Physik in unserer Zeit 25/2, 79 (1994)

Der Flug des geflügelten Samens

H. Joachim Schlichting Christian Ucke

Zahlreiche Pflanzensamen sind mit besonderen Einrichtungen zum passiven Fliegen ausgestattet, um eine möglichst großräumige Ausbreitung der Arten zu gewährleisten. Unter den verschiedenen Flugeinrichtungen fallen vor allem der Ahornsamen und ähnlich konstruierte Schraubenflieger durch ihren ästhetisch ansprechenden Sinkflug auf.

Die Spirale des Ahornsamens

Aus welcher Lage auch immer ein Ahorn- oder anderer Samenflieger startet, stets findet er sich nach einem mehr oder weniger kurzen Sturzflug in eine spiral- bzw. schraubenförmige Rotationsbewegung ein (Schraubenflieger) und sinkt auf diese Weise gemächlich zu Boden. Dieser allgemeine Bewegungsablauf erfährt aufgrund kleiner Unterschiede im Design der einzelnen Schraubenflieger (auch derselben Art) zu einer individuellen Ausgestaltung der konkreten Flugbahn: Während sich manche Flieger auf einer ziemlich geraden Bahn zu Boden schrauben, winden sich andere auf ziemlich verschlungenen Pfaden hinab, die ihrerseits mehr oder weniger einfache Spiralen darstellen (Bild 1).

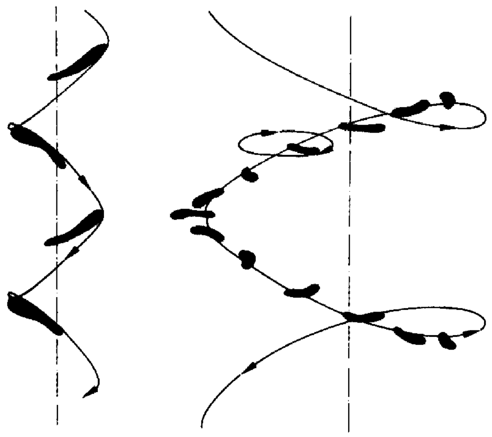

Bild 1: Jeder Samenflieger gestaltet den spiralförmigen Sinkflug individuell aus. Neben exakt senkrechten Bahnen beobachtet man Bahnen, die ihrerseits die Form einer Spirale haben.

Was fasziniert uns an der Bewegung der Schraubenflieger? Ist es der Kontrast zwischen gemächlichem Sinken und relativ schneller Rotation, der in einer kohärenten Bewegungsstruktur aufgehoben wird? Oder ist es nur die Regelmäßigkeit, mit der sich die Bewegung der Samen von der Bewegung unregelmäßig zu Boden torkelnder Blätter unterscheidet?

Vom kometenhaften Sturz zum spiralförmigen Gleitflug

Im Unterschied zu Blättern besitzt der Schraubenflieger einen kompakten Kern, in dem der größte Teil der Masse konzentriert ist und einen leichten propellerartigen Flügel, in den der Kern organisch übergeht Wie ein Komet, den Kern vorweg, den Flügel als Schweif hinter sich herziehend beginnt der Flieger seine Bewegung. Dieser Sturzflug findet sein jähes Ende dadurch, dass der Samen sich plötzlich flach legt und in eine Drehung um eine durch den Kern gehende Achse übergeht. Auf diese Weise gelingt es dem Samen nicht nur, sich der Luftströmung mit seiner größten Querschnittsfläche darzubieten, sondern diese darüber hinaus aufgrund der Rotation über eine noch größere Kreisfläche zu verschmieren. Dadurch wird der Luftwiderstand maximal und die Sinkgeschwindigkeit minimal.

Wie gelingt es den Ahorn- und anderen Flugsamen gewissermaßen aus sich heraus, eine derart raffinierte Bewegungsfigur zu organisieren (Selbstorganisation)? Auf welche Weise wird diese Bewegungsfigur gegen äußere Störungen stabilisiert?

