

# Einzigartige Flugeigenschaften

**Der Hubschrauber kann senkrecht auf einer kleinen Fläche starten und landen, kann lange Zeit schweben – Fähigkeiten, die Starrflügler nur mit großem Aufwand und dann allenfalls unbefriedigend bieten. Aber es sind einige technische Kniffe nötig, Steuerung und Stabilisierung sind komplizierter als beim Flugzeug.**

Flugpionier Wilbur Wright hatte keine gute Meinung vom Hubschrauber, 1909 sagte er: „Der Hubschrauber vermag nur mit großer Anstrengung das zu tun, was ein Ballon ohne Mühe schafft, und er ist keinesfalls besser zum schnellen horizontalen Flug geeignet. Wenn sein Triebwerk ausfällt, stürzt er mit tödlicher Wucht ab, denn er kann weder schweben wie ein Ballon, noch wie ein Flugzeug gleiten. Hubschrauber sind viel leichter zu konstruieren als Flugzeuge, ist die Konstruktion jedoch gelungen, ist sie nutzlos“. Aus heutiger Sicht ist das eine grobe Fehleinschätzung, dennoch hat Wright in seinem – vernichtenden – Urteil einige wichtige Aspekte angesprochen. Der Ballon ist natürlich kein Konkurrent (mehr) für den Hubschrauber. Aber auch beim Vergleich Hubschrauber-Flugzeug sollte man nicht von „Konkurrenten“ sprechen, beide haben Vor- und Nachteile, die sie für spezielle Aufgaben geeignet machen, für andere eben nicht. So bietet der Hubschrauber einzigartige Fähigkeiten wie senkrecht Starten und Landen oder Schweben, er ist dem Flugzeug in Sachen Geschwindigkeit und Reichweite aber prinzipiell immer unterlegen. Zwitter wie die Bell/Boeing Osprey sollen die guten Eigenschaften von Flugzeug und Hubschrauber in einem Modell vereinigen.

Der Hubschrauber unterscheidet sich in vielem grundsätzlich vom Starrflügler – vor allem in der Art und Weise, wie die zum Fliegen notwendigen Aufgaben erfüllt werden. Während beim Flugzeug für die Auftriebserzeugung (Tragflügel), den Vortrieb (Antrieb) oder die Steuerung und Stabilisierung (Klappensysteme) verschiedene und für diesen Zweck optimierte Komponenten zur Verfügung stehen, müssen diese Aufgaben beim Hubschrauber fast ausschließlich vom Hauptrotor erledigt werden, der entsprechend vielseitig und komplex ausgelegt werden muß.

## Rotorkopf-Bauweisen

Die Ingenieure haben sich einige Möglichkeiten ausgedacht, wie Rotorköpfe gebaut werden können. Im Rotorkopf werden die Rotorblätter mit der Rotorwelle verbunden – eine Übersicht der gängigsten Typen:

### VOLL-GELENKIGER ROTOR

Der Blattanschluß wird mit Schlag-, Schwenk- und Drehgelenk realisiert, das Blatt ist also gegenüber der Rotorwelle um alle drei Achsen drehbar. Das erscheint auf den ersten Blick ein gewagtes Unterfangen zu sein – immerhin „hängt“ der Hubschrauber am Rotor. Allerdings ist die Fliehkraft die mit Abstand größte am Rotorblatt angreifende Kraft, und die wirkt nach außen. Das Blatt behält also auch im Flug trotz der erzeugten Auftriebskräfte seine relativ waagerechte Lage.

Das Schlaggelenk ermöglicht Blattbewegungen senkrecht zur Rotorebene, das Schwenkgelenk in der Rotorebene. Beide dienen der Reduzierung von Belastungen am Rotorkopf und dem Ausgleich von unsymmetrischen Lastzuständen an den Blättern (siehe Kasten „Schlagbewegung“) – Gelenke können keine Momente übertragen. Das war der Hauptgrund für die Einführung von Schlag- und Schwenkgelenk. Mit den Drehgelenken kann über die Taumelscheibe der Blatteinstellwinkel verändert und damit der effektive Anstellwinkel  $\alpha$  beeinflusst werden.

