

Sonder-
veröffentlichung

ROTORR



HEFT 4 • APRIL 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 2

Nachdem wir in ROTOR 3/2007 erfahren haben, wie die Funktionsweisen von dynamischen Systemen und Rotoren mit Schlaggelenk ablaufen, geht es im Folgenden um gelenklose Rotoren, Rotoren mit Kippgelenk und dem Standard-Rotor von Modellhubschraubern.

Gelenklose Rotoren

Was ändert sich, wenn das Schlaggelenk durch einen elastischen Blatthals ersetzt wird, wie es zum Beispiel bei der *BO 105* oder der Graupner *micro 47G* realisiert ist? Dann setzt sich das rückstellende Moment bei der Schlagbewegung zusammen aus dem Anteil von der Zentrifugalkraft plus einem Anteil aus der Federwirkung des elastischen Blatthalses. Damit wird die Rückstellkraft größer, und das erhöht die Eigenfrequenz des Systems »Schlaggelenks«.

Man kennt das zum Beispiel von der Gitarre: Wenn die Spannung in der Saite vergrößert wird (und damit die rückstellende Kraft), dann erhöht sich die Tonhöhe, also die Eigenfrequenz der Saite. Beim Rotorblatt ohne Gelenk ist die Frequenz der Erregung (das ist die Rotordrehfrequenz) deutlich geringer als die Eigenfrequenz des »Schlaggelenks«. Ein Blick in den Phasengang zeigt, dass damit die Phasenverschiebung kleiner wird. Im Falle der *BO 105* sind es noch ca. 78 Grad, bei der kleinen *Bell* von Graupner sind es ca. 45 Grad. Das erklärt auch, warum die Servos für die Kippbewegung der Taumelscheibe 45 Grad versetzt angeordnet sind.

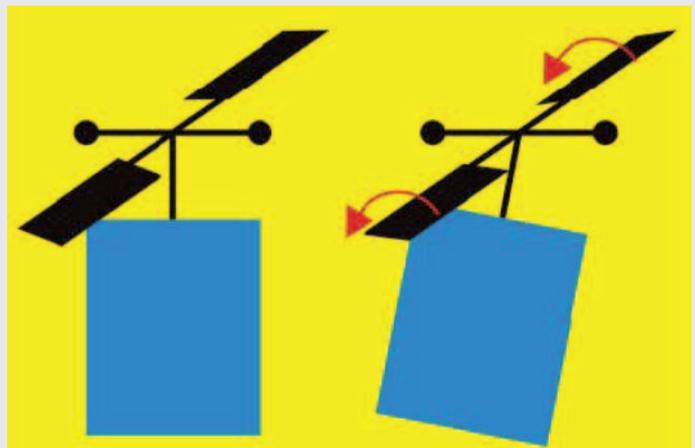
Bei der kleinen *Bell* ist es übrigens so, dass bei den gegebenen Abmessungen die Federkraft zwingend notwendig ist: Das Gewicht der Rotorblätter ist

ziemlich klein, die Drehfrequenz des Rotors nicht sehr hoch, und das Gewicht des Hubschraubers – und damit der Auftrieb – relativ groß. Würde man die Rotorblätter mit Schlaggelenken ohne Federkraft ausrüsten, dann wäre das Rückstellmoment nur durch die Zentrifugalkraft nicht groß genug. Dann würde sich ein Konuswinkel von mehr als 30 Grad einstellen.

Rotoren mit Kippgelenk

Bei zweiblättrigen Rotoren wie dem der *Bell Jet Ranger* funktioniert die Steuerung durch das Kippen der kompletten Rotorebene. Der Rotor selbst ist starr und mit einem Gelenk an der Drehachse kippbar. Das System verhält sich dann im Prinzip so wie ein Schlaggelenkrotor, bei dem das Schlaggelenk auf der Drehachse montiert ist. Die Phasenverschiebung ist dann genau 90 Grad. Also läuft bei diesen Rotoren die zyklische Blattverstellung dem Schwenken der Rotorebene um 90 Grad voraus.