Ein Papierhubschrauber als Modell

Zur Beantwortung dieser Fragen betrachten wir ein geometrisch einfaches Modell, einen mit wenigen Handgriffen herzustellenden Papierhubschrauber (Bild 2). Läßt man diesen Hubschrauber aus einigen Metern Höhe fallen, so geht er nach einem mehr oder weniger kurzen Sturzflug, bei dem die Flügel senkrecht ausgerichtet bleiben, ähnlich wie der Schraubenflieger plötzlich unter starker Abbremsung und Einsetzen einer Drehung um die eigene Achse in einen gleichförmig rotierenden Gleitflug über. Entgegen der naiven Erwartung, dass aufgrund der vom Hubschrauber erfahrenen Luftströmung die beiden Flügel zusammengedrückt werden, beobachtet man im Gegenteil eine Öffnung der Flügel und damit eine Vergrößerung der Querschnittsfläche des Fliegers.

Symmetriebruch

Entscheidend für den abrupten Wechsel der Bewegungsfigur ist der Symmetriebruch, der mit der Spreizung der Flügel einhergeht. Dadurch dass die Flügel gegeneinander versetzt sind, wird der anfängliche Bewegungszustand des senkrechten Sturzfluges instabil. Bereits kleinste, durch zufällige Störungen hervorgerufene Auslenkungen lassen Luftkräfte wirksam werden, die ein Drehmoment M_Z um die senkrechte Achse und damit eine - wenn auch zunächst sehr kleine - Drehung bewirken. Je nachdem, ob aufgrund einer solchen Störung zufällig der linke oder der rechte Flügel nach hinten gedrückt wird, kommt es zu einer Links- oder Rechtsdrehung. Der Zufall wird also gewissermaßen in Form der Drehrichtung konserviert. Entscheidend ist, dass sich jede noch so kleine Drehung zwangsläufig zu einer veritablen Rotation aufschaukelt. Denn aus der Sicht des Fliegers wird durch eine Drehung der Flügel eine Zentrifugalkraft wirksam, die zu einer weiteren Öffnung der Flügel führt. Infolgedessen wächst die von der Luftströmung getroffene Querschnittsfläche und die Luftkraft auf die Flügel, wodurch wiederum das antreibende Drehmoment und die Drehgeschwindigkeit zunimmt.

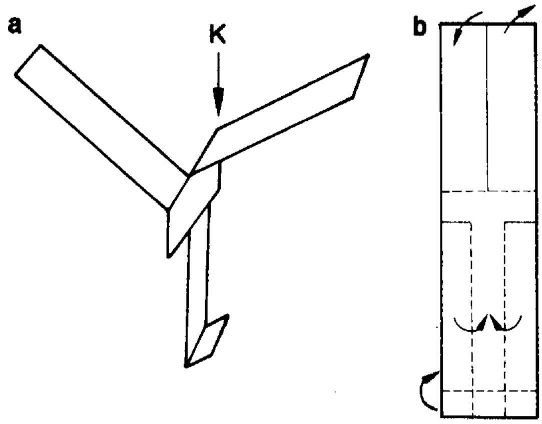

Bild 2: Der Papierhubschrauber rotiert mit ausgebreiteten Flügeln um die senkrechte Achse (recht). Anleitung zur Konstruktion aus einem Papierstreifen.

