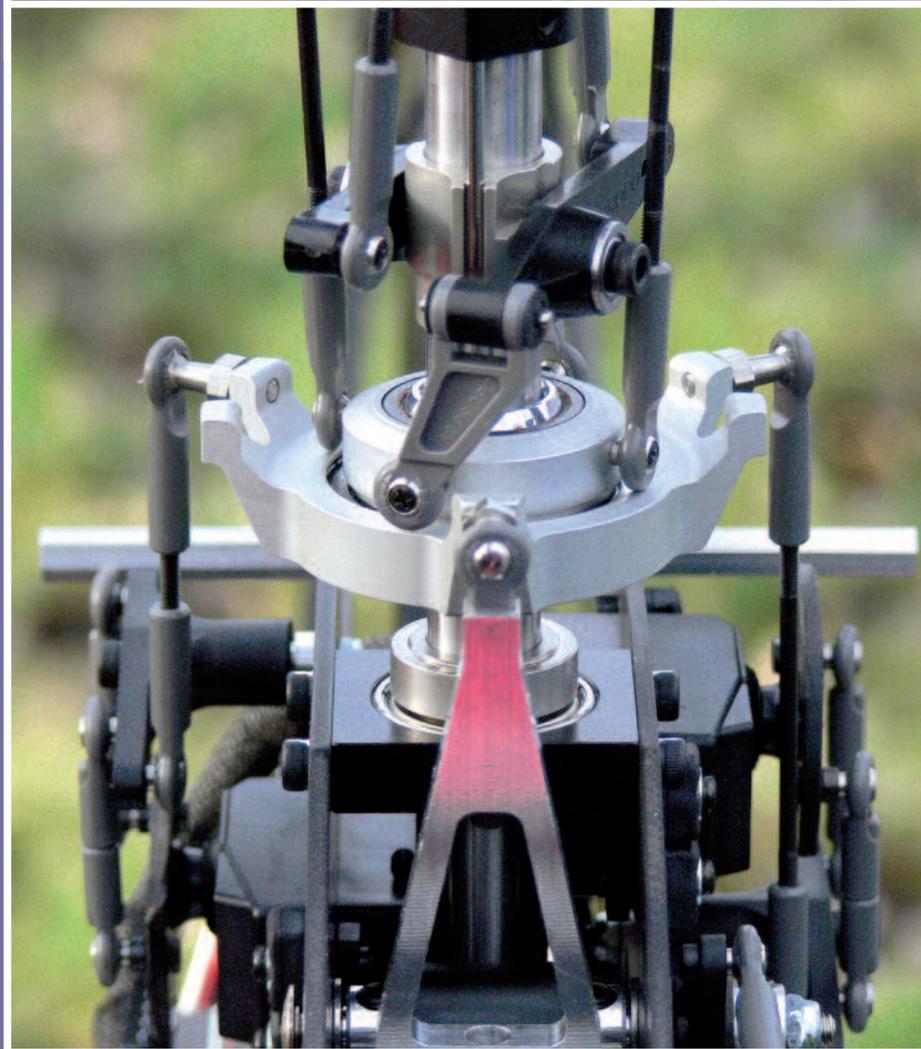


Sonder-
veröffentlichung

ROTOR

HEFT 3 • MARZ 2007

€ 6,40 • Schweiz CHF 12,50 • Österreich € 7,30
Frankreich, Italien, Belgien, Niederlande, Luxemburg € 7,00



Die führende
Hubschrauber-Fachzeitschrift



Wie funktioniert die Steuerung eines Hubschraubers?