Damit kann man auch erklären, wie die Bell-Stabilisierungsstange funktioniert, die zum Beispiel an der *Bell UH-1D* zur Anwendung kommt: Die Stabilisierungsstange ist kippbar gelagert. Das Kippen der Stange ist gekoppelt mit dem Anstellwinkel der Rotorblätter. Ein Kippen der Drehebene der Stabilisierungsstange bewirkt eine zyklische Blattverstellung der Rotor-



Funktionsweise der Bell-Stabilisierungsstange: Ein Windstoß hat den Hubschrauber zur Seite gekippt, aber die Drehebene der Stabilisierungsstange bleibt waagrecht. Die Änderung des zyklischen Pitches bewirkt, dass die Rotorebene und damit der Schubvektor zum Ausgleich gekippt werden.

Abbildung 15

blätter. Dass die Stange stabilisierend wirkt, ist an folgender Überlegung zu erkennen: Angenommen, ein Windstoß von rechts kippt den Rumpf des Hubschraubers nach links (Abbildung 15). Dann behält die Stabilisierungsstange, die ja kippbar gelagert ist, zunächst ihre ursprüngliche waagrechte Rotationsenebene bei. Sie wird nur langsam (durch die Zentrifugalkraft) dem Rumpf des Hubschraubers folgen, denn eine gegenüber der Drehachse gekippte Stange ist nicht im mechanischen Gleichgewicht. Nun ist die Drehebene der Stabilisierungsstange vom Rumpf aus gesehen nach links gekippt. Damit wird eine zyklische Blattverstellung hervorgerufen, so dass der größte und kleinste Anstellwin-

kel beim Rotorblatt dann erreicht wird, wenn die Stabilisierungsstange zur Seite zeigt, die Rotorblätter also nach vorne bzw. hinten zeigen. Durch die Phasenverschiebung von 90 Grad bewirkt das nun eine Kippung des Auftriebsvektors zur Seite, die der ursprünglichen Kippbewegung des Rumpfes entgegenwirkt. Diese Stabilisierung dient nicht dazu, den Hubschrauber in einer bestimmten Lage zu halten, sondern dazu, den Hubschrauber insgesamt träger zu machen, damit er einfacher zu steuern ist.

Bei der Graupner *micro 47G* (Abbildung 16) ist beim oberen Rotor die Stabilisierungsstange gekoppelt mit einem Rotor, der elastische Blatthälse hat. Wir haben zuvor schon gesehen, dass durch die Elastizität der Schlaggelenke eine Phasenverschiebung zwischen Pitch und Aus-

Die *micro 47G* von Graupner mit schräger Anordnung der Stabilisierungsstange am oberen Rotor.



Abbildung 16

lenkung von nur 45 Grad besteht. Darum muss auch die Stabilisierungsstange nur um 45 Grad dem Rotor voreilen, was konstruktiv genau so ausgeführt ist. Das erklärt die vielleicht überraschende unsymmetrische Anordnung der Stabilisierungsstange beim oberen Rotor.

Bei der *Hiller UH-12B* wird der zyklische Pitch nicht direkt auf die Rotorblätter übertragen, sondern indirekt über die so genannten Hillerpaddel. Auch wenn sich die originale Hiller-Version von der später von Dieter Schlüter zum Patent angemeldeten Version in Details unterscheidet, wird die Funktionsweise an der vereinfachten Version aus seiner Patentschrift (Abbildung 17) beschrieben. (Diese Version war für Rotoren ohne kollektiven Pitch gedacht. Wenn auch noch ein kollektiver Pitch vorhanden ist, wird die Mechanik der Ansteuerung komplizierter, aber für das Verständnis der Steuerung reicht dieses Modell völlig aus.)

