

Fragen zum Hubschrauber

- [01] Welche Form haben Rotorblätter? ¹
- [02] Welche Wirkung hat die Vergrößerung des Anstellwinkels der Hubschrauberblätter? ²
- [03] Warum darf man den Anstellwinkel der Rotorblätter nicht über 14° einstellen? ³
- [04] Warum sind die Rotorblätter in sich um ca. 8° verwunden, so dass der Anstellwinkel außen um 8° kleiner ist als innen? ⁴
- [05] Welche Funktion hat der Heckrotor? ⁵
- [06] Die Steiggeschwindigkeit eines Hubschraubers beträgt etwa 5 m/s bis 10 m/s.
Eigentlich müsste man erwarten, dass ein Hubschrauber eine bestimmte Energiestromstärke P_{SCHWEB} benötigt, um im Schwebeflug zu stehen. Wenn ein Hubschrauber nun aufsteigen will, muss er die dafür notwendige Lageenergie aufbringen – also erwartet man, dass $P_{AUF} > P_{SCHWEB}$
In der Realität gilt aber $P_{AUF} < P_{SCHWEB}$... d.h. für den Aufstieg benötigt man eine kleinere Energiestromstärke als für den Schwebeflug ... Wie ist das möglich? ⁶
- [07] Wie realisiert man bei einem Hubschrauber den Vorwärtsflug? ⁷ → siehe Bild 02
- [08] Wie fliegt der Hubschrauber einen Kurvenflug? ⁸
- [09] Welche Probleme ergeben sich beim Vorwärtsflug? ⁹
- [10] Erläutere die Funktion der Taumelscheibe ... siehe Bild 05
- [11] Welche Probleme entstehen, wenn man auf die schnell rotierende Drehachse mit Hauptrotor eine Kraft ausübt, die versucht, die Drehachse zu kippen ... z.B. durch Verstellen der Ebene der Taumelscheibe? ¹⁰

¹ ... Die Rotorblätter haben im Prinzip eine Tragflächenform ... und erzeugen den Auftrieb ähnlich wie eine Flugzeugtragfläche.

² ... Der Auftrieb an den Rotorblättern ist eine Funktion der Geschwindigkeit der Rotorblätter und eine Funktion des Anstellwinkels der Rotorblätter. Ein größerer Anstellwinkel führt zu einem größeren Auftrieb ... wie bei einer Flugzeugtragfläche

³ ... sonst würde die Strömung abreißen und die Rotorblätter würden keinen Auftrieb mehr erzeugen.

⁴ ... Die Geschwindigkeit der Rotorblätter ist außen viel größer als innen ... damit das Blatt gleichmäßig belastet wird, muss man den Anstellwinkel innen, an der Stelle, an der die Geschwindigkeit des Rotorblattabschnittes kleiner ist, vergrößern.

⁵ ... Der Motor wirkt mit einer Kraft (eigentlich mit einem Drehmoment) auf den Hauptrotor – die Gegenkraft (eigentlich das Gegendrehmoment) wirkt auf den Motor zurück ... Die Folge dieses Gegendrehmoments führt zu einer Rotation des Hubschraubers um seine Hochachse. Der Heckrotor sorgt für einen Gegendrehmoment, so dass der Hubschrauber in einer stabilen Lage stehen kann.

⁶ (a) ... Wenn der Hubschrauber nach oben steigt, dann wird der Massendurchsatz $\Delta m/\Delta t$ größer – also kann die vertikale Geschwindigkeit der Luft nach unten – die so genannte Strahlgeschwindigkeit – kleiner werden. Beim Flug nach oben haben wir die Verhältnisse wie beim Flugzeug, dass bei Gegenwind startet und deshalb schon bei einer kleineren Startgeschwindigkeit abheben kann. Für die Auftriebskraft der Rotorblätter gilt $F_A = dm/dt \cdot v_s$...

Für die Energiestromstärke gilt aber $P = dm/dt \cdot v_s^2$... d.h. eine reduzierte Strahlstromgeschwindigkeit macht sich „im Quadrat“ als Treibstoffeinsparung bemerkbar.

(b) ... Im Schwebeflug trifft ein Rotorblatt auf Luft, die sich schon nach unten bewegt ... das ist vergleichbar mit einem Flugzeug, das mit dem Wind startet ... Im Steigflug trifft das Rotorblatt aber auf Luft, die gewissermaßen noch in Ruhe ist – d.h. im Steigflug ist der Auftrieb damit größer als im Schwebeflug ... dieser Effekt reduziert die für einen Steigflug notwendige Energiestromstärke noch weiter.

⁷ Wenn man die Hochachse des Hubschraubers nach vorne kippt, kann man die Auftriebskraft der Rotorblätter in zwei Komponenten zerlegen – eine Vertikalkomponente gleicht die Schwerkraft aus – eine Horizontalkomponente beschleunigt den Hubschrauber in horizontaler Richtung. Das Kippen erreicht man mit der Taumelscheibe ... siehe Bild 05

Der Kippwinkel nach vorne beträgt maximal 10° ... und liefert 150 km/h Reisegeschwindigkeit ... Spezialhubschrauber erreichen Geschwindigkeiten bis 300 km/h

⁸ Mit dem Heckrotor kann man den Hubschrauber um seine Hochachse drehen ...