Die Grenzen des Wachstums

Dem Wachstum der Drehgeschwindigkeit sind aber Grenzen gesetzt. Zum einen nimmt das Drehmoment M_Z immer langsamer mit wachsendem α zu, erreicht ein Maximum und nimmt dann wieder ab. Es würde bei vollständig geöffneten Flügeln (horizontale Ausrichtung) sogar ganz verschwinden. Der Grund für dieses Verhalten ist darin zu sehen, dass an dem Drehmoment M_Z, welches die Flügel öffnet, nur die senkrecht zur Flügelfläche orientierte Komponente der horizontal nach außen wirkenden Zentrifugalkraft beteiligt ist. Und diese Komponente wird natürlich umso kleiner, je mehr sich die Flügel der horizontalen Lage nähern (Bild 3). Zum anderen baut sich mit zunehmendem Öffnungswinkel α und infolgedessen größer werdender "Angriffsfläche" für die Luftströmung eine Luftwiderstandskraft auf. Dadurch wird einerseits ein M_Z entgegenwirkendes Drehmoment M_L hervorgerufen, das die Flügel zusammenzudrücken trachtet. Andererseits wird auf diese Weise aber auch der Flieger weiter abgebremst und langsamer. Diese Abnahme der Sinkgeschwindigkeit begrenzt nun ihrerseits die Luftwiderstandskraft und trägt dazu bei, dass M_L zunächst langsamer wächst als M_Z (Bild 4). Weil M_Z aber schließlich mit zunehmendem Öffnungswinkel α wieder abnimmt, wird es von M_L "überholt" und begrenzt, wodurch ein stationärer Öffnungswinkel α_{st} eingeregelt werden kann. Entscheidend für diesen Regelvorgang ist offenbar die nichtlineare Charakteristik der gegeneinanderwirkenden Drehmomente.

Der Schraubenflieger als einflügliger Hubschrauber

Interessant ist nun, dass der Hubschrauber seinen Dienst auch dann noch versieht, wenn man einen Flügel (an der Kante K in Bild 2) abschneidet. Weil durch den Verlust eines Flügels die Asymmetrie als wesentliche Voraussetzung für die Rotation bestehen bleibt, rotiert der Einflügler - wenn auch insgesamt etwas labiler - um eine im Vergleich zum Zweiflügler leicht verschobene Achse. Da der Ein-

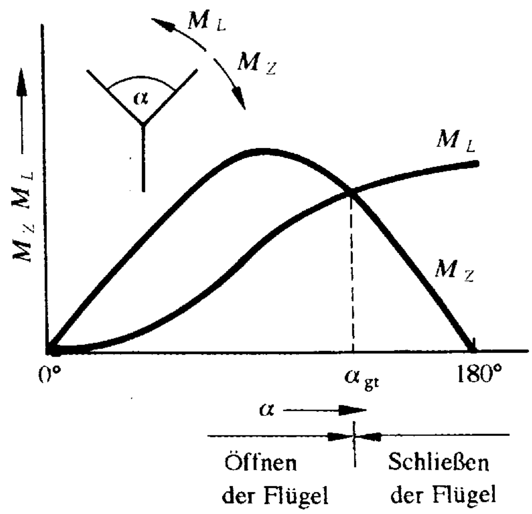

Bild 3: Darstellung des Größe der Drehmomente M_L und M_Z in Abhängigkeit vom Öffnungswinkel a Bei kleinen Winkeln überwiegt zunächst das die Flügel öffnende Drehmoment Mz. Später dominiert das die Flügel schließende Drehmoment M_Z. Das Gegeneinanderwirken beider Drehmomente führt zur Einregelung eines stationären Öffnungswinkels α_st.

flügler den Ahorn- und anderen Flugsamen sehr ähnlich ist - in beiden Fällen haben wir es mit einem Flügel zu tun, der asymmetrisch in einen kompakteren Teil ausläuft, hier in den dreilagigen umgefalzten Papierstamm dort in den Samenkern - läßt sich die Erklärung des Schraubenflugs beim Hubschrauber auf einfache Weise auf den Flugsamen übertragen: Der Samen fällt zunächst mit dem Kern vorweg.

Die kleinste seitliche Auslenkung des Flügels führt zu einer resultierenden Horizontalkomponente der Luftkraft, wodurch ein Drehmoment und damit eine Drehung hervorgerufen wird. Die Drehung führt dann aus Trägheit dazu, dass sich der Schraubenflieger flachlegt.