An der Stabilisierungsstange sind jetzt Paddel angebracht. Die Stange ist kippbar auf der Rotorachse gelagert. Senkrecht zur Stange befinden sich die Rotorblätter, die ebenfalls gemeinsam kippbar gelagert sind. Die zyklische Verdrehung der Hauptrotorblätter ist an die Kippbewegung der Paddelstange gekoppelt. Wenn keine Steuerung durchgeführt wird, dann wirkt das Hiller-System zunächst wie eine Bell-Stabilisierungsstange.

Die Steuerung (zum Beispiel ein Einleiten einer Nickbewegung nach vorne) funktioniert so: Zunächst wird durch ein Kippen der Taumelscheibe ein zyklischer Pitch auf die Hillerpaddel gegeben. Der größte Anstellwinkel tritt seitlich bei dem Paddel auf, das nach hinten läuft. Das Kippen der Rotationsebene der Hillerpaddel geschieht wie zuvor beschrieben mit einer Phasenverschiebung von 90 Grad (im Prinzip ist das Paddel ein Miniatur-Rotor, der kippbar gelagert ist). Dadurch kippt die Hilfsrotorebene nach vorne. Dieses Kippen bewirkt durch die Kopplung an den zyklischen Pitch der Hauptrotorblätter, dass deren Anstellwinkel ebenfalls seitlich am größten ist, und zwar am rücklau-

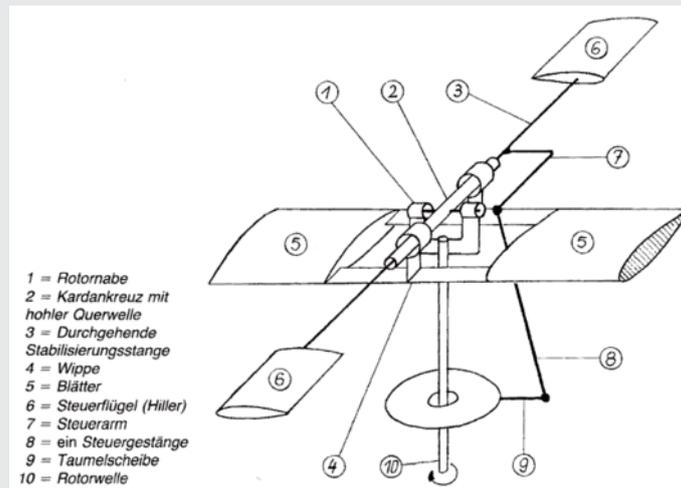


Abbildung 17 Kippbarer Rotor mit indirekter Ansteuerung über die Paddel (aus der Patentschrift von Dieter Schlüter).

fenden Blatt. Die Kippbewegung der Hauptrotorblätter erfolgt dann auch mit einer Phasenverzögerung von 90 Grad, die Rotorebene des Hauptrotors wird also auch nach vorne gekippt. Dies bewirkt dann schließlich, dass der Auftriebsvektor nach vorne geneigt ist, was das Drehmoment zur Einleitung der Nickbewegung zur Folge hat.

Die Steuerbefehle des Piloten wirken also zweifach indirekt. Zunächst kippt die Hilfsrotorebene durch die zyklische Änderung des Anstellwinkels der Paddel nach vorne. Dadurch wird der Anstellwinkel der Hauptrotorblätter geändert, was zu einem Kippen der Hauptrotorebene führt. Diese Verzögerung führt letztendlich zu einem trägeren System, das einfacher zu steuern ist.

Den stabilisierenden Einfluss der Stange und das Träger-Machen des Systems durch die indirekte Ansteuerung mit den Hillerpaddeln kann als mechanischer Regelmechanismus angesehen werden. Diese Regelung kann man auch elektronisch realisieren. Hierzu benötigt man einen Sensor, der die Drehbewegungen des Hubschraubers um die Längs- und Querachse misst. Ausgehend von diesem Sensor-Signal kann dann der zyklische Pitch verändert werden, um den Heli zu stabilisieren. Dabei können mit verschiedenen Einstellungen des Reglers verschiedene Charakteristiken, wie sie zum Beispiel durch die Länge und das Gewicht der Stabilisierungsstange definiert werden, simuliert werden. Genau das ist übrigens im V-Stabi-System (Abbil-

dung 18) von Mikado realisiert, bei dem die Rotoren ohne Paddelstange auskommen.

