

Lösung zur Klausur Flugmechanik (FM) WS 2022/2023

Datum: 25.01.2023

Prof. Dr.-Ing. Dieter Scholz, MSME

1. Klausurteil

(keine Hilfsmittel - 60 Minuten - 52 Punkte)

1.1) Nennen Sie die entsprechende Bezeichnung folgender Luftfahrtausdrücke in englischer Sprache! Schreiben Sie so deutlich, dass ich die korrekte Rechtschreibung beurteilen kann!

1. Abhebegeschwindigkeit	lift-off speed
2. Äquivalentgeschwindigkeit	equivalent airspeed
3. Böe	gust
4. dynamische Stabilität der Längsbewegung	longitudinal dynamic stability
5. Fortschrittsgrad	advance ratio
6. Horizontalflug	level flight
7. Kolben	piston
8. Lastvielfaches	load factor
9. Leitwerksvolumenbeiwert	tail volume coefficient
10. Nullwiderstand	zero-lift drag
11. Schallgeschwindigkeit	speed of sound
12. Sicherheitsstartstrecke	take-off field length

1.2) Nennen Sie die entsprechende Bezeichnung folgender Luftfahrtausdrücke in deutscher Sprache!

1. aerodynamic center	Neutralpunkt (Profil, Flügel ...)
2. anhedral	negative V-Form
3. aspect ratio	Streckung
4. buffet onset boundary	Schüttelgrenze
5. ceiling	Gipfelhöhe
6. clearway	Freifläche
7. density height	Dichtehöhe
8. L over D	Gleitzahl
9. landing distance	Landestrecke
10. lift-to-drag ratio	Gleitzahl
11. taper	Zuspitzung
12. wave drag	Wellenwiderstand

1.3) Wie lautet die Faustformel zur Umrechnung von ft/min in m/s?

Der Wert gegeben in ft/min wird durch 200 geteilt (oder durch 1000 mal 5).

- 1.4) Der Kompass im Heck eines Schiffes aus Stahl ist nicht kompensiert. Das Schiff fährt nach Osten. Welchen Kurs zeigt der Kompass? *Grobe Angabe!*

Die Kompassnadel zeigt sowohl nach Norden (in Fahrtrichtung nach links), wird aber auch zum Eisen des Schiffes hingezogen, was sich mehrheitlich vor dem Kompass im Osten befindet. Die Kompassrose dreht sich etwas im Uhrzeigersinn. Der Steuerstrich zeigt jetzt nicht mehr auf Ost, sondern auf z.B. Nordost oder Nordnordost. Mehr dazu [https://de.wikipedia.org/wiki/Deviation_\(Navigation\)](https://de.wikipedia.org/wiki/Deviation_(Navigation)).

- 1.5) Schreiben Sie die "Kette der Geschwindigkeiten" (5 Bestandteile) auf "vom falschen Wert zum wahren Wert". Schreiben Sie dabei die im Flugbetrieb üblichen Abkürzungen auf!

IAS, CAS, EAS, TAS, GS

- 1.6) Die drei Ruder am Flugzeug sind mit positivem Winkel δ_e , δ_r , δ_a ausgeschlagen. Beschreiben Sie die Lage von Höhenruder, Seitenruder und vom rechten Querruder! *Definition, wie in der Vorlesung!*

Höhenruder: nach unten

Seitenruder: nach links (von oben gesehen)

Querruder, links: nach unten

Querruder, recht: nach oben

Merkregel: Die Ruder schlagen positiv so aus, wie es der Rechtshandregel entspricht hinsichtlich des flugmechanischen Achsensystems des Flugzeugs. Beim Querruder gilt dies für das linke Querruder. Das rechte Querruder schlägt gegensinnig aus.

- 1.7) Wie hängen Nicklagewinkel, Bahnwinkel und Anstellwinkel zusammen? *Schreiben Sie die Formel auf!*

Nicklagewinkel: θ

Bahnwinkel: γ

Anstellwinkel: α

$$\theta = \alpha + \gamma$$

- 1.8) Wie nennt man beim Kraftfahrzeug oder beim Zug, was beim Flugzeug induzierter Widerstand genannt wird? Welchen Wert hat der induzierter Widerstand eines Luftschiffes? Welcher induzierte Widerstand fällt an beim Transport von Öl in einer Pipeline?

Induzierter Widerstand ist der Widerstand durch Auftrieb. Auftrieb hält das Flugzeug in der Luft. Bodengebundene Fahrzeuge hält die Normalkraft, F_N . Beim Freischneiden (Technische Mechanik) wird das Fahrzeug von der Umgebund / vom Boden gelöst. An die Stelle des Bodens tritt die Normalkraft (<https://de.wikipedia.org/wiki/Normalkraft>). Nicht im Stand, aber bei Bewegung entsteht aus der Normalkraft der Rollwiderstand, $F_R = c_r \cdot F_N$ (<https://de.wikipedia.org/wiki/Rollwiderstand>). Bei Luftschiff sorgt das Traggas für Auftrieb. Daher hat das Luftschiff keinen induzierten Widerstand. In der Pipeline gibt es einen Strömungswiderstand, aber keinen induzierten Widerstand.

- 1.9) Ein Flugzeug hat eine Gleitzahl von 20. In welcher Höhe ist der Widerstand minimal?

$E = L/D = C_L/C_D$. Die Gleitzahl ist unabhängig von der Luftdichte, ρ oder der Flughöhe. Die Luftdichte, kürzt sich heraus beim Übergang auf C_L/C_D .