### HALBSTARRER ROTOR

Bei dem bei Zweiblatt-Rotoren verwendeten halbstarren Modell fehlt das Schwenkgelenk, Schwenkbewegungen werden über die Torsion der Rotorwelle erreicht. Die beiden Blätter sind starr miteinander verbunden und beweglich am Rotorkopf aufgehängt. Bewegt sich ein Blatt nach oben, geht das andere nach unten.

### GELENKLOSER ROTOR

Beim gelenklosen Rotor werden Schlag- und Schwenkgelenke durch flexible Blattanschlüsse ersetzt, Schlag- und Schwenkbewegungen also über Biegung der inneren Blätter realisiert. Drehgelenke mit Taumelscheibe sind weiterhin vorhanden.

### LAGERLOSER ROTOR

Beim lagerlosen Rotor entfällt neben Schlag- und Schwenkgelenk auch das Drehgelenk. Die über die Taumelscheibe gesteuerte Drehung der Blätter geschieht über die Torsion der flexiblen Blattanschlüsse.

Die Umsetzung der beiden letztgenannten Bauweisen wurde erst durch die Entwicklung flexibler und gleichzeitig dauerfester Werkstoffe möglich. Die gelenk- und lagerlosen Rotoren sind deutlich leichter als voll-gelenkige, bestehen aus sehr viel weniger Bauteilen, sind wartungsärmer und erzeugen merklich weniger Widerstand. Zudem bieten sie bessere Flugeigenschaften, da sie direkter auf Steuereingaben reagieren. Andererseits steigen die Belastungen der Blattwurzel ebenso wie die Böenempfindlichkeit.

## BAUFORMEN

In der Geschichte hat es immer wieder neue Konzepte und Bauformen gegeben – durchgesetzt haben sich heute drei Typen: Die „konventionelle“ Auslegung mit einem Hauptrotor und Heckausleger, die bei fast allen aktuellen Modellen eingesetzt wird, Koaxialrotoren, wie bei verschiedenen Kamov-Modellen verwendet, sowie die Tandemanordnung von Rotoren, wie sie beispielsweise die Chinook von Boeing aufweist. Bei der Koaxial- und Tandembauweise laufen die beiden Rotoren gegenläufig und üben damit, wenn sie im Vorwärtsflug oder beim Schweben mit gleicher Drehzahl laufen, kein Drehmoment auf die Zelle aus. Bei beiden wird die gesamte Motorleistung zum Auf- und Vortrieb genutzt. Da kein Heckrotor notwendig ist, kann der Koaxialhubschrauber kompakter gebaut werden. Nachteile dieser Bauweise: Rotorkopf, Kraftübertragung und Getriebe fallen komplexer und schwerer aus – die Wellen der beiden Rotoren laufen ineinander –, es kommt zu Interferenzen zwischen beiden Rotoren, der Luftwiderstand des Rotorkopfes ist größer. Die Tandemauslegung macht nur bei größeren Hubschraubern Sinn. Sie erfordert zum einen mehr Platz am Boden und – wie bei der Chinook, wo beide Triebwerke im Heck untergebracht sind – eine leistungsfähige und damit schwere Kraftübertragung zum vorderen Rotor.

Beim konventionellen Hubschrauber mit einem einzelnen Hauptrotor ist der Heckrotor zum Momentenausgleich und zur Steuerung um die Hochachse nötig, ohne Heckrotor würde sich die Hubschrauberzelle entgegengesetzt des Hauptrotors drehen. Dieser Momentenausgleich kostet etwa acht Prozent der Motorleistung und kann auch – wie beispielsweise bei der Boeing Explorer – durch das Ausblasen von Luft erreicht werden. Entscheidend ist, daß am Heckausleger, der den nötigen Hebelarm liefert, eine Querkraft erzeugt wird.