Eine theoretische Betrachtung von Michael Schreiner

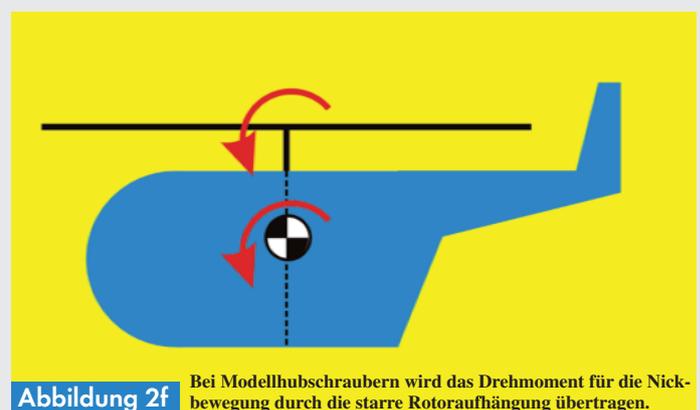
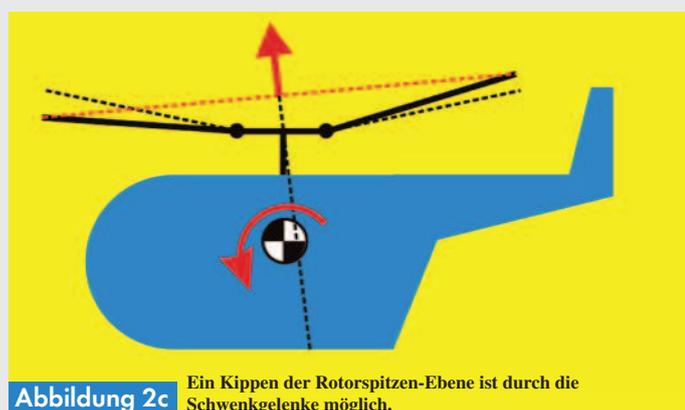
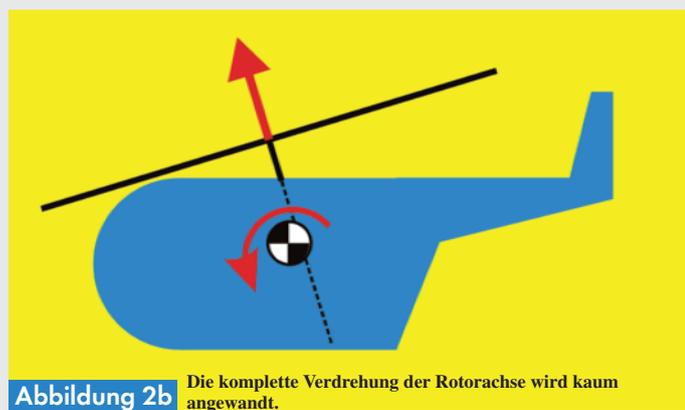
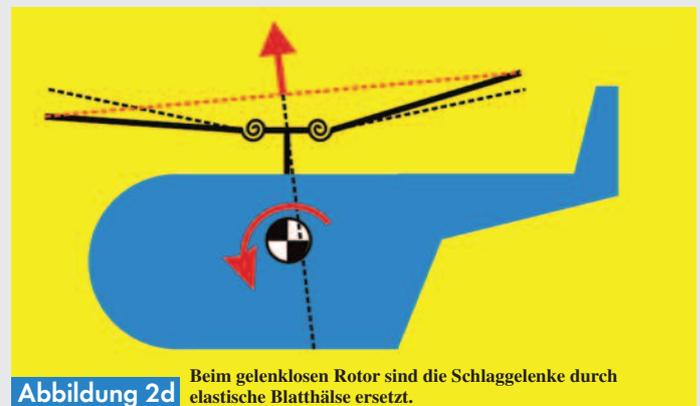
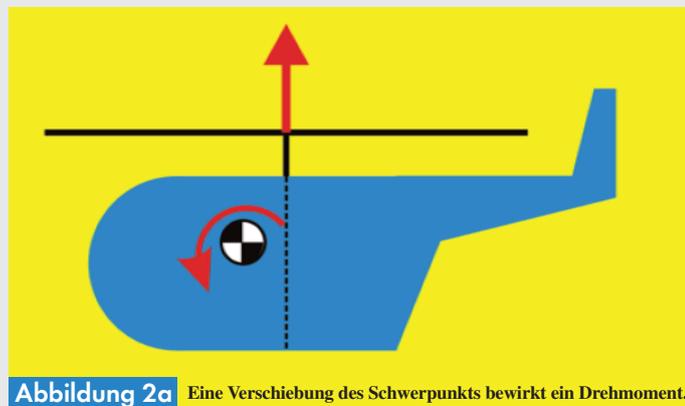
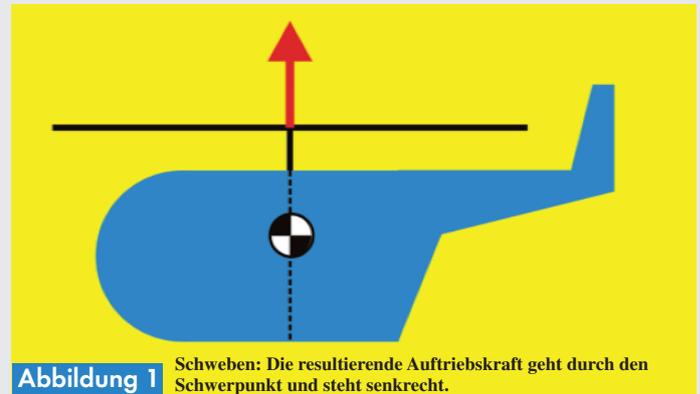
Teil 1