1.10) Welchen Wert hat der spezifische Kraftstoffverbrauch (TSFC) eines typischen Turbofantriebwerks? Welchen Wert hat der spezifische Kraftstoffverbrauch (PSFC) eines Turboproptriebwerks?

Turbofantriebwerk: 16 mg/(Ns)

Turboproptriebwerk: 0,075 mg/(Ws)

1.11) Nennen Sie die Gleichung für die Reichweite eines Flugzeugs, das durch eine Batterie versorgt wird! (Notfalls schnell herleiten!)

$$R = \frac{E_{bat} \cdot \eta_{ges}}{m \cdot g} \quad \text{oder} \quad R = \frac{m_{bat} \cdot e_m \cdot \eta_p \cdot \eta_{elec} \cdot E}{m_{MTO} \cdot g}$$

Gesamtwirkungsgrad aus Propellerwirkungsgrad und elektrischem Wirkungsgrad: $\eta_{ges} = \eta_p \cdot \eta_{elec}$, $e_m = E_{bat} / m$.

1.12) Welche spezifische Energie (Wh/kg) kann heute im Flugzeugentwurf für eine Batterie angenommen werden?

250 Wh/kg

1.13) Wie kann man die spezifische Reichweite (Specific Air Range, SAR) in jedem Moment während eines Fluges mit den Parametern aus dem Cockpit errechnen?

$$SAR = V/Q$$

Geschwindigkeit: V [m/s]

Fuel Flow: Q [kg/s]

1.14) Was versteht man bei Start und Landung unter Hindernishöhe (screen height) und Transitionshöhe (transition height)?

Die Startstrecke ist bis zum Überfliegen eines Hindernisses definiert:

CS-23: 50 ft, CS-25: 35 ft.

Die Landestrecke beginnt beim Überfliegen eines Hindernisses (CS-23 und CS-25: 50 ft).

Beim Start ist die Transitionshöhe die Höhe beim Übergang vom Abflugbogen zum geraden Steigflug. Bei der Landung ist die Transitionshöhe die Höhe beim Übergang vom geraden Sinkflug zum Abfangbogen. Dies ist nicht zu verwechseln mit der Übergangshöhe, die in der Praxis beim Steig- und Sinkflug wichtig ist (<https://de.wikipedia.org/wiki/Übergangshöhe>).

1.15) Wie wird die Sicherheitslandstrecke aus der Landestrecke berechnet beim Jet und Prop?

Die Sicherheitslandstrecke ergibt sich aus der Landestrecke mit einem Sicherheitsfaktor. Dieser beträgt

=> beim Jet: $1/0,6 = 1,667$,

=> beim Prop: $1/0,7 = 1,429$.

1.16) Was ist die Schüttelgrenze (buffet onset boundary)?

Bei niedrigen Geschwindigkeiten ergibt sich die Strömungsablösung vom Flügel bei hohen Anstellwinkeln und niedrigen Geschwindigkeiten. Bei höheren Machzahlen ergibt sich die Strömungsablösung vom Flügeln durch Verdichtungsstöße. Mit Schüttelgrenze ist die Geschwindigkeitsgrenze gemeint nach deren Überschreiten sich der Luftstrom vom Flügel durch

Verdichtungsstöße ablöst, was zu spürbaren Vibrationen (Schütteln, englisch: buffet) führt.

1.17) Am Höhenleitwerk eines Airbus A320 fällt auf, dass die Oberseite recht flach ist, während die Unterseite eine deutliche Wölbung nach außen zeigt. Warum mag das so sein?

Das Höhenleitwerk produziert Abtrieb. Das erklärt den Einbau einer üblich profilierten Fläche auf dem Kopf.

1.18) Wie kann ein Nurflügler gebaut werden, sodass statische Längsstabilität erreicht wird? (3 Vorschläge!)

Ein Nurflügler erhält statische Längsstabilität durch die Verwendung eines S-Schlag-Profils, durch nach oben ausgeschlagene Steuerflächen an der Hinterkante des Flügels, oder durch einen rückwärts gepfeilten Flügel mit negativer Schränkung (mehr Auftrieb innen als außen).

1.19) Sie sollen eine neue Version eines Passagierflugzeuges bauen, mit deutlich verkürztem Rumpf. Was ist hinsichtlich der Leitwerksgröße zu beachten?

Wenn der Rumpf kürzer wird, dann verkürzt sich der Hebelarm zum Leitwerk. Das muss mit einem größeren Leitwerk ausgeglichen werden.

1.20) Wir haben heute 20000 Passagierflugzeuge im Bestand. In den nächsten 20 Jahren kommen 40000 hinzu, die 20 % weniger verbrauchen. Von den neuen 40000 Flugzeugen sind 50 % Ersatz für die derzeitigen Flugzeuge und 50 % für das Luftverkehrswachstum. Um wie viel Prozent ist der CO₂-Ausstoß gestiegen (oder gesunken) nach Ablauf dieser 20 Jahre?

Der alte CO₂-Ausstoß beträgt 100 % (Referenzwert). In den 20 Jahren werden alle alten Flugzeuge durch neue Flugzeug ersetzt. Statt der alten 20000 Flugzeuge haben die neuen Flugzeuge nur noch 80 % CO₂-Ausstoß. Hinzu kommen weitere 20000 Flugzeuge mit 80 % CO₂-Ausstoß. Zusammen sind das 160 % CO₂-Ausstoß oder 60% mehr als heute.