## KRÄFTE BEIM FLIEGEN

Schauen wir uns die grundlegenden Zustände an einem konventionellen Hubschrauber an. Dabei wird erwartungsgemäß klar, daß er in Sachen Vorwärtsflug und Steuerung entgegen der Aussage von Wright doch deutlich mehr zu bieten hat als ein Ballon. Soll der Hubschrauber schweben, muß Auftrieb, eine nach oben gerichtete Kraftkomponente erzeugt werden, um die Gewichtskraft zu überwinden. Soll der Hubschrauber von der Stelle kommen, muß Vortrieb erzeugt werden. Beides kann nur vom Hauptrotor geleistet werden, dessen Schub aber nur in einen Richtung wirken kann. Das heißt, der durch den Rotor erzeugte Kraftvektor muß so geneigt werden, daß eine vertikale – Auftrieb – und eine horizontale Komponente – Vortrieb – entsteht. Im Schwebезustand ist der Auftrieb so groß wie die Gewichtskraft, soll der Hubschrauber steigen, muß der Auftrieb größer sein. Im stationären Vorwärtsflug

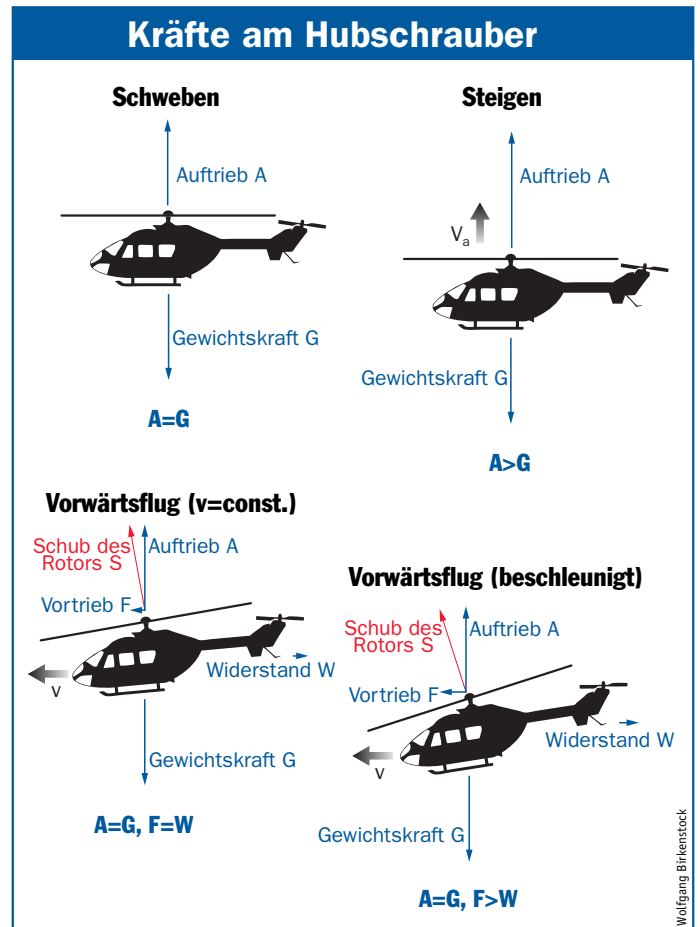
muß natürlich auch ein dem Gewicht entsprechender Auftrieb erzeugt werden, aber zudem ein Vortrieb, der dem Widerstand entspricht. Soll der Hubschrauber beschleunigen, muß der Vortrieb größer sein als der Widerstand (siehe Grafik „Kräfte am Hubschrauber“). Die Bezeichnung „Vortrieb“ impliziert zwar eine Vorwärtsbewegung, aber je nach Neigungsrichtung des Schubvektors fliegt der Hubschrauber nach rechts, nach links oder auch rückwärts.