Der Hubschrauber-Pionier Igor Sikorsky hat sich bei einem seiner ersten Flüge gewundert, dass er den Stick nach links drücken musste, um mit seinem Hubschrauber Fahrt nach vorne auf-

zunehmen [Bittner]. Das, was Sikorsky überrascht hat, ist beim Modellhubschrauber ganz ähnlich: Ein Kippen des Hubschraubers nach vorne wird erreicht, wenn der Auftrieb seitlich am größten ist. Diese Phasenverschiebung zwischen größtem

Auftrieb und dem Verkippen der Rotorebene, die vielleicht zunächst verwundert, wird oft mit dem Kreiseffekt erklärt. Diese Erklärung überzeugt aber nicht bei Hubschraubern, bei denen

die Phasenverschiebung von 90 Grad verschieden ist, wie zum Beispiel bei der *BO 105* (ca. 78 Grad) oder dem Graupner *micro 47G Indoor* (ca. 45 Grad). Wie funktioniert also die Steuerung?



In diesem Bericht wird die Steuerung von verschiedenen Hubschraubertypen (manntragende und Modelle) untersucht. Diese Darstellung soll allgemein verständlich sein. Deswegen wird versucht, sich an die richtige Weisheit von Albert Einstein anzulehnen, die Dinge so einfach wie möglich zu erklären, aber nicht einfacher. In diesem Sinne werden (meist stillschweigend) einige Vereinfachungen vorgenommen, die jedoch den Kern der Sache nicht betreffen.

Welche Möglichkeiten der Steuerung gibt es?

Wenn ein Hubschrauber im Schwebeflug ist, dann erzeugen die Rotorblätter einen Auftrieb. Dieser Auftrieb ist (in gewissen Grenzen) proportional zum Quadrat der Geschwindigkeit der Luft, die das Profil umströmt, und ca. proportional zum Anstellwinkel der Rotorblätter. Also kann der Auftrieb durch zwei Parameter gesteuert werden: durch die Drehzahl des Rotors oder durch den kollektiven Anstellwinkel der Rotorblätter («collective pitch»). Beide Konzepte sind bei Modellhubschraubern zu finden. Bei manntragenden Hubschraubern wird die Drehzahl nur in engen Grenzen variiert, dort wird der Auftrieb hauptsächlich mit der kollektiven Blattanstellung verändert.

Den gesamten Auftrieb des Rotors kann man sich als einen Kraftvektor entlang der Drehachse des Rotors denken. Steht dieser Vektor senkrecht nach oben und geht durch den Schwerpunkt des Hubschraubers, dann kann der Hubschrauber im Schwebeflug verharren (Abbildung 1). Dass dieser Zustand nicht stabil ist und der Pilot permanent regelnd eingreifen muss, soll an dieser Stelle nicht interessieren.



Abbildung 3

Hauptrotorsystem der Alouette III mit Schlaggelenken. Der Kopf selbst ist starr mit der Rotorwelle verbunden, während die Rotorblätter gelenkig verbunden sind.

Ebenso ist klar, dass durch den Antrieb des Rotors ein Drehmoment auf den Rumpf wirkt, das den Hubschrauber um seine vertikale Achse drehen möchte. Dieses wird in den meisten Systemen durch den Heckrotor kompensiert.