Der Standard-Rotor von Modellhubschraubern

Wenn man sich vor Augen führt, wie die Steuerung bei den heutigen zweiblättrigen Modellhubschraubern aussieht, dann stellt man fest, dass die Rotoren zwar Hillerpaddel haben, die kippbar gelagert sind, aber die Hauptrotorebene ist starr und kann nicht kippen. (Wie zuvor betrachten wir Idealfälle. In der Praxis sind die Rotorblätter oft mit Dämpfungsgummis gelagert, so dass eine gewisse Elastizität vorhanden ist.) Das Kippen der Hillerpaddelebene bewirkt wieder eine Änderung des zyklischen Pitches, aber die Rotoren können nicht (manchmal nur durch etwas Spiel) kippen. Auch die Elastizität der Blätter spielt für eine Durchbiegung keine große Rolle, denn die Rotoren werden mit relativ hohen Drehzahlen betrieben, so dass die Zentrifugalkräfte ein Durchbiegen der Blätter fast vollständig ausschließen. Wie funktioniert also die Steuerung?

Das Einleiten einer Nickbewegung geschieht zunächst so, wie es beim kardanisch gelagerten Rotor oben beschrieben wurde. Wenn die Ebene der Hillerpaddel nach vorne kippt, dann führt das zu einer zyklischen Änderung des Anstellwinkels der Hauptrotorblätter, so dass der größte Anstellwinkel beim rück-

Es geht auch ohne Stabilisierungsstange mit Hilfe einer elektronischen Lösung, hier zum Beispiel V-Stabi (Mikado) im LOGO 10. Die Elektronik sitzt auf dem Empfänger, der Drehratensensor wurde auf dem Heckrotorservo befestigt.