### DREHEN DES SCHUBVEKTORS - WIE?

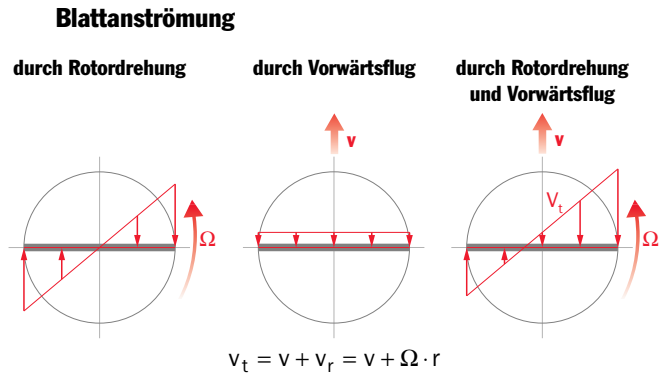
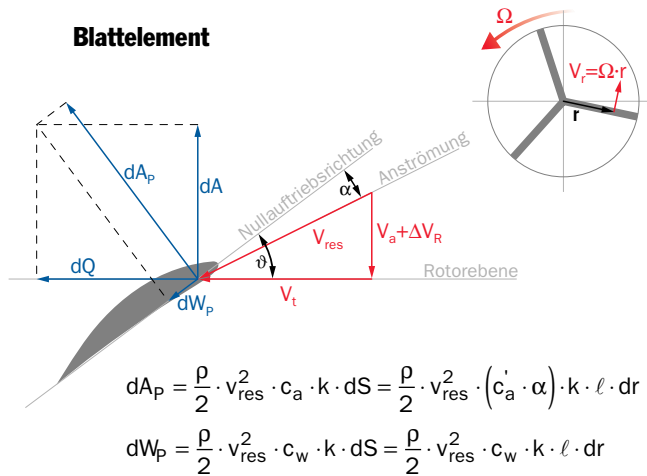
Drehen des Schubvektors – das klingt erst einmal abstrakt und theoretisch, auch wenn grundsätzlich klar geworden ist, warum das so sein muß. Aber wie sieht das konkret am Hubschrauber aus?

Der Rotor, der mit etwa sieben Hertz rotiert, erzeugt wie ein Propeller eine Schubkraft nach dem Rückstoßprinzip: Luft wird durch den Rotor beschleunigt, die Kraft auf den Rotor und damit auf dem Hubschrauber wirkt in die entgegengesetzte Richtung, also senkrecht zur Rotorebene nach oben. Genau genommen wirkt sie senkrecht zur Blattspitzenebene. Das ist die Ebene, die, wie der Name vermuten läßt, von den Blattspitzen beschrieben wird.

Der Rotorschub  $S$  ist die Summe der an den Rotorblättern erzeugten Auftriebe, an jeder Stelle der Rotorkreisfläche wird ein Teil des Gesamtschubes produziert. Das Prinzip der Auftriebsentstehung an einen Blatt entspricht dem an einem Flugzeugflügel (siehe auch FR November 1997). Die in der Rotorebene induzierte Abwindgeschwindigkeit  $\Delta v_r$  – das ist die Differenz zwischen der Geschwindigkeit vor und nach der Rotorebene – ist ein Maß für die Größe des erzeugten Schubs.



# Blattanströmung und Kräfte



- $dA_p$  Profilauftrieb
- $dA$  Kraftkomponente senkrecht zur Rotorebene (Schub)
- $dW_p$  Profilwiderstand
- $dQ$  Kraftkomponente in Rotorebene (Widerstand)
- $\rho$  Luftdichte
- $r$  Variable in Radiusrichtung
- $k$  Anzahl der Rotorblätter

- $dS$  Rotorblattfläche
- $\ell$  Blattbreite (wird als konstant angenommen)
- $v$  Fluggeschwindigkeit des Hubschraubers
- $\Omega$  Winkelgeschwindigkeit des Rotors
- $v_r$  Anströmgeschwindigkeit durch Rotordrehung
- $v_t$  Anströmgeschwindigkeit in der Rotorebene
- $v_a$  Steig-/Sinkgeschwindigkeit des Hubschraubers