Anmerkung: Die Zahlen sind eine Vereinfachung der Zahlen aus dem Airbus Global Market Forecast (2022-2041)

<https://www.airbus.com/en/products-services/commercial-aircraft/market/global-market-forecast>

In zwei Vorträgen von Airbus wurde hingegen erklärt, dass der CO₂-Ausstoß sinken würde:

03.11.2022: Symposium "Nachhaltige Luftfahrt" (VDI, Hamburg)

21.11.2022: "Der Weg zur nachhaltigen Luftfahrt - von SAF zu Wasserstoff" (DGLR, Braunschweig)

Fragen zum Labor

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

Es wird mit einem Kurs im rechten Winkel über die Geländelinien geflogen und die Zeit für den Hin- und den Rückflug gemessen. Ein Versatz durch Wind entlang der Geländelinien bleibt ohne Einfluß auf das Messergebnis. Der Einfluß von Gegen- bzw. Rückenwind wird durch die Mittelung der Zeiten aus Hin- und Rückflug kompensiert. Die wahre Geschwindigkeit ergibt sich aus

$v = s/t$. Die wahre Geschwindigkeit wird auf kalibrierte Geschwindigkeit umgerechnet und mit der angezeigten Geschwindigkeit verglichen. Die Differenz ist der erforderliche Korrekturwert.

1.22) Im Flug wird am Steuerhorn eine Handkraft gemessen (ziehen am Steuerhorn über eine Federwaage). Wie kann diese Kraft in das Moment an Höhenruder umgerechnet werden?

Am Boden kann ein Übersetzungsverhältnis der Höhesteuering bestimmt werden: $\Delta s_P / \delta$. Damit kann das Scharniermoment (hinge moment), M_H am Höhenruder ausgerechnet werden: $M_H = F_P \cdot \Delta s_P / \delta$.

1.23) Im Flugversuch wird der Gleitwinkel bestimmt. Wie kann daraus die Gleitzahl und der Widerstandsbeiwert ermittelt werden?

Die Gleitzahl, E wird aus dem Gleitwinkel γ berechnet mit $E = -1/\tan(\gamma)$ berechnet. Das Flugzeuggewicht entspricht dem Auftrieb. Aus dem Auftrieb wird der Auftriebsbeiwert, C_L ermittelt. $E = C_L / C_D$. Damit $C_D = C_L / E$.

1.24) Was versteht man unter "Schiebeflug"?

Ein Flugzeug "schiebt", wenn es nicht nur nach vorn fliegt, sondern auch zur Seite. Die Strömung kommt dem Flugzeug dann von schräg vorn mit einem Schiebewinkel entgegen. Wenn die Strömung von rechts kommt, dann ist der Schiebewinkel positiv. Erreicht wird ein Schiebeflug dadurch, dass das Flugzeug mit einem Hängelwinkel (Rollwinkel) fliegt. Wenn die rechte Fläche hängt, dann wird das Flugzeug nach rechts versetzt. Die hängende Fläche würde einen Kurvenflug nach rechts ergeben. Dem wird mit Seitenruder links entgegen gewirkt. Der Schiebeflug erfordert also "gekreuzte Ruder". Querruder rechts und Seitenruder links für positiven Schiebewinkel (oder anders herum).

1.25) Was ist die Phygoide? Nach wie viel Perioden ist diese Schwingung in etwa ausgeklungen?

Die Phygoide ist eine "achterbahnähnliche" Bewegung. Beim Auf und Ab kommt es zum Austausch von potentieller und kinetischer Energie. Der Anstellwinkel ist dabei fast konstant. Es gibt aber eine Änderung des Nicklagewinkels durch eine Änderung des Bahnwinkels. Die Bewegung hat die Form einer gedämpften Sinuskurve. Ein Ausschwingen in kleinen Motorflugzeugen erfolgt nach etwa 6 bis 10 Perioden.

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

Dutch Roll (deutsch: Taumelschwingung) ist eine kombinierte Gier-Roll-Schwingung. Die Bewegung lässt sich am besten beobachten durch einen Blick aus dem Flugzeug auf die Flügelspitze, die gegenüber dem Horizont einen Kreis (oder allgemeiner eine Ellipse) beschreibt. Ein Ausschwingen in kleinen Motorflugzeugen erfolgt nach ein bis 3 Perioden.

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

Ein Lastvielfaches von Null wird im Parabelflug erreicht.

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

Ein Lastvielfaches von konstant 2g für beliebig lange Zeit wird im koordinierten Kurvenflug mit einem Hängewinkel von 60° geflogen. Auch im Looping werden höhere Lastvielfache erreicht, die aber nicht konstant sind. Daher ist der Looping kein geeignetes Manöver, um konstante Lastvielfache zu erfliegen.

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

Mit der Sequenz wird das Inertialsystem der A320 gestartet. Studierende an der HAW Hamburg erfahren das im A320-Flugzeugsystemsimulator.

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

Zur Inbetriebnahme eines großen Passagierflugzeuges ist kein Schlüssel erforderlich. Studierende an der HAW Hamburg erfahren das im A320-Flugzeugsystemsimulator. Anders bei kleinen Motorflugzeugen. Dort ist ein Zündschlüssel wie beim Auto erforderlich.

Fragen zur Vortragsreihe

Entnehmen Sie die Antworten zu den Fragen 1.31) bis 1.35) bitte den Vortragsunterlagen zum Vortrag "Facing the Challenges of Aircraft Icing" vom 20.10.2022, <https://doi.org/10.5281/zenodo.7275215>

1.31) Was ist Klareis (glaze ice) im Unterschied zu Rauheis (rime ice)?

1.32) Was ist unterkühltes Wasser (supercooled water)?

1.33) Welchen Durchmesser haben Supercooled Large Droplets?

1.34) Welche Teile am Flugzeug sind hinsichtlich der Vereisung gefährdet?

