

16

Der Hubschrauber

Hubschrauber gehören zu den faszinierendsten Fluggeräten: Sie können wie Kolibris in der Luft stehen, ohne Startbahn abheben, punktgenau landen und extrem wendige Manöver fliegen. Zwar ist die Idee des Hubschraubers bereits Jahrhunderte alt, realisiert wurden die ersten funktionsfähigen Hubschrauber aber erst vor ca. 80 Jahren – denn so einfach, wie es aussieht, ist das Fliegen mit Rotoren nicht.

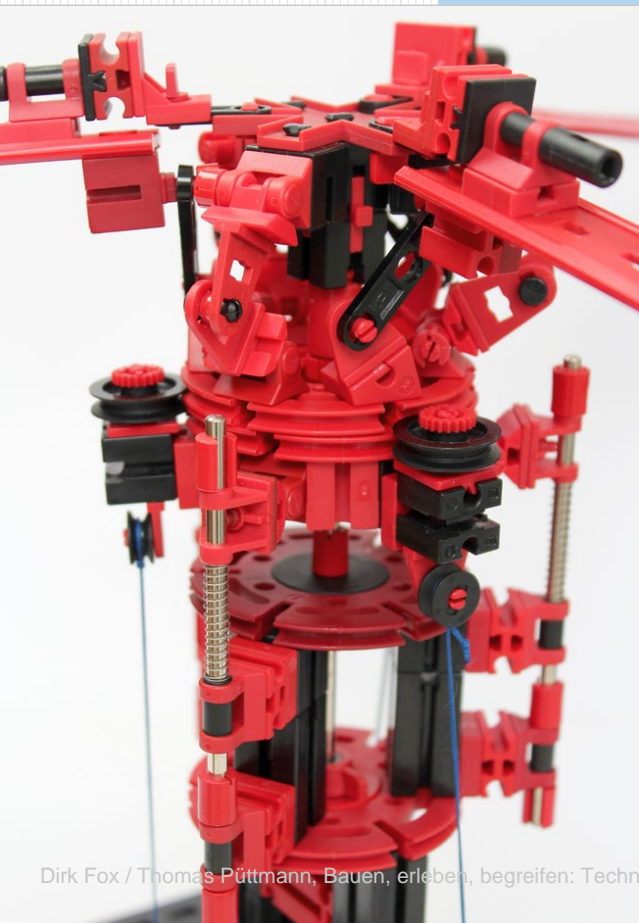




Abb. 16-1 »Luftschrauber« von Leonardo da Vinci
(ca. 1483)

eine archimedische Schraube in die Luft hineinzudrehen und auf diese Weise abzuheben.

Das Konstruktionsprinzip heutiger Hubschrauberrotoren ist zudem erheblich älter: Dokumente belegen, dass es schon mehr als 1000 Jahre früher, im vierten Jahrhundert unserer Zeitrechnung, in China Kinderspielzeuge gab, die der Gestalt des Ahornsamens nachempfunden waren und die Funktionsweise eines Hubschrauberrotors modellieren. Ähnliche Spielzeuge sind in Europa seit dem 14. Jahrhundert bekannt. Mit etwas Geschick kann man sie mit Vogelfe-

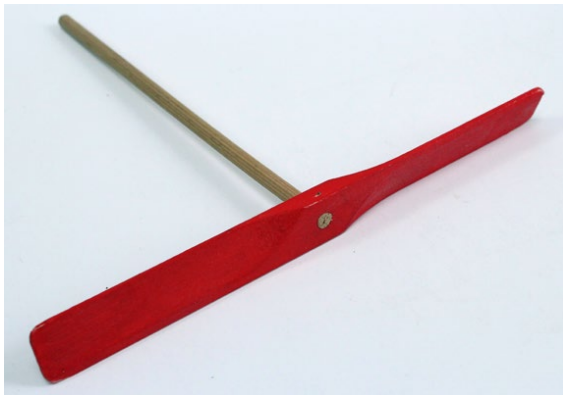


Abb. 16-2 Holzrotor-Spielzeug

Die Idee des Hubschraubers wird gemeinhin *Leonardo da Vinci* (1452–1519) zugeschrieben. So fand man in den Skizzen dieses genialen Florentiner Universalgelehrten – dem wir nicht nur Kunstwerke wie die *Mona Lisa* oder *Das letzte Abendmahl* verdanken, sondern auch zahlreiche technische Erfindungen (wie im fischertechnik-Baukasten *Da Vinci Machines*) – die Konstruktionszeichnung eines »Luftschraubers«.