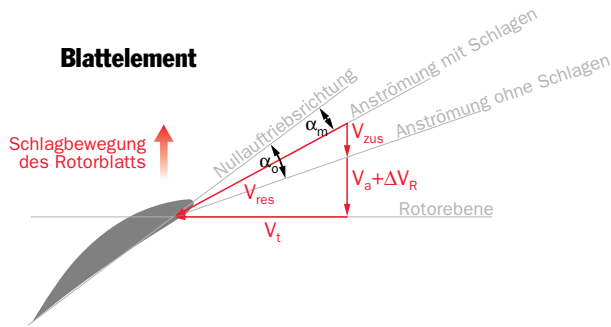
- $\Delta v_r$  induzierte Abwindgeschwindigkeit
- $v_{res}$  resultierende Anströmgeschwindigkeit
- $\vartheta$  Blatteinstellwinkel
- $\alpha$  effektiver Anstellwinkel
- $c_a$  Auftriebsbeiwert
- $c'_a$  vom Anstellwinkel unabhängiger Auftriebsbeiwert
- $c_w$  Widerstandsbeiwert

In der Grafik „Blattanströmung und Kräfte“ ist die Lage an einem Blattelement skizziert. Die Anströmgeschwindigkeit  $v_{res}$  ist eine Überlagerung aus einer horizontalen und vertikalen Strömung. Die vertikale Komponente setzt sich aus der Steig- bzw. Sinkgeschwindigkeit des Hubschraubers  $v_a$  und der in der Rotorebene induzierten Geschwindigkeit  $\Delta v_r$  zusammen. Der horizontale Teil – mit  $v_t$  bezeichnet – besteht einerseits aus der Umfangsgeschwindigkeit  $v_r$  durch die Drehung des Rotors sowie der Vorwärtsgeschwindigkeit  $v$  des Hubschraubers. Damit ist klar: Die Anströmung eines Rotorblattes ist im Vorwärtsflug nicht konstant. Auf der vorschlagenden Seite (meist

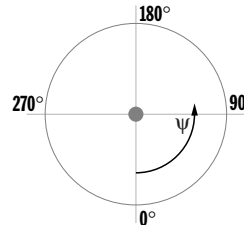
rechts, von oben gesehen) addieren sich Umfangs- und Fluggeschwindigkeit, auf der rückschlagenden haben sie entgegengesetzte Richtungen, die effektive Anströmgeschwindigkeit ist geringer.

Ein Blick auf die Auftriebsgleichung für  $dA_p$  verrät den Einfluß von  $v_t$  (als bestimmende Komponente von  $v_{res}$ ) auf den Auftrieb – eine hohe Anströmgeschwindigkeit entspricht einem großen Auftrieb. Damit liegt, bleibt das Blatt bei seiner Umdrehung unverändert, auf der vorschlagenden Seite ein großer, auf der rückschlagenden Seite ein ge-

## Schlagbewegung



### Azimutwinkel



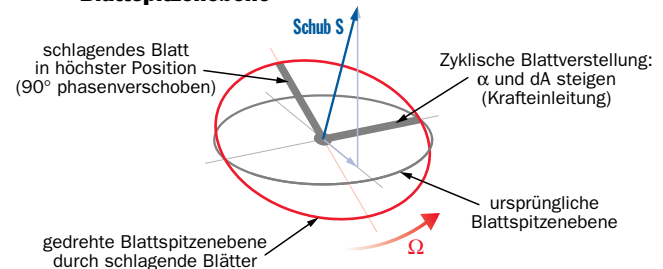
Die Schlagbewegung ist eine Ausweichbewegung des Blattes, eine Reaktion auf die angreifenden aerodynamischen Kräfte in vertikaler Richtung, also den Auftrieb. Diese Ausweichbewegung ist möglich – und nötig – durch die gelenkige Aufhängung der Blätter bzw. deren flexiblen Wurzeln (siehe auch Kästen „Rotorkopf-Bauweisen“).

Durch die Schlagbewegung werden unerwartet auftretende Lastspitzen und unsymmetrische Zustände am Rotor ausgeglichen. Diese können zum Beispiel durch eine Böe hervorgerufen werden, die lokal durch eine größere Anströmgeschwindigkeit den erzeugten Auftrieb erhöhen. Das Blatt schlägt nach oben. Diese Ausweichbewegung impliziert aber eine zusätzliche vertikale Anströmgeschwindigkeit nach unten ( $v_{zus}$ ), die den effektiven Anstellwinkel

und damit den Auftrieb wieder reduziert:  $\alpha_m < \alpha_0$ . Somit wird durch die Bewegung die die Bewegung auslösende Kraft verringert (siehe obenstehende Skizze).