⁹ Die Anströmgeschwindigkeit der Rotorblätter in Vorwärtsrichtung – und damit der Auftrieb in dieser Blattstellung – ist größer als auf die Rotorblätter, die sich in die Rückwärtsrichtung bewegen. Diese Ungleichheit wird durch periodische Verstellung des Anstellwinkels ausgeglichen → siehe Taumelscheibe – Bild 05

¹⁰ Von einem Kreisel wissen wir, dass er einer Kippkraft auf seine Drehachse ausweicht ... diese Kraft wirkt senkrecht zur Drehachse und senkrecht zur Kraft, die den Kreisel zu kippen versucht. Der Hauptrotor wirkt wie ein Kreisel – und demzufolge treten ebenfalls Kippmomente auf, wenn man versucht, die Lage der Drehachse zu verändern. Auch diese Kräfte muss man durch Verstellen der Taumelscheibe kompensieren.

- [12] Warum ist die für einen Horizontalflug notwendige Energiestromstärke kleiner als beim Schwebeflug? ¹¹
- [13] Wie bremst ein Hubschrauber? ¹²
- [14] Wie muss ein Hubschrauberpilot reagieren, wenn der Motor ausfällt ... Was versteht man unter Autorotation? ¹³

Aufgabe 01

Für den Strahlstrom nach unten gilt $A_{\text{Strahlstrom}} = \frac{1}{2} A_{\text{Rotorfläche}}$

Zeige, dass folgende Gleichung gilt $\rightarrow \frac{\Delta m}{\Delta t} = \frac{1}{2} \rho \cdot v_S \cdot \pi \cdot R_0^2$

Ist die folgende Gleichung gültig? $\rightarrow m_{\text{Hubschrauber}} \cdot g = \frac{1}{2} \rho \cdot (v_S)^2 \cdot \pi \cdot R_0^2$

Ist die folgende Gleichung korrekt? $\rightarrow P = \frac{1}{2} \left(\frac{dm}{dt} \right) \cdot v_S^2$

Aufgabe 02

Ein Hubschrauber habe eine Masse von 5t, Rotorblätterradien von 10m und eine Luftdichte von 1,3kg/m³

Zeige, dass die Strahlgeschwindigkeit folgenden Wert hat: $v_S = \sqrt{\frac{2 \cdot m \cdot g}{\rho \cdot A}} \dots 16\text{m/s}$

Zeige, dass sich die notwendige Energiestromstärke für den Schwebeflug folgendermaßen ergibt:

$$P = \frac{1}{2} \cdot m \cdot g \cdot v_S \dots 400 \text{ kW}$$

Zeige, dass eine Rechnung mit einem Rotor-Radius von 5m eine notwendige Energiestromstärke von 800 kW liefert ... d.h. große Rotorblätter bei kleiner Strahlstromgeschwindigkeit sind „energiesparend“ ... ähnlich wie bei Düsentriebwerken, bei denen großer Massendurchsatz bei kleiner Strahlstromgeschwindigkeit bei großen Düsentriebwerksdurchmessern energie-günstig sind.

Wodurch sind die Rotordurchmesser begrenzt? ¹⁴

¹¹ ... (a) wie beim Steigflug ist der Massendurchsatz auch beim Vorwärtsflug höher ... also benötigt man eine kleinere Strahlgeschwindigkeit ... und (b) wie beim Steigflug treffen die Rotorblätter beim Horizontalflug auf Luftmassen, die noch nicht beschleunigt wurden ... gleichzeitig ist aber (c) beim Vorwärtsflug ein Luftwiderstand zu überwinden. Die Gewinne an Energiestromstärke im Vergleich zum Schwebeflug durch (a) und (b) ist größer als der zusätzlich notwendige Aufwand durch (c). Ein minimaler Treibstoffverbrauch ergibt sich bei den üblichen Hubschraubern bei 120 km/h.

¹² ... die Taumelscheibe wird so verstellt, dass der Auftrieb auf den Rotorblätter vorne größer ist als hinten, so dass der Hubschrauber nach hinten kippt ... die Nase des Hubschraubers angehoben wird ... also eine Vertikalkomponente nach hinten auftritt.

¹³ Die Rotorblätter werden ohne Antrieb durch den Luftwiderstand abgebremst ... der Pilot stellt die Rotorblätter auf einen negativen Anstellwinkel ... der Hubschrauber fällt nach unten ... die Luft, die nun von unten durch die Rotorblätter bei negativem Anstellwinkel nach oben strömt, lässt die Rotorblätter weiter rotieren ... der Hubschrauber fällt nun mit einer konstanten Fallgeschwindigkeit von 10 bis 20 m/s ... kurz vor dem Boden stellt der Pilot die Rotorblätter wieder auf positiven Anstellwinkel, so dass ein Auftriebskraft nach oben den Fall des Hubschraubers abbremst ... so dass er sanft aufsetzen kann ... diese Prozedur ist ab 140m Flughöhe möglich ... WENN der Pilot ein sehr guter Pilot ist!

¹⁴ Große Rotorblätter bekommen eventuell Stabilitätsprobleme ... evtl. Materialprobleme ... große Zentrifugalkräfte bei großen Rotorradien ... Die Geschwindigkeit am Rotorrand muss unterhalb der Schallgeschwindigkeit bleiben (im Regelfall kleiner als 250 m/s) ... sonst treten Schockwellen auf, die die Rotoren zerstören können. Bei R=5m muss die Drehfrequenz unter 220/min liegen.