1.35) Wie funktionieren pneumatische Enteisungsmatten (pneumatic deicing boots)?

Entnehmen Sie die Antworten zu den Fragen 1.36) bis 1.41) bitte den Vortragsunterlagen zum Vortrag "Wege zu weniger klimaschädlichem Luftverkehr - Politik in Deutschland" vom 03.11.2022, <https://doi.org/10.5281/zenodo.7325002>

1.36) Welchen Beitrag können Flugtaxis auf dem Weg zu einer klimafreundlicheren Luftfahrt leisten? *Begründen Sie Ihre Antwort!*

Flugtaxis können keinen Beitrag liefern zu einer klimafreundlichen Luftfahrt. Flugtaxis können keine Staus in den Städten vermeiden. Der Lärm kommt im wesentlichen vom Rotor und kann durch Elektromotore nicht wesentlich verringert werden. Fliegen erfordert mehr Energie als bodengebundener Verkehr. Mehr noch: Senkrechter Start ist energieintensiv. Batterieelektrischer Flug erfordert schwere wenig effiziente Fluggeräte. Aus dem Vortrag: "Aus Kapazitätsgründen und aus Gründen der Energieeffizienz halten wir deren Beitrag in Bezug einen größer angelegten Transport von Menschen und Waren in Deutschland für sehr begrenzt."

1.37) Angenommen im Jahr 2025 wird von Airbus ein Wasserstoffflugzeug als Ersatz der A320 angeboten. Welchen Effekt hätte das auf das CO₂-freie Fliegen im Jahr 2050? Gehen Sie in Ihrer Antwort auf die Erneuerung der Weltflotte der Passagierflugzeuge ein!

Flugzeuge haben eine Lebenszeit von bis zu 30 Jahren. Gehen wir hier von (für den Austausch günstigen) 25 Jahren aus. Es könnten dann alle alten Flugzeuge der A320-Flotte bis 2050 durch neue Wasserstoffflugzeug ersetzt werden. Auch alle neuen A320 wären dann Wasserstoffflugzeuge. Allerdings fallen die Hälfte der Emissionen auf Langstrecke an. Airbus ist auf der Kurz-/Mittelstrecke auch nicht der alleinige Anbieter (Marktanteil ca. 50%). Es können also mit einem Wasserstoffflugzeug als Ersatz der A320 in 2025 nur rund ein Viertel der CO₂-Emissionen reduziert werden. Das Flugzeug kommt aber nicht 2025, sondern ist für 2035 angekündigt. Bei einer (üblichen) Programmverschiebung bis 2037 oder 2038 könnte das Wasserstoffflugzeug dann noch 1/8 der Emissionen reduzieren. Nicht betrachtet sind die Nicht-CO₂-Effekte, die auch vom Wasserstoffflugzeug ausgehen. Nehmen wir an, dass durch das Wasserstoffflugzeug die Hälfte der Klimawirkung reduziert werden kann, dann wäre der Effekt des Wasserstoffflugzeugs noch 1/16 der heutigen Klimawirkung. Airbus prognostiziert aber eine Verdoppelung der Passagierflugzeug in dem Zeitraum. Das Wasserstoffflugzeug hätte dann praktisch kaum sichtbare Auswirkungen auf die Steigerung der Emissionen um 60 % (siehe Aufgabe 20). Aus dem Vortrag: "Selbst, wenn solche Flugzeuge zum angekündigten Zeitpunkt tatsächlich zur Verfügung stehen sollten, dauert die Flottenerneuerung noch Jahrzehnte. Zudem zeichnet sich ab, dass sich Wasserstoffflugzeuge wegen der großen und schweren Tanks nicht für den Einsatz im Langstreckenbereich eignen. Diese Distanzen - wie gesagt - sind derzeit für die Hälfte der europäischen Luftverkehrsemissionen verantwortlich."

1.38) Welchen Vorteil haben PtL-Treibstoffe gegenüber Biokraftstoffen?

PtL-Treibstoffe vermeiden gegenüber Biokraftstoffen die Diskussion "Teller oder Tank", führen nicht zur Entwaldung und konkurrieren nicht um Wasser in den Anbauregionen.

1.39) Wie viel Prozent des "grünen Stroms", der in Deutschland derzeit produziert wird, müsste man einsetzen, um theoretisch den gesamten deutschen Luftverkehr mit PtL zu versorgen?

100 %. Aus dem Vortrag: "Um theoretisch den gesamten deutschen Luftverkehr mit PtL aus grünem Strom versorgen zu könnten, müssten wir sämtlichen grünen Strom einsetzen, der derzeit in Deutschland produziert wird."

1.40) Der Bundesverband der Deutschen Luftverkehrswirtschaft (BDL) bewirbt das "3-Liter-Flugzeug". Wie ist die Umweltwirkung so eines "3-Liter-Flugzeugs" im Vergleich zum Auto?

Ich beantworte das mit einem Video und dem Text darunter: <https://youtu.be/-sgwd08n8m8>.

Aus dem Vortrag: "Für die Verbesserung der Energieeffizienz gibt der BDL (Bundesverband der Deutschen Luftverkehrswirtschaft) gerne den Kerosinverbrauch pro Passagierkilometer an. Der BDL wirbt mit einem Verbrauch von 3,58 Litern auf 100 Kilometer. Die Botschaft lautet sinngemäß: Mit dem Flugzeug bist du sparsamer unterwegs, als mit dem Auto. - Dabei bleibt unberücksichtigt, dass im Auto bis zu fünf Personen Platz finden. Weiter sind die Nicht-CO-Effekte des Fliegens dabei ebenfalls nicht berücksichtigt."