Tatsächlich konnte dieser Luftschrauber (Abb. 16-1) nicht funktionieren. Die Idee von Leonardo da Vinci war, den »Luftschrauber« wie

eine archimedische Schraube in die Luft hineinzudrehen und auf diese Weise abzuheben. Das Konstruktionsprinzip heutiger Hubschrauberrotoren ist zudem erheblich älter: Dokumente belegen, dass es schon mehr als 1000 Jahre früher, im vierten Jahrhundert unserer Zeitrechnung, in China Kinderspielzeuge gab, die der Gestalt des Ahornsamens nachempfunden waren und die Funktionsweise eines Hubschrauberrotors modellieren. Ähnliche Spielzeuge sind in Europa seit dem 14. Jahrhundert bekannt. Mit etwas Geschick kann man sie mit Vogelfe-

dern, einem Korkestück und einem Schaschlik-Spieß nachbauen: Dreht man den Speiß schnell zwischen den Händen an, fliegt der kleine Rotor durch die Luft. Aus Holz kann man einen solchen Rotor auch kaufen (Abb. 16-2); es gibt ihn sogar mit Halterung und »Startschnur«, die um den Stab gewickelt wird. Zieht man am Schnurende, wickelt sich die Schnur ab und versetzt den Stab in eine schnelle Rotation – und der *Drehflügler* hebt ab.



Dynamischer Auftrieb

Warum aber fliegt ein solcher Rotor? Das ist keineswegs selbstverständlich. Denn der Rotor ist schwerer als Luft – anders als ein Luftschild (Heißluftballon, Gasballon oder Zeppelin) sorgt also nicht eine geringere Dichte für Auftrieb.

Neben einem solchen *statischen Auftrieb*, auch als *archimedisches Prinzip* bekannt (die verdrängte Luft ist schwerer als das verdrängende Objekt), gibt es noch einen *dynamischen Auftrieb*. Dieser ist das wesentliche Funktionsprinzip des Fliegens. Dynamischer Auftrieb entsteht, wenn ein flügelartiges Objekt sich durch ein Medium (z. B. Wasser oder Luft) bewegt. Die Form ist dabei entscheidend – vor allem der spitze Zulauf des Flügelquerschnitts am hinteren Ende (Abb. 16–3).

Vereinfacht lässt sich der Effekt wie folgt erklären: Bewegt sich das flügelartige Objekt schräg (also in einem Anstellwinkel) zur Bewegungsrichtung, strömt das Medium mit unterschiedlichen Geschwindigkeiten an der Oberfläche entlang: Unterhalb der Neigung entsteht ein Überdruck, da das Medium langsam strömt; oberhalb des geneigten Objekts strömt das Medium schneller, dort entsteht ein Unterdruck. Die Differenz zwischen Unter- und Überdruck erzeugt eine Auftriebskraft, die das Objekt, sofern es nicht zu schwer ist, nach oben drückt.

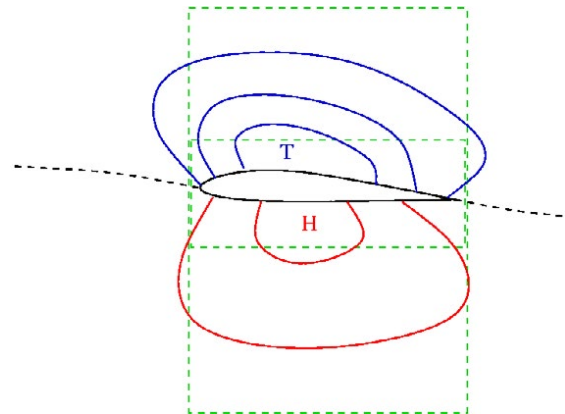


Abb. 16–3 Umströmtes Flügelprofil mit Über- und Unterdruck

Je schneller sich das Objekt im Medium bewegt, desto größer ist der Druckunterschied – und desto stärker der Auftrieb. Aus diesem Grund benötigt ein Flugzeug eine lange Startbahn, da die Flügel erst ab einer Mindestgeschwindigkeit genügend Auftrieb erhalten, um das Flugzeug zu tragen. Und aus demselben Grund benötigt ein Rennwagen einen Spoiler (gewissermaßen eine umgedrehte Tragfläche) – dieser »drückt« das Fahrzeug nach unten, damit der Auftrieb es nicht vom Boden abheben lässt. Damit kann ein Formel-1-Rennwagen theoretisch sