IMC) präzise anzufliegen. Ein einfaches Anzeigegerät im Cockpit sieht so aus, wie rechts gezeigt. Die Zeiger zeigen darin an, dass die Besatzung nach links und oben korrigieren muss, um auf dem richtigen Flugweg zu bleiben.

Bildquelle: [Fred the Oyster](#), CC BY-SA



Am Flugzeugsystemsimulator

14) Welche Schlüssel sind erforderlich, um ein großes Passagierflugzeug zu starten?

Keine.

15) Was bewirkt das: ADIRS: SET NAV; MCDU: INIT; MCDU: PRESS ALIGN IRS?

Das Air Data Inertial Reference System (ADIRS) verbindet die Inertial Reference Units (IRU) und die Air Data Computers (ADC). Mit der Abfolge von Einstellungen werden die IRU initialisiert.

16) Was versteht man unter ANNUNCIATOR LIGHT TEST?

Mit dem Test können alle Anzeigelampen im Overhead Panel überprüft werden. Normalerweise sind die Lampen aus (dark cockpit philosophy). Mit dem Schalter werden alle Lampen eingeschaltet. Wenn eine Lampe nicht leuchtet, deutet das auf einen Fehler hin.

17) Eine A320 ist auf einer einsamen Betonplatte abgestellt. a) Jetzt soll zum Flug die APU gestartet werden. Mit welcher Energie ist das möglich? b) Anschließend soll das erste Triebwerk gestartet werden. Mit welcher Energie ist das möglich?

- a) Mit der Energie aus den Batterien.
- b) Mit Druckluft der APU.

18) Was bedeuten die Abkürzungen: a) EFIS, b) PFD, c) ECAM?

- a) EFIS: Electronic Flight Instrument System
- b) PFD: Primary Flight Display
- c) ECAM: Electronic Centralized Aircraft Monitoring

19) Wie viele und welche Generatoren hat die A320?

Die A320 hat einen Generator pro Triebwerk (also zwei triebwerksgetriebene Generatoren), weiterhin einen baugleichen Generator an der APU. Zusammen also drei Generatoren. Für Fehlerfälle gibt es noch den hydraulisch betriebenen Constant Speed Motor/Generator (CSM/G).

20) Wie viele und welche Hydraulikpumpen hat die A320?

Die A320 hat eine Hydraulikpumpe pro Triebwerk ("grünes" und "gelbes" Hydrauliksystem) und eine elektrisch betriebene Hydraulikpumpe ("blaues" Hydrauliksystem). Zusammen also drei Hydraulikpumpen. Für Fehlerfälle und für den Betrieb am Boden gibt es noch eine elektrische Hydraulikpumpe im "gelben" Hydrauliksystem, eine Hydraulikpumpe an der Ram Air Turbine (RAT) und eine bidirektionale Power Transfer Unit (PTU), die aus zwei hydraulischen Motor/Pumpen-Einheiten besteht.

21) Wo befindet sich der SPEED BRAKE HANDLE ?

Der speed brake handle befindet sich auf der Mittelkonsole (center pedestal).

22) Was bedeutet: L/G LEVER ... DOWN ?

Das steht auf der Checkliste und bedeutet, dass der Fahrwerkshebel in die untere Position gestellt werden soll. Dadurch wird das Fahrwerk ausgefahren.

23) Was bewirkt im Flug: ENGINE MASTER SWITCH 1 ... OFF ?

Dadurch würde im Flug das linke Triebwerk ausgeschaltet werden. Das sollte im Normalfall unterbleiben.

Zur Vortragsreihe24) Prof. Poll präsentierte eine starke Vision. Er argumentierte: "*contrail management* is a major weapon in the fight against climate change. If it can be supported by the right government policies, it has the potential to make a real positive contribution and, in doing so, could change aviation's narrative from negative to strongly positive." Wie soll das gehen?

In der Luftfahrt kann das Management der Kondensstreifen eine wichtige Waffe im Kampf gegen den Klimawandel sein. Es geht darum, wärmende Kondensstreifen zu vermeiden und kühlende Kondensstreifen zu erzeugen. Auf diese Weise könnte der Luftverkehr Netto zu einer Kühlwirkung kommen.

25) Der *Lilium Jet* nutzt "Ducted Electric Vectored Thrust (DEV T)". Wie funktioniert das?

Die Ducted Fans werden mit der Hinterkante des Flügels nach unten gekippt und erzeugen so aus dem Schub einen Auftrieb.



Bildquelle: [Lilium](#), CC BY-NC-SA

26) Die Luftfahrtindustrie soll bis 2050 auf "Zero Emission" / "Carbon Neutral" oder ähnliches umgestellt sein. Wann wird vermutlich eine mittlere Temperaturerhöhung von 1,5° (gegenüber vorindustrieller Zeit) auf der Erde erreicht sein?

Eine mittlere Temperaturerhöhung von 1,5° (gegenüber vorindustrieller Zeit) wird in deutlich weniger als 10 Jahren erreicht sein. Also vor 2033.

27) "Safe Landing" zitiert "Transport & Environment" mit der Überschrift: "Why ... offers the best path to sustainable aviation". Ergänzen Sie "...".

Die Ergänzung: "flying less". Weniger Fliegen ist die wichtigste Strategie zur Lösung der Umweltprobleme in der Luftfahrt.

- 28) "Safe Landing" zitiert "Oxfam": "Richest 10% are responsible for ... % of CO₂". Ergänzen Sie "...!"

Die Ergänzung: 50%. Die gilt für CO₂ generell.

In der Luftfahrt ist es extremer: "Only 1% of the world population causes 50% of commercial aviation emissions."

- 29) Es wird ermittelt, dass ein Business Jet 12,5 Liter/100 km/Passagier verbraucht. Berechnen Sie die verbrauchte Kraftstoffmasse (Dichte von Kerosin: 800 kg/m³), erzeugte CO₂-Masse, erzeugte äquivalente CO₂-Masse (bei üblichem Umrechnungsfaktor)!

Verbrauchte Kraftstoffmasse:	10 kg/100 km/Passagier	(Faktor 0,8)
Erzeugte CO ₂ -Masse:	31,5 kg/100 km/Passagier	(Faktor 3,15)
Erzeugte äquivalente CO ₂ -Masse:	94,5 kg/100 km/Passagier	(Faktor 3)

- 30) SAF-CO₂-Reduktion: 80 %. Luftverkehrswachstum: 4 % p.a.. 2050: SAF-Quote: 70 %. Wie viel % mehr Luftfahrt-CO₂-Emissionen in 2050 als heute? (Ohne Nicht-CO₂-Emissionen.)

Luftverkehrswachstum:

4 % p.a. ergibt bis 2050 ein Wachstum von $1,04^{27} = 2,88$

CO₂-Emissionen:

$30 \% + 70 \% \cdot 0,2 = 44 \%$

CO₂-Emissionen mit Luftverkehrswachstum:

$2,88 \cdot 44 \% = 126,7 \%$ oder 26,7 % mehr als heute (trotz SAF)!