Die Schlagbewegung hat allerdings auch Einfluß auf die Steuerung des Hubschraubers. Die am Rotorblatt erzeugten Auftriebskräfte wirken nur indirekt und verzögert auf die Hubschrauberzelle und zuerst einmal auf das Blatt selber, das nachgibt und nach oben ausweicht (bis ca. 10 Grad). Gleichzeitig dreht der Rotor natürlich weiter, das Blatt bewegt sich damit nach einer Kräfteinleitung in Drehrichtung und nach oben. Eine Kräfteinleitung bedeutet in diesem Fall eine Erhöhung der erzeugten Auftriebskraft, zum Beispiel durch eine Vergrößerung der Anströmgeschwindigkeit oder des Anstellwinkels. Der größte durch die Kräfteinleitung hervorgerufene Ausschlag wird etwa nach einer viertel Umdrehung erreicht. Es besteht also zwischen Kräfteinleitung und Maximalausschlag eine Phasenverschiebung von annähernd 90 Grad, die durch die träge Masse des Blattes zu erklären ist. Da eine Schlagbewegung gleichbedeutend mit einer Drehung der Blattspitzenebene und damit des Schubvektors ist, der senkrecht auf der Blattspitzenebene steht, wird auch die horizontale Kraftkomponente des Schubvektors (der „Vortrieb“) gedreht.

### Blattspitzenebene



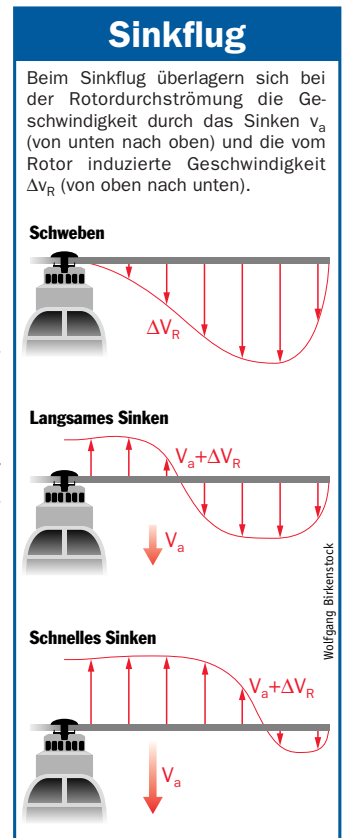
ringerer Auftrieb am Blatt an.

Darüber hinaus ist  $dA_p$  von der Luftdichte  $\rho$ , dem Auftriebsbeiwert  $c_a$  und der Blattfläche  $dS$  abhängig.  $c_a$  wiederum hängt von der Profilform des Blattes und dem effektiven Anstellwinkel  $\alpha$  ab. Neben der Anströmgeschwindigkeit ist der Anstellwinkel des Blattes die veränderliche Größe, und mit der gezielten Verstellung des Blatteinstellwinkels wird in der Tat gesteuert – der Schubvektor gedreht.

Der Blatteinstellwinkel  $\vartheta$  wird über die Taumelscheibe eingestellt. Dieses Bauteil besteht aus zwei übereinander angeordneten Scheiben, die aufeinander gleiten. Die untere Scheibe ist mit den Steuerorganen verbunden. Die obere Scheibe dreht sich mit dem Rotor und überträgt die Steuereingaben – die sich in einem Heben und Senken der Scheiben äußern – mittels Steuerstangen auf die Blätter. Dabei ist nicht nur eine kollektive Verstellung – alle Blätter werden gleichmäßig gedreht –, sondern auch eine sogenannte zyklische Blattverstellung möglich. Dabei ist die Verstellung abhängig von der Lage in der Rotorkreisfläche, dem sogenannten Azimutwinkel. Realisiert wird das über ein Schrägstellen der Taumelscheibe.

Mit Hilfe der zyklischen Blattverstellung kann also über eine Veränderung des Blattanstellwinkels während der Umdrehung der Auftrieb an einem Blatt beeinflusst werden. So kann, um die unterschiedlichen Anströmgeschwindigkeit auszugleichen, auf der Seite mit der geringeren Geschwindigkeit der Anstellwinkel erhöht werden. Auf dieser Seite wird die Taumelscheibe angehoben, jedes Blatt, das dort „vorbei kommt“, wird entsprechend verstellt.

Bei der Nutzung der zyklischen Blattverstellung zur Steuerung und Stabilisierung muß allerdings noch die durch die Schlagbewegung verursachte Phasenverschiebung beachtet werden (siehe Grafik „Schlagbewegung“). Konkret: Wird rechts (Azimutwinkel  $\psi=90^\circ$ ) der Auftrieb durch eine Vergrößerung des Anstellwinkels erhöht, dreht der Schubvektor nicht nach links, sondern nach hinten, der Hubschrauber nickt auf. So nickt der Hubschrauber auch auf, wenn die im Vorwärtsflug höherer Anströmgeschwindigkeit auf der vorschlagenden – rechten – Seite nicht durch eine zyklische Blattverstellung ausgeglichen wird. Die Phasenverschiebung ist in der Steuermechanik berücksichtigt.



## STEUERN DES HUBSCHRAUBERS

Das Vorstehende im Hinterkopf, kann man sich überlegen, wie verschiedene Bewegungen eines Hubschraubers aus dem Schwebeflug heraus realisiert werden. Prinzipiell kann sich ein Körper im Raum in sechs Freiheitsgraden bewegen, beim Hubschrauber sind Nicken und Vorwärtsbewegung sowie Rollen und die seitliche Bewegung gekoppelt.

- Steigen: Erhöhung des Rotorschubs durch eine Vergrößerung des Anstellwinkels (kollektive Blattverstellung) mit Anpassung der Motorleistung. Beim Sinken wird der Rotorschub entsprechend reduziert.
- Gieren (Drehen um die Hochachse): Erhöhung oder Reduzierung des Heckrotorschubes, der das Moment des Hauptrotors ausgleicht.
- Nicken/Vorwärtsbewegung: Der Schubvektor wird nach vorne geneigt, indem auf der rückschlagenden Seite (links, Azimutwinkel  $\gamma=270^\circ$ ) der Anstellwinkel mittels zyklischer Blattverstellung erhöht wird. Gleichzeitig muß der Schub insgesamt wie beim Steigen angehoben werden. Da der – geneigte – Schubvektor nicht durch den Schwerpunkt des Hubschraubers geht und damit ein Moment auf ihn ausübt, nickt der Hubschrauber so lange, bis das Momentengleichgewicht durch die Nickbewegung oder eine Änderung der Rotoreinstellung wieder hergestellt ist. Durch die Horizontalkomponente des nach vorne geneigten Schubvektors fliegt der Hubschrauber nach vorne. Beim Aufnicken/Rückwärtsflug wird der Blattanstellwinkel rechts (Azimutwinkel  $\gamma=90^\circ$ ) erhöht.
- Rollen/Seitwärtsbewegung: Wie beim Nicken muß der Schubvektor unter Berücksichtigung der Schlagbewegung gedreht werden – nur eben zur Seite. Um nach rechts (von oben aus gesehen) zu rollen/fliegen, wird der Anstellwinkel vorne (Azimutwinkel  $\gamma=180^\circ$ ) erhöht, für die Bewegung nach links hinten (Azimutwinkel  $\gamma=0^\circ$ ).