1.41) Sie recherchieren hinsichtlich eines Pauschalurlaubs in die Dominikanische Republik. Sie finden heraus, dass das preislich durchaus interessant ist im Vergleich mit einem Urlaub in Deutschland – trotz des langen Fluges. Woran mag das liegen?

Ein "Pauschalurlaub" ist einer bei dem es einen Gesamtpreis gibt für Flug, Übernachtung, Verpflegung und den Transfer vom Flughafen zum Hotel. Kosten für Übernachtung, Verpflegung und Transfer hängen stark vom Gehalt der Dienstleistenden ab. Die Gehälter sind in der Dominikanische Republik deutlich geringer als in Deutschland. Das reduziert diesen Kostenanteil beim Pauschalurlaub in der Dominikanischen Republik und kompensiert (zum Teil) die höheren Kraftstoffkosten durch den längeren Flug. Die Emissionen sind beim Langstreckenflug höher als bei einer Anreise in Deutschland. Für den Schaden an der Atmosphäre muss der Reisende aber nicht zahlen. Aus dem Vortrag: "Der weitaus größte Klimaschaden beim Fliegen entsteht durch die sehr viel größeren Distanzen, die durch die Flugreisen zurückgelegt werden. Man kann es auch kritischer formulieren: Die sehr viel größeren Distanzen, zu denen billige Tickets verleiten." (Im Vortrag wird nicht auf die Gehälter eingegangen. Bei der Frage war ein Mitdenken gefordert.)

Entnehmen Sie die Antworten zu den Fragen 1.42) bis 1.44) bitte den Vortragsunterlagen zum Vortrag "Climate Optimized Flight Routes – The Path from Research to Operations" vom 24.11.2022, <https://doi.org/10.5281/zenodo.7396324>

1.42) Welchen Anteil haben die Kondensstreifen und Kondensstreifenzirren an der Erderwärmung durch Flugzeuge (bezogen auf den Strahlungsantrieb, radiative forcing)?

Aus dem Vortrag: "Contrail-Cirrus (57%) has the largest contribution regarding ERF"

1.43) Was sind *ice supersaturated regions*, ISSR?

Aus dem Vortrag: "Persistent Contrails occur by flights through ISSR"

1.44) Durch welchen Ansatz will die Flugsicherung wärmende Kondensstreifen vermeiden?

Aus dem Vortrag: "Altitude change +/- 1000 ft above/below limits of ISSR"

Sie können die Antworten zu den Fragen 1.45) bis 1.48) bereits der Ankündigung zum Vortrag "Letzte Generation – Zur Bedeutung von Flughafenblockaden in der Klimadebatte" vom 12.01.2023 entnehmen: <http://Aerolectures.de>

1.45) Was ist das Ziel der Gruppe "Letzte Generation"?

Die "Letzte Generation" versteht sich als "die letzte Generation, die den Klimakollaps und damit die Zerstörung unserer Welt, wie wir sie kennen, noch aufhalten kann". Sie will ein "Feueralarm" sein. Es geht nicht darum zu gefallen, sondern darum, eine Botschaft unüberhörbar zu übermitteln: "Reduktion der Treibhausgasemissionen!". Die Regierung soll das Grundgesetz Art 20a ernst nehmen und die Politik danach ausrichten.

1.46) Mit welchen konkreten Forderungen wurden die Flughafenblockaden verknüpft?

9-EUR-Ticket, Tempolimit 100 km/h auf Autobahnen.

1.47) Die "Letzte Generation" verweist auf den "Bürgerrat Klima". Welche Forderungen sind in dessen Bürgergutachten hinsichtlich der Luftfahrt aufgenommen? (3 Forderungen!)

- a) Erhöhung der Flugkosten durch das Erheben bzw. Erhöhen von Steuern auf Flüge, um Fliegen weniger attraktiv zu machen und Flüge zu reduzieren.
- b) Ambitioniertere Umstellung der im Flugverkehr genutzten Kraftstoffe auf synthetische Kraftstoffe.
- c) Vermeidung von Flügen, insbesondere von Kurzstreckenflügen.

Anmerkung: Ein Verbund anderer Umweltgruppen formuliert in der "Make Them Pay" Kampagne weitere Forderungen:

- i) Verbot von Privatjets,
- ii) Besteuerung von Vielflieger*innen,
- iii) Einführung des Verursacherprinzips.

1.48) Was besagt Artikel 20a des Grundgesetzes?

"Der Staat schützt auch in Verantwortung für die künftigen Generationen die natürlichen Lebensgrundlagen und die Tiere im Rahmen der verfassungsmäßigen Ordnung durch die Gesetzgebung und nach Maßgabe von Gesetz und Recht durch die vollziehende Gewalt und die Rechtsprechung."

2. Klausurteil (mit Hilfsmitteln - 120 Minuten)

Aufgabe 2.1

Es haben sich drei kleine Aufgaben zur Atmosphäre angesammelt!

- Die Temperatur beträgt in Meereshöhe 35 °C. Der Bezugsdruck im Höhenmesser wird mit dem Einstellknopf von 1013 hPa auf 1023 hPa verstellt. Um welche Höhe (in ft) ändert sich dabei die Anzeige am Höhenmesser (ausgedrückt durch die Zeigerstellung)? *Bitte auch die Richtung der Änderung angeben!*
- In einer Druckkabine beträgt die Temperatur 25 °C. Die Kabinenhöhe wird mit 8000 ft angegeben. Welcher Druck liegt vor? Berechnen Sie die Dichte der Luft! Berechnen Sie die Dichtehöhe!
- Die Temperatur beträgt in Meereshöhe 0 °C. QNH: 1013 hPa. Eine Bergspitze (gemäß Karte 10000 ft) befindet sich genau in Höhe des Flugzeugs. Im kleinen Fenster des Höhenmessers ist 1013 hPa eingestellt. Welche Höhe zeigt der Höhenmesser an?