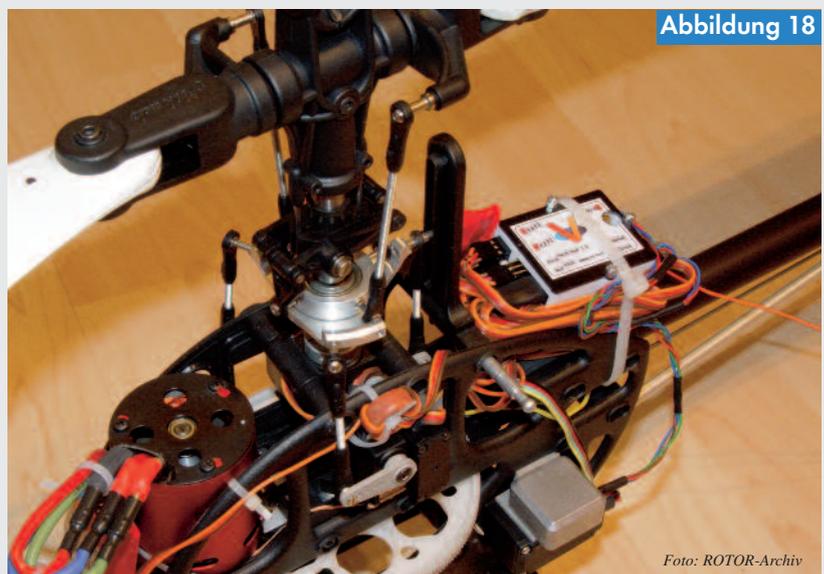


Abbildung 18

Foto: ROTOR-Archiv

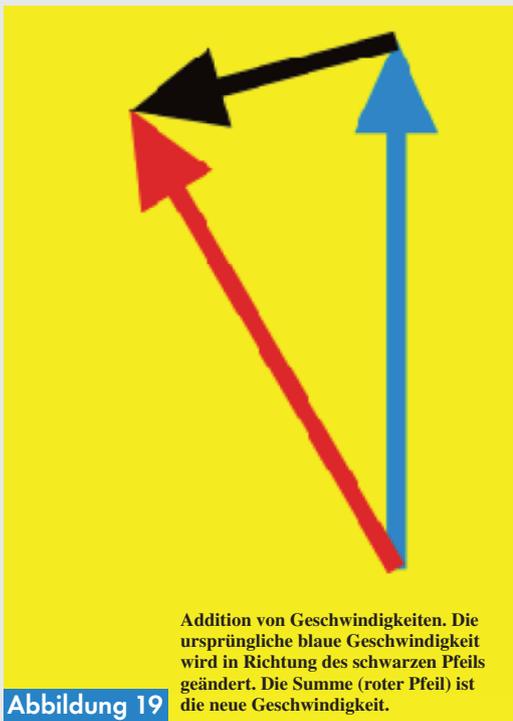


Abbildung 19

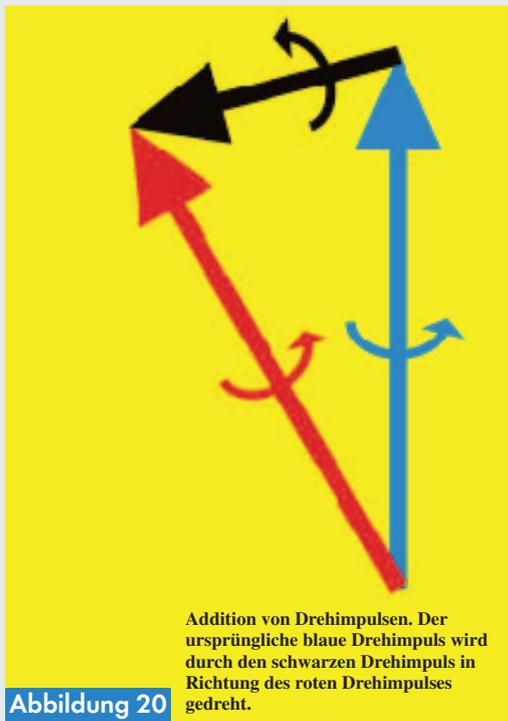


Abbildung 20

laufenden Blatt ist. So entsteht ein Drehmoment um die Längsachse des Helikopters.

Das so erzeugte Drehmoment um die Längsachse des Hubschraubers bewirkt jetzt aber ein Drehen des Hubschraubers um die Querachse. Dieser Effekt erscheint zunächst überraschend, denn beim Flugzeug ist das Verhalten wie erwartet: Durch die Anstellung der Querruder wird ein Drehmoment um die Längsachse erzeugt, und das Flugzeug reagiert mit einer Rollbewegung, also eine Drehung um die Längsachse. Wieso verhält sich der Hubschrauber anders? Der Unterschied liegt darin, dass das Drehmoment auf den sich dre-

henden Rotor wirkt, und dann kommt der Effekt zum Tragen, der häufig als Kreiseffekt beschrieben wird.

Dieser Effekt ist nicht so schwer zu verstehen, und soll darum hier motiviert werden. Wir gehen zunächst von der Newtonschen Bewegungsgleichung aus, die man als »Kraft ist Masse mal Beschleunigung« kennt. Umgekehrt kann man auch sagen, dass eine Kraft eine Beschleunigung in die gleiche Richtung erzeugt. So wird zum Beispiel ein Flugzeug durch den Schub, den der Propeller erzeugt, nach vorne beschleunigt. Wirkt die Kraft nicht in die vorhandene Bewegungsrichtung, dann ändert sich die

Richtung des Objekts. Ein Beispiel hierzu sind die Steurdüsen an einem Raumschiff, die eine Richtungsänderung bewirken. Mathematisch wird das durch die Addition von Pfeilen dargestellt (siehe Abbildung 19).