Welche Möglichkeiten zur Steuerung von Hubschraubern gibt es? Als Beispiel wird betrachtet, wie ein Kippen des Hubschraubers nach vorne (Nick) eingeleitet wird, damit er Fahrt nach vorne aufnehmen kann. Zunächst werden die verschiedenen Möglichkeiten im Prinzip vorgestellt, später werden sie dann detaillierter besprochen. Skizzen zu den einzelnen Steuerungsarten sehen Sie in den Abbildungen 2a bis 2f:

a) Ein Verschieben des Schwerpunktes nach vorne hat zur Folge, dass die Kraftlinie des Rotors nicht durch den Schwerpunkt geht. Es entsteht ein Drehmoment nach vorne, das eine Kippbewegung hervorruft. Ob die beschriebene Gewichtsverlagerung zur Steuerung verwendet wird, ist dem Autor unbekannt. Solche Situationen tre-

ten aber zum Beispiel bei schlecht getrimmten Modellhubschraubern auf.

b) Eine prinzipielle Möglichkeit zur Steuerung wäre, die komplette Drehachse zu kippen. Diese Methode ist in der Praxis so gut wie nie anzutreffen. Eine Ausnahme bilden die VTOL-Flugzeuge, die zum Start die Propeller senkrecht in die Luft stellen. Bei einem Hubschrauber herkömmlicher Bauweise würde das Erhaltungsprinzip für den Drehimpuls dafür sorgen, dass der Helikopter beim Neigen der Achse nach vorne zur Seite rollt (dazu später mehr).

c) Eine wichtige Steuermöglichkeit wird durch die Schlaggelenke realisiert. Der Rotorkopf ist starr mit der Drehachse des Rotors verbunden, während

die Rotorblätter gelenkig am Rotorkopf angebracht sind (vergleiche zum Beispiel den Rotorkopf der Alouette III; Abbildung 3). Die Schlaggelenke erlauben eine Auf- und Abbewegung (Schlagen) der Rotorblätter. Im Schwebeflug bilden die Rotorblätter einen Konus (typische Konuswinkel liegen zwischen 4 und 10 Grad). Um eine Nickbewegung einzuleiten, wird das hintere Blatt nach oben geschwenkt, das vordere entsprechend nach unten. Die Neigung der Blattspitzenebene führt zu einer Neigung des Schubvektors – ein Drehmoment zum Einleiten der Nickbewegung entsteht. Das Schlagen der Blätter wird nicht mechanisch erzeugt, sondern geschieht indirekt: Durch die zyklische Blattverstellung ist der Auftrieb jedes einzelnen Rotorblattes an verschiedenen Positionen unterschiedlich. Die sich periodisch ändernde Kraft ruft das Schlagen der Blätter hervor. Weiter hinten wird dies genauer beschrieben.

d) Die Schlaggelenke aus c) sind in dieser Variante durch elastische Blatthälse ersetzt. Beispiele hierfür sind die BO 105, bei der dieses System zum ersten Mal eingesetzt wurde (identisches System auch bei der EC 145; siehe Abbildung 4), oder die Graupner micro 47G (Abbildung 5). Die Funktionsweise ist ähnlich wie bei den Blattgelenken, allerdings sorgt die Steifigkeit der Gelenke für eine andere

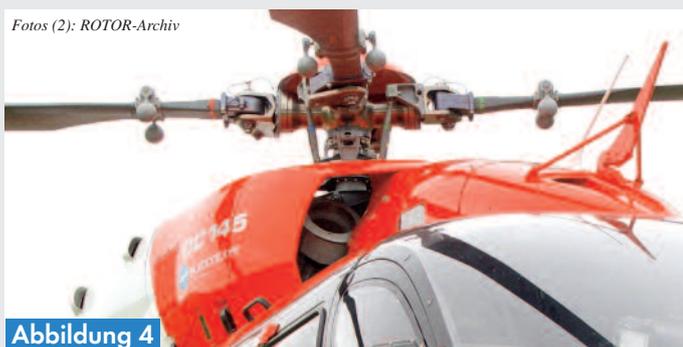


Abbildung 4

Fotos (2): ROTOR-Archiv



Die Schlaggelenke im herkömmlichen Sinn sind bei der EC 145 (links) durch elastische Blatthälse ersetzt.

Und das funktioniert auch beim Modell: Die micro 47G Indoor (rechts) von Graupner hat ebenfalls elastische Blatthälse.