Der zusätzliche Leistungsbedarf beim Steigen resultiert in erster Linie aus dem gestiegenen Profilwiderstand. Die Widerstandsgleichung für  $dW_p$  (siehe Grafik „Blattanströmung und Kräfte“) zeigt die gleiche Abhängigkeit von Anströmgeschwindigkeit und Anstellwinkel – auch der Widerstandsbeiwert  $c_w$  hängt vom Anstellwinkel ab – wie die Beziehung für den Auftrieb. Beim Horizontalflug kommt noch der mit steigender Fluggeschwindigkeit stark wachsende Zellenwiderstand hinzu. Durch diese Faktoren ist die maximale Geschwindigkeit des Hubschraubers bestimmt – irgendwann reicht die Motorleistung nicht mehr aus, um die steigenden Widerstände an den Blättern und der Zelle zu kompensieren. Da bei Überschallströmung mit dem durch Verdichtungsstöße hervorgerufenen Wellenwiderstand eine zusätzliche Widerstandskomponente hinzu kommt, sollte vermieden werden, daß an den Blattspitzen Machzahlen von über eins erreicht werden. Damit ist nicht nur die Umdrehungszahl des Rotors sondern auch sein



Durchmesser begrenzt (ein weiterer limitierender Faktor beim Durchmesser ist die Festigkeit des Rotorwerkstoffs). Eine höherer Drehzahl und ein größerer Rotordurchmesser sind aber ebenfalls Möglichkeiten – bei entsprechender Motorleistung –, den Rotorschub zu erhöhen. Sind diese Mittel ausgereizt, bleibt eine Erhöhung der Blattzahl. Daher haben größere und schwerere Hubschrauber, die naturgemäß mehr Schub zum fliegen benötigen, auch mehr Rotorblätter. So besitzt der Sikorsky CH-53E mit einem maximalen Startgewicht von gut über 30 Tonnen einen Sieben-Blatt-Rotor, der bis zu 56 Tonnen schwere Mil Mi-26 einen mit acht Blättern. Hubschrauber in der Gewichtsklasse bis zehn Tonnen kommen in der Regel mit vier Blättern aus, noch leichtere haben deren zwei oder drei.

Mit einer großen Blattzahl steigt das Rotorgewicht und der Profilwiderstand – dadurch wächst der Leistungsbedarf. Ein großer Rotordurchmesser hat grundsätzlich wegen der geringeren induzierten Geschwindigkeit  $\Delta v_R$  einen günstigen Einfluß auf das Schub-/Leistungsverhältnis und die Lärmentstehung am Rotor.

## AUTOROTATION

Wright sprach es an: Was passiert nun, wenn der Motor des Hubschraubers ausfällt? Ein Starrflügler kann, wie vom Flugpionier beschrieben, immerhin noch gleiten – aber ein Hubschrauber? Das, was den Hubschrauber und seine Besatzung retten soll, wird Autorotation genannt. Beim Ausfall des Motors werden die Rotorblätter so angestellt, daß die von unten durchströmende Luft – der Hubschrauber fällt – den Rotor antreibt wie eine Windmühle. Ziel ist es, möglichst viel Rotationsenergie aufzubauen. Nebenbei wird dabei in den äußeren Bereichen des Rotors auch noch etwas Auftrieb erzeugt, was denn Fall leicht bremst. So beträgt die Sinkgeschwindigkeit schätzungsweise 30 Meter/Sekunde – das entspricht 110 Kilometer/Stunde und ist natürlich viel zu hoch, als daß Hubschrauber und Besatzung einen Aufschlag heil überstehen könnten. Der Pilot muß daher eine Art Abfangmanöver versuchen: Kurz über dem Boden stellt er die Rotorblätter so an wie im normalen Steigflug, die im Rotor während des Sinkens aufgebaute Rotationsenergie wird kurzzeitig in Schub umgesetzt, der Hubschrauber stark abgebremst. Optimal wäre es, wenn der Rotor beim Aufsetzen still stände. So sind, wenn es gut läuft, Sinkgeschwindigkeiten von sechs Meter/Sekunde und weniger zu erreichen. Allerdings muß das Timing stimmen: Startet der Pilot das Abfang-Manöver zu früh, bremst der Hubschrauber zwar kurzzeitig, aber die Rotationsenergie ist verbraucht und er geht danach nahezu in freien Fall über. Wie es so passend im Englischen heißt: „Any autorotation you can walk away from is successful.“

*Wolfgang Birkenstock*