Drehbewegungen werden ebenfalls durch einen Richtungspfeil dargestellt. Der Pfeil zeigt dabei in Richtung der Drehachse. Dabei verwendet man folgende Konvention: Der Pfeil zeigt jeweils in die Richtung, für die das Drehen im Uhrzeigersinn stattfindet (die so genannte Korkenzieherregel). Das Newtonsche Gesetz für Drehbewegungen lautet nun: Drehmoment ist Trägheitsmoment mal Drehimpulsänderung. Mit anderen Worten: Der Drehimpuls ändert sich beim Angreifen eines Drehmoments in Richtung des Drehmoments. Diese Richtungsänderung muss aber nun mit Hilfe der erklärten Pfeile interpretiert werden. Ein Beispiel findet man in Abbildung 20: Der blaue Drehimpuls ändert seine Richtung zum roten Drehimpuls durch das Angreifen des schwarzen Drehmoments.

Diese Vektoraddition funktioniert beim Hubschrauber so, wie es in Abbildung 21 skizziert ist: Der Rotor dreht links herum, also zeigt sein Drehimpuls nach oben. Nun nehmen wir an, dass der Anstellwinkel durch die zyklische Blattverstellung auf der rechten Seite, also beim vorlaufenden Blatt am größten ist. Dadurch entsteht ein Drehmoment in Rollrichtung des Hubschraubers, und zwar von hinten gesehen links herum, also zeigt der Pfeil des Drehmoments nach hinten. Nun wird der Drehimpuls (grün) und die Wirkung des Drehmoments (schwarz) addiert. Heraus kommt der rote Pfeil, der Drehimpuls wurde also nach hinten gekippt. Mit anderen Worten, der Hubschrauber führt eine Nickbewegung nach oben aus.

Fazit

Es wurden verschiedene Rotorsysteme beschrieben und erklärt, wie eine Steuerung bei diesen Systemen funktioniert. Dazu wurden zwei verschiedene Methoden verwendet: Einerseits wurde die Dynamik der Blätter (Schlagbewegung der Blätter und Kippbewegung der Rotorebene) sowie das Prinzip der Erhaltung des Drehimpulses verwendet. Es sei noch einmal betont, dass die Darstellungen möglichst einfach gehalten wurden und dass jeweils »Ideal-Systeme« betrachtet wurden. In der Realität findet häufig eine Vermischung der Effekte statt. So sind zum Beispiel die Rotoren bei den Modellhubschraubern oft nicht vollständig starr gelagert, sondern haben ein gewisses Spiel und eine gewisse Steifigkeit in der Lagerung. Auch wurde bei den Erklärungen stets der eingeschwingene Zustand betrachtet.

Michael Schreiner

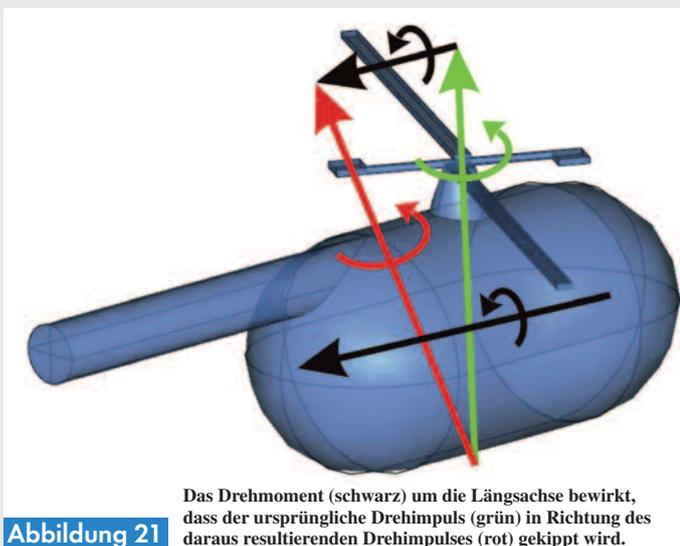


Abbildung 21

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