Abbildung 6

Schlag-Dynamik, wovon später noch die Rede sein wird.

e) Hier sitzen die Rotorblätter steif am Rotorkopf, dieser kann jedoch im Ganzen auf der Spitze der Rotorwelle gekippt werden. Ein Beispiel ist im *Bell Jet Ranger* (Abbildung 6) zu sehen. Von diesem System gibt es auch Varianten: Bei der *Bell UH-1D* (Abbildung 7) ist dieses zweiblättrige System durch eine Stabilisierungsstange (Bell-System) ergänzt. Ihre Funktionsweise wird später diskutiert. Bei der *Hiller UH 12-B* (Abbildung 8) wird die Änderung der zyklischen Blattanstellung nicht direkt, sondern indirekt mit Hilfe der so genannten Hillerpaddel erreicht. Diese werden auch bei den meisten Modellhubschraubern eingesetzt.

f) Bei den Modellhubschraubern wird die Rotorblatt-Ebene nicht geschwenkt. Durch die starre Verbindung zum Rotorkopf können jedoch Drehmomente übertragen werden, die ein Kippen des Hubschraubers bewirken.

Bei allen relevanten Systemen c) bis f) erfolgt die Steuerung indirekt. Die Neigung der Blattebene wird durch eine zyklische Veränderung des Auftriebs der Rotorblätter erreicht. Um diesen Vorgang zu verstehen, werden im nächsten Abschnitt Eigenschaften dynamischer Systeme diskutiert.

Dynamische Systeme

Im Blickpunkt stehen nun dynamische Systeme folgender

Der Hauptrotor des *Bell Jet Ranger* (oben) wird komplett gekippt.

Die *Hiller 360* (rechts; Vorgänger der *UH-12-Serie*) mit indirekter Ansteuerung durch Hiller-Paddel.

Bei der *Bell UH-1D* (unten) sorgt eine Stabilisierungsstange für ein ruhigeres Steuerverhalten.



Abbildung 7

Form: Eine Masse hängt an einer Feder oder ist an einem Pendel aufgehängt. (Für die Profis: Wir betrachten das linearisierte Problem.) Einmal ausgelenkt, beginnen diese Systeme (siehe zum Beispiel Abbildung 9) zu schwingen. Diese Schwingung klingt mit der Zeit ab (gedämpfte Schwingung). Die Frequenz, mit der diese Schwingung stattfindet, ist eine Eigenschaft des Systems und unabhängig davon, wie weit die Masse ausgelenkt wurde. Man spricht von der Eigenfrequenz des Systems. Zum Beispiel ist das Uhrpendel ein solches System: Da es immer mit der gleichen Frequenz schwingt, kann es zur Zeitmessung verwendet werden.

Was passiert, wenn ein dynamisches System mit einer Schwin-

gung beliebiger Frequenz angeregt wird, wie es in Abbildung 10 skizziert ist? Zunächst einmal ist festzuhalten, dass das System mit der gleichen Frequenz wie die Anregung schwingt. (Die überlagerten Schwingungen mit der Eigenfrequenz sind gedämpft und klingen daher ab.) Das Verhalten des Systems hängt stark von der Frequenz der Anregung ab:

■ Wenn die Anregungsfrequenz ganz klein ist – zum Beispiel, wenn das Rad sehr vorsichtig gedreht wird –, dann folgt die Masse der Bewegung des Rads ziemlich exakt. Wenn die Anregung ganz oben ist, dann ist auch

die Anregung ganz oben ist, dann ist die Masse noch auf dem Weg nach oben, wenn die Masse oben ist, dann ist die Anregung schon wieder auf dem Weg nach unten usw.

■ Wird die Anregungsfrequenz weiter erhöht, dann nimmt die Schwingungsamplitude der Masse wieder ab. Die Masse verhält sich so träge, dass sie der Bewegung der Anregung nicht mehr folgen kann. Sie bewegt sich nur noch ganz schwach, und ihre Bewegung ist der Bewegung der Anregung entgegengesetzt.

Was hier qualitativ beschrieben ist, kann exakt berechnet wer-

Abbildung 8



Foto: Sabine Winkler

die Masse ganz oben. Wenn die Anregung auf halber Höhe ist, dann ist auch die Masse auf gleicher Höhe usw.