Bleibt die Frage, warum die Natur Gebilde wie den Schraubenflieger und damit Bewegungsfiguren hervorbringt, von denen nicht nur ein ästhetischer Reiz ausgeht, sondern die darüber hinaus ein physikalisch faszinierendes Phänomen darstellen? Aus naturwissenschaftlicher Perspektive läßt sich nur folgende Antwort geben: Mit Hilfe der Rotation gelingt es dem Schraubenflieger, die Flügelfläche optimal dem Luftstrom auszusetzen und die Sinkgeschwindigkeit unter den gegebenen Bedingungen zu minimieren. Auf diese Weise bleibt der Flieger verhältnismäßig lange in der Luft und erlangt die Chance, durch Winde weit vom Baum weggetragen zu werden. Im Sinne des Darwinismus ist darin eine wichtige Voraussetzung einer möglichst großen Verbreitung der Art zu sehen.

Übrigens: Die Ähnlichkeit des Ahornsamens mit einer Vogelfeder, insbesondere die für den Spiralflug wesentliche Asymmetrie verleitete uns dazu, Federn wie Ahornsamen fallenzulassen. Mit Überraschung konnten wir feststellen, dass die meisten Federn auch wie Ahornsamen fielen: sie schraubten sich gemächlich dem Boden entgegen. Wir glauben indessen sicher zu sein, dass die Vögel sich nicht auf diese originelle Weise fortpflanzen.

Auch als Spielzeug aus Plastik sind Ahorn- Propeller zu erhalten [3]. Er kann mit einem Gummiband in die Luft geschossen werden und sinkt dann in der oben beschriebenen Weise gemächlich rotierend zu Boden.

Die Sinkgeschwindigkeit des Rotors

Um einen Eindruck vom Einfluß der für den Luftwiderstand wirksamen Querschnittsfläche zu gewinnen, schätzen wir die Sinkgeschwindigkeiten ab, die ein Ahornsamen a) im Falle des Sturzfluges, b) im Falle einer waagerechten Ausrichtung des Samens einnehmen würde und c) im Falle der Rotation annimmt. Dabei ergibt sich die jeweils wirksame Fläche in den Fällen a) bzw. b) aus einer projektion des senkrecht (A_2) bzw. waagerecht (A_1) ausgereichteten Samens und im falle c) aus dem bei der Rotation überstrichenen Kreis vom Radius r ($A_3 = \pi r^2$).

Die Sinkgeschwindigkeit *v* stellt sich dann ein, wenn die Schwerkraft $G = mg$ durch die *Luftwiderstandskraft* $F = 1/2\, c_W\, \rho\, A\, v^2$ kompensiert wird:

$$v = \sqrt{\frac{2mg}{c_W\, \rho A}}\,.$$

Dabei sind A, c_W, ρ und g Querschnittsfläche, Luftwiderstandsbeiwert (den wir im folgenden gleich 1 setzen), Dichte der Luft und Erdbeschleunigung.

Wir nehmen für einen Flügel folgende Werte an: Masse m = 0,35 g, Länge l = 5 cm, Fläche A_1 = 7,9 cm^2, Fläche A_2 = 0,25 cm^2, Kreisradius r = 4 cm, $\rho = 1{,}2 \cdot 10^{-3}$ g/cm^3. Dann ergibt sich im Falle a) v_a = 14,7 m/s, im Falle b) v_b = 2,6 m/s und im Falle c) v_c = 1,0 m/s. Der von uns gemessene Wert beträgt v = 0,9 m/s.

Literatur

[1] Schlichting, H. J., Rodewald, B.: Papierhubschrauber. Praxis der Naturwissenschaften - Physik 35/5, 30, (1986)

[2] Hertel, H.: Struktur, Form, Bewegung; Mainz: Krauskopf 1963, S. 88ff

[3] Physik- Boutique. Stark- Verlag, D-95318 Freising.