Aufgabe 2.2

Im Fenster des Höhenmessers ist 1013 hPa eingestellt. Es werden 40000 ft abgelesen. Der gut kalibrierte Fahrtmesser zeigt 240 kt.

- Ermitteln Sie den Wert der Kompressibilitätskorrektur ΔV_C . Berechnen Sie die wahre Geschwindigkeit!
- Berechnen Sie aus der wahren Geschwindigkeit nach a) die Machzahl!
- Lesen Sie die Machzahl aus dem Diagramm "Compressibility correction" direkt ab! Gibt es Abweichungen? Wenn ja, welcher Betrag?

Aufgabe 2.3

Ein Passagierflugzeug wendet vier "Tricks" an, um von der hohen Reiseflugmachzahl, $M_{CR} = 0,82$ auf eine "erträglich" langsame Anfluggeschwindigkeit, V_A zu kommen:

- Im Reiseflug wird mit dem Auftriebsbeiwert für minimalen Widerstand geflogen ($C_{L,md} = 0,6$). Im Anflug wird jedoch ein höherer Auftriebsbeiwert genutzt, weil mit $V_A = 1,3 V_S$ geflogen wird. Wir nehmen an, dass ohne Hochauftriebssysteme $C_{L,max, clean} = 1,2$ möglich ist.
- Das Hochauftriebssystem erhöht den maximalen Auftriebsbeiwert um $\Delta C_{L,max} = 2,0$.
- Der Reiseflug findet nicht in Meereshöhe statt, sondern in 38000 ft.
- Die Masse des Flugzeugs ist bei der Landung geringer als im Reiseflug. Das bleibt hier jedoch unberücksichtigt.
 - Berechnen Sie die Reisefluggeschwindigkeit in 38000 ft in kt!
Berechnen Sie die Anfluggeschwindigkeit in Meereshöhe in kt!
 - Welche praktischen Gegebenheiten am Boden begrenzen die Anfluggeschwindigkeit? Warum fliegen Passagierflugzeuge also so hoch?

Aufgabe 2.4

Die Vorlesung hat aufgezeigt, wie eine Polare in der Form

$$C_D = C_{D0} + \Delta C_{DW} + \frac{C_L^2}{\pi A e}$$

aus den Geometrieparametern eines Flugzeugs berechnet werden kann. Hier wird nur mit Einzelaufgaben auf Teilaspekte der Rechnung eingegangen. Das nicht weiter bestimmte (generische) Flugzeug hat einen Pfeilwinkel des Flügels von 30° . Die Reiseflugmachzahl (Auslegungsmachzahl) beträgt 0,82. Dies ist auch die Machzahl des Widerstandsanstiegs.

- Wie lautet die einfachste Gleichung zur Berechnung von C_{D0} ?
- Berechnen Sie die kritische Machzahl für das Flugzeug.
- Berechnen Sie mit b) den Wellenwiderstandsbeiwert für eine Machzahl von 0,85!
- $k_{e,M}$ dominiert den Wert des Oswald-Faktors, e bei hohen Machzahlen. Berechnen Sie $k_{e,M}$ für eine Machzahl von 0,85! *Hinweis: Die Rechnung geht über M_0 , a_e , $k_{e,M}$.*

Aufgabe 2.5

Ein viersitziges Propellerflugzeug hat eine Wellenleistung in Meereshöhe von 150 kW und kann im Reiseflug nur mit 75 % davon kontinuierlich belastet werden. Der Propellerwirkungsgrad beträgt im Reiseflug 0,8. Die Geschwindigkeitspolare hat die bekannte Form $D = A V^2 + B V^{-2}$. Dabei ist $A = 0,3 \text{ N s}^2/\text{m}^2$ und $B = 800000 \text{ Nm}^2/\text{s}^2$. Berechnen Sie die Höchstgeschwindigkeit des Flugzeugs in kt a) mit Näherungslösung, b) mit einer exakten Lösung.

Aufgabe 2.6

Für einen Jet wurde die absolute Gipfelhöhe abgeschätzt: 40000 ft. Der Jet hat in Meereshöhe eine Steiggeschwindigkeit von 5000 ft/min. Wie lange dauert es etwa, bis von dort die Dienstgipfelhöhe erreicht ist? *Hinweis: Schreiben Sie nicht "8 Minuten" als Antwort. Das ist falsch!*

Aufgabe 2.7

Gegeben ist das Nutzlast-Reichweitendiagramm einer Embraer 190 (Anhang). Berechnen Sie aus dem Diagramm den Kraftstoffverbrauch bei *max. cruise speed* bezogen auf 100 km und bezogen auf die 108 Passagiere.

Aufgabe 2.8

Ein kleines Propellerflugzeug (C172) wird nach CS-23 zugelassen für ein maximales positives Lastvielfaches von 3,8. Die Überziehgeschwindigkeit (Äquivalentgeschwindigkeit) beträgt 51 kt. Flug in Meereshöhe, $U_E = 12,24 \text{ m/s}$, $C_{L\alpha} = 2\pi$, $m = 1089 \text{ kg}$, $S = 16,2 \text{ m}^2$.

- Berechnen Sie die Geschwindigkeit V_A (Manövergeschwindigkeit, maneuvering speed) aus dem Manöverlastdiagramm (in kt)!
- Berechnen Sie die Geschwindigkeit V_B (Böengeschwindigkeit, design speed for maximum gust intensity) aus dem Böenlastdiagramm (in kt)!

Klausur FM, WS 22/23

Punkte

Aufgabe 2.1

a)				1
	27.3 ft/hPa*(1023-1013)hPa = 273 ft		Richtung: Zu höheren Werten	
b)				
hp = 8000 ft	752.62 hPa	ISA-Tabelle		1
L	1.9812E-03 K/ft			
rho0	1.225 kg/m³			
T0	288.15 K			
R	287.053 J/(kg K)			
rho=p/(RT)	0.8794 kg/m³			2
h_rho	10898 ft	= T0/L*(1-(rho/rho0)^(1/4.25588))		2
c)				
hp	10549 ft	= 10000 ft * T0 / (T0 - 15 K)		2

Aufgabe 2.2

V_I = V_C = 240 kt				
h_p = 40000 ft => Delta_V_C = 14 kt				1
Wurzel(sigma)	0.49615	ISA-Tabelle		
V_E =	226.0 kt			
V	455.5 kt	= V_E/wurzel_sigma		3
M = V/a	0.794	M = V/a		1
abgelesen:	0.780	leichte Abweichung, sollte eigentlich funktionieren		1

Aufgabe 2.3

a)				
Schallgeschwindigkeit in 38000 ft:	573.57 kt	ISA		1
rho/rho_0 = sigma in 38000 ft:	0.27101	ISA		1
MCR	0.82			1
VCR	470.3 kt			
VS/VCR	0.2254	= WURZEL(sigma*0.6/3.2)		1
VS	106.0 kt			
VA	137.8 kt	= 1.3 VS		1
b)	Landebahnlänge			1

Aufgabe 2.4

phi_deg	30			
phi	0.52359878			
a)	$C_{D,0} = \frac{\pi \cdot A \cdot e}{4 \cdot E_{max}^2}$			1
b)				
MCR	0.82	Auslegung		
MDD	0.82	Widerstandsanstieg (20 drag counts)		
M	0.85	aktuell geflogen		
A	0.001272	generischer Parameter, wenn Flugzeug unbekannt		

B	3.477	generischer Parameter, wenn Flugzeug unbekannt	
Mcrit	0.6124	$= B * MDD / (\text{ARCTAN}(0.002 / (A * \text{COS}(\text{phi})^3)) + B)$	2
c)			
DeltaC_DW	0.003670	$= A * \text{TAN}(B * M / \text{Mcrit} - B) * \text{COS}(\text{phi})^3$	2
d)			
be	10.82	generischer Parameter, wenn Flugzeug unbekannt	
ae	-0.00055317	$= -1 / ((\text{MCR} + 0.08) / 0.3 - 1)^{\text{be}}$	2
kem	0.6099	$= \text{ae} * (M / 0.3 - 1)^{\text{be} + 1}$	2

Aufgabe 2.5

P_S	150000 W		
P_T	90000 W		1
AA	0.3 Ns ² /m ²	Siehe: Flugmechanik SS 2011	
BB	800000 Nm ² /s ²	Siehe: Flugmechanik SS 2011	

a)			
V	66.9 m/s	$= (P_T / AA)^{1/3}$	
V	130 kt		2

b)			
Residual	-4.3838E-10 => null	$= P_T - AA * V^3 - BB / V$	mit Solver!
V	63.7 m/s	Zielzelle für den Solver	
V	124 kt		3

Aufgabe 2.6

habs	40000 ft		
V_V0	5000 ft/min		
Dienstgipfelhöhe bei 500 ft/min Reststeigen!			
t	18.42 min	$= -\text{habs} / V_{V0} * \text{LN}(500 / 5000)$	2
t	18 min		
und	25 s		

Aufgabe 2.7

Embraer 190 max cruise speed fuel consumption			3
a)			
Slope			
max payload	12900 kg		
paylaod max R	6800 kg		
Differenz	6100 kg		
Max range	2360 NM		
R max payload	980 NM		
Differenz	1380 NM		
Differenz	2556 km		
Verbrauch	2.21 kg/100km/pax		

b) Nicht gefragt in der Klausur!

MTOM	47790 kg
MZFM	40800 kg
Differenz	6990 kg
R max payload	1815 km
Verbrauch	3.57 kg/100km/pax

Aufgabe 2.8

VS	51.00 kt
VS_ms	26.24 m/s
nMAX	3.8

VSN = VA	99.4 kt	= VS*WURZEL(nMAX)
----------	---------	-------------------

2

g	9.81 m/s ²
---	-----------------------

Ude	20.12 m/s	Rechnung in der Klausur nicht erforderlich
m_MTO	1089 kg	U_E ist gegeben!

S_W	16.2 m ²
-----	---------------------

b_W	11 m
-----	------

c_MAC	1.47 m	= S_W/b_W
-------	--------	-----------

rho	1.225 kg/m ³
-----	-------------------------

C_L,alpha	6.283 rad
-----------	-----------

mu	11.86	= 2*m_MTO/S_W/rho/c_MAC/C_L_alpha
----	-------	-----------------------------------

k	0.608	= 0.88*mu/(5.3+mu)
---	-------	--------------------

U_E	12.24 m/s
-----	-----------

AAA	0.00145272	= 1/VS_ms ²
-----	------------	------------------------

BBB	-0.07140345	= -rho*U_E*C_L_alpha/(2*m_MTO*g/S_W)
-----	-------------	--------------------------------------

CCC	-1	= -1
-----	----	------

VB	60.52 m/s	= (-BBB+WURZEL(BBB ² -4*AAA*CCC))/(2*AAA)
----	-----------	--

VB	117.7 kt
----	----------

5

https://www.edqe.de/wp-content/uploads/2019/06/FHB_Cessna_172P.pdf

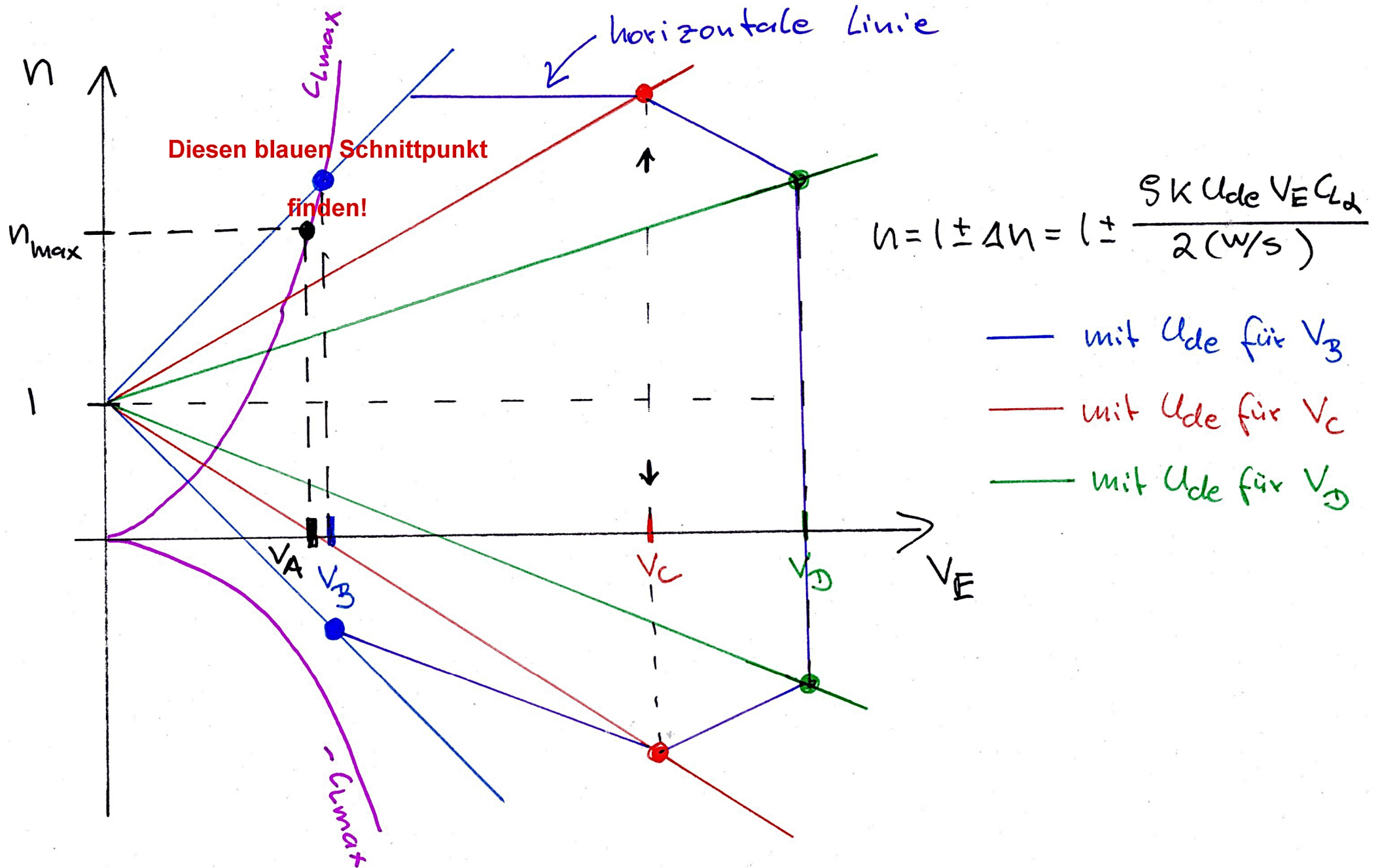
Seite 20:

VA: 97 kt S.20

VB: 127 kt Anfang gelber Bogen: "In diesem Geschw.bereich nur bei ruhiger Luft zu fliegen" (S. 21)

Böenlastdiagramm

gezeichnet mit Hilfslinien



Aufgabe 2.8, b

- V_B - Gust Line:

$$\eta = 1 + \frac{\rho U_E \cdot V_E \cdot C_{L\alpha}}{2 \frac{m g}{s}} \quad (1)$$

- Stall Line:

$$V_{Sn} = V_S \cdot \sqrt{\eta} \quad V_E = V_S \cdot \sqrt{\eta}$$

$$\eta = \left(\frac{V_E}{V_S} \right)^2 \quad (2)$$

- (1) = (2) (Schnittpunkt):

$$1 + \frac{\rho U_E \cdot V_E \cdot C_{L\alpha}}{2 \frac{m g}{s}} = \frac{1}{V_S^2} \cdot V_E^2$$

$$\underbrace{\frac{1}{V_S^2}}_a \cdot V_E^2 - \underbrace{\frac{\rho U_E C_{L\alpha}}{2 \frac{m g}{s}}}_{b} \cdot V_E - \underbrace{1}_c = 0$$

$$V_E = \frac{-b + \sqrt{b^2 - 4ac}}{2a}$$

↑

Dies ist die gesuchte Geschwindigkeit V_B als Äquivalentgeschwindigkeit