■ Wenn die Anregungsfrequenz vergrößert wird, werden die Reaktionen der Masse immer heftiger. Ziemlich nahe bei der Eigenfrequenz des Systems ist die Amplitude der Masse am größten (das ist die Resonanzfrequenz). Dabei sind die Anregung und die Bewegung der Masse phasenverschoben: Wenn

den. Heraus kommt der Amplitudengang des Systems. Er beschreibt das Verhältnis von der Amplitude des Systems zur Amplitude der Anregung. Wie oben beschrieben, ist dieses Verhältnis von der Frequenz abhängig. Bei der Resonanzfrequenz, die nahe bei der Eigenfrequenz ist, ist die Amplitude am größten (vergleiche Abbildung 11). Dieser Effekt kann störend sein: So kann zum Beispiel die Anregung durch eine im Gleichschritt marschierende Gruppe von Men-

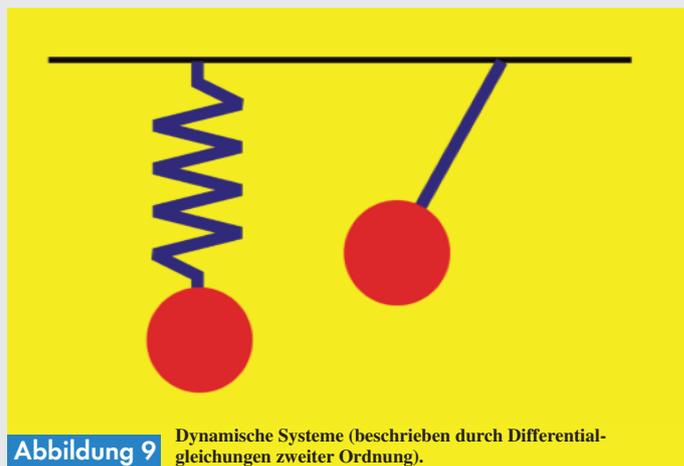


Abbildung 9 Dynamische Systeme (beschrieben durch Differentialgleichungen zweiter Ordnung).

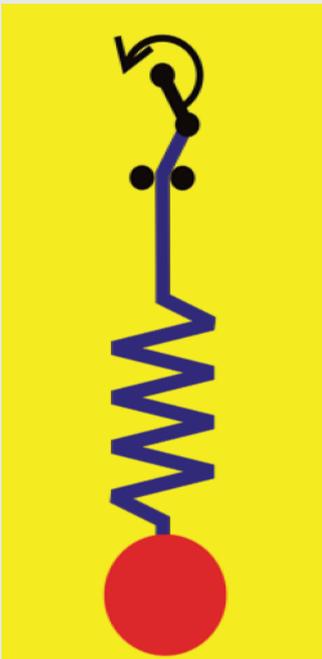


Abbildung 10 Ein dynamisches System wird mit einer periodischen Funktion zur Schwingung angeregt. Die Frequenz der Anregung ist entscheidend für das Verhalten des Systems.

schon eine Brücke zu starken Schwingungen anregen, wenn die Schrittfrequenz nahe bei einer Eigenfrequenz der Brücke ist. Oder wir kennen es von den Modellhubschraubern: Bei bestimmten Drehzahlen wirkt sich eine Unwucht besonders stark aus. Es gibt aber auch die Ausnutzung der Resonanz: So wird zum Beispiel beim Spielen der Trompete eine Eigenschwingung des Instruments angeregt. Nur so ist es möglich, dass durch die relativ geringe Energie beim Spielen laute Töne erzeugt werden können.

Was uns aber im Folgenden mehr interessiert, ist die Phasenverschiebung zwischen der Anregung und der Antwort des Systems. Wir haben bereits gesehen: Bei kleinen Frequenzen sind die Anregung und die Reaktion in Phase, nahe der Resonanzfrequenz eilt die Anregung der Reaktion um eine Viertelschwingungsdauer voraus (man sagt auch 90 Grad). Und bei den hohen Frequenzen beträgt die Phasenverschiebung etwa 180 Grad; die Anregung und die Reaktion sind also gegenläufig. In Abbildung 12 ist der typische Phasengang eines Systems aufgezeichnet. Wir werden im nächsten Abschnitt sehen, dass dieser Phasengang fundamental

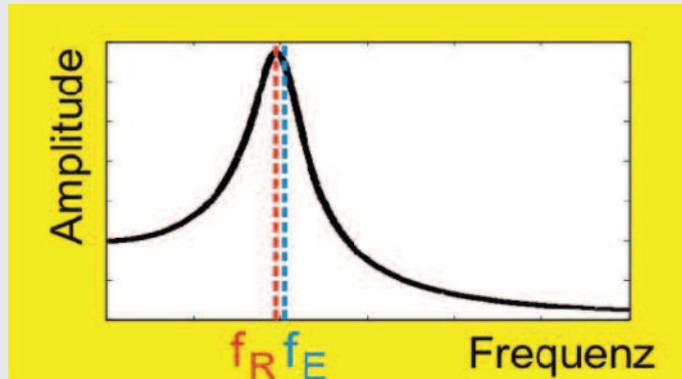


Abbildung 11 Dynamische Systeme (beschrieben durch Differentialgleichungen zweiter Ordnung).

für das Verständnis der Rotordynamik ist.

Rotoren mit Schlaggelenk

Was haben nun die dynamischen Systeme mit den Rotoren zu tun? Dazu muss man sich Gedanken machen, welche Kräfte auf ein Rotorblatt wirken. In Abbildung 13 wird das deutlich: Zunächst gibt es die Gewichtskraft, die das Blatt beim stehenden Rotor nach unten zieht. Wenn sich der Rotor dreht, gibt es zusätzlich die Auftriebskraft. Die Auftriebskraft ist natürlich viel größer als die Gewichtskraft, da der Auftrieb nicht nur die Rotorblätter, sondern den gesamten Hubschrauber trägt. Warum klappen also die Blätter nicht nach oben? Der Grund dafür ist das Drehmoment, das durch die Zentrifugalkraft erzeugt wird. Diese Kraft wirkt als rückstellende Kraft, die den Rotor auf seine horizontale Lage drücken möchte.

Im Schwebeflug halten sich die Drehmomente, die von diesen Kräften erzeugt werden, die

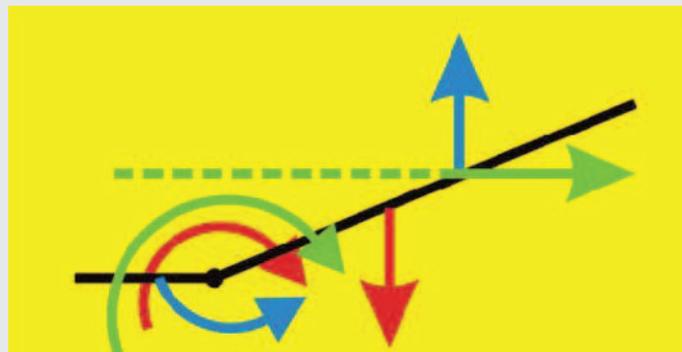


Abbildung 13 Kräfte am gekippten Rotorblatt: Gewichtskraft und zugehöriges Drehmoment (rot), Auftrieb und zugehöriges Drehmoment (blau) sowie Zentrifugalkraft mit Drehmoment mit variablem Hebelarm (grün).

ner, so dass das Blatt vom Auftrieb wieder in seine stabile Lage gedrückt wird. Wir sehen also, dass sich die Bewegung des Rotorblatts wie ein Federpendel verhält. Es handelt sich um ein dynamisches System von der Art, wie sie oben besprochen wurden.

Was ist aber die Eigenfrequenz der Schlagbewegung? Man kann zeigen, dass die Eigenfrequenz vom Abstand des Schlaggelenks zur Rotorachse abhängt. Beim Abstand null ist die Eigenfre-

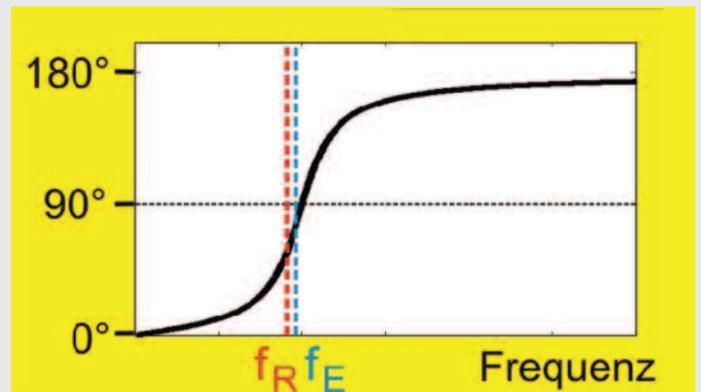


Abbildung 12 Phasengang eines dynamischen Systems. Die Phasenverschiebung ist abhängig von der Frequenz. Nahe der Eigenfrequenz beträgt die Phasenverschiebung ca. 90 Grad.

Waage. Die Rotorblattebene »verbiegt« sich dabei zu einem Konus. Typische Winkel liegen bei mantragenden Systemen zwischen 4 und 10 Grad. Der sich einstellende Konuswinkel ist stabil: Wird das Rotorblatt weiter nach oben geschwenkt, dann wird es vom vergrößerten Drehmoment der Zentrifugalkraft wieder nach unten gedrückt, denn beim Hochklappen wird der wirksame Hebel größer. Wenn das Blatt zu weit unten ist, dann wird das Drehmoment der Zentrifugalkraft klei-

quenz genau die Drehfrequenz des Hauptrotors. Wenn – wie es in der Realität der Fall ist – das Schlaggelenk einen gewissen Abstand zur Drehachse hat, dann nimmt die Eigenfrequenz etwas zu und ist etwas größer als die Drehfrequenz des Hauptrotors.

Um die Blattspitzenebene für das Einleiten der Nickbewegung zu neigen, wird mit dem zyklischen Pitch gearbeitet: Durch Schrägstellen der Taumelscheibe wird erreicht, dass sich der Anstellwinkel eines Blattes beim Drehen um die Rotorachse periodisch ändert. Damit ändert sich aber auch der Auftrieb, der auf ein Rotorblatt wirkt, periodisch – und zwar mit der Drehfrequenz des Hauptrotors. Die Anregung der Schlagbewegung findet also bei einer Frequenz statt, die ein bisschen kleiner als die Resonanzfrequenz des Schlaggelenks ist. Daraus folgen zwei Dinge:

■ Die Phasenverschiebung zwischen Erregung (periodische Auftriebskraft durch den zyklischen Pitch) und die Reaktion

Das Buch »Hubschrauber-Dynamik« von Michael Kalbow bietet eine einfache und eingängige Darstellung der Aerodynamik, einerseits für einen allgemeinen, einfachen Einstieg in die Grundlagen der Aerodynamik und andererseits speziell für den Hubschrauberflug.

Das 232-seitige Buch kann für € 27,50 bezogen werden über den Modellsport Verlag (Tel. 07221 9521-0; modellsport@modellsport.de).

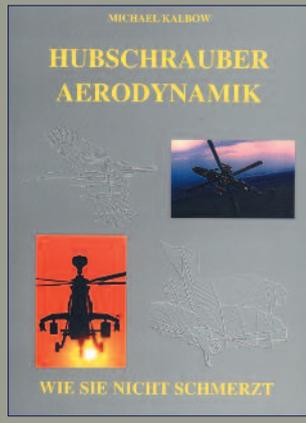


Abbildung 14

Literatur

[Bittner] Walter Bittner, *Flugmechanik der Hubschrauber*, Springer, 2005

[Johnson] Wayne Johnson, *Helicopter Theory*, Princeton University Press, 1980

[Schlüter] Dieter Schlüter, Patent DE2045913, Deutsches Patentamt, 1972

des Systems (Kippen der Rotorblätter) beträgt ca. 90 Grad, da die Eigenfrequenz ziemlich genau mit der Rotordrehfrequenz übereinstimmt. Um also die Blattspitzenebene nach vorne zu kippen, um eine Nickbewegung für den Vorwärtsflug einzuleiten, muss der größte Anstellwinkel des zyklischen Pitches beim nach hinten laufenden Rotorblatt sein, wenn es gerade seitlich steht, also ca. 90 Grad bevor es ganz hinten ist.

■ Dadurch, dass die Bewegung nahe der Eigenfrequenz erregt wird, hilft der Amplitudengang beim Neigen der Rotorspitzen-ebene: Schon eine kleine Änderung des Auftriebs genügt, um das Schlagen des Rotorblattes anzuregen. In Abbildung 14 sind diese Resultate zusammengefasst.

Michael Schreiner

In Teil 2 beschäftigt sich der Autor mit gelenklosen Rotoren, Rotoren mit Kippgelenk und dem »Standard-Rotor« von Modellhubschraubern.

Die Veröffentlichung erfolgt mit freundlicher Genehmigung des Modellsport Verlags Baden-Baden. Weitere Informationen zu ROTOR, der führenden Fachzeitschrift über Modellhubschrauber, gibt es im Internet unter www.rotor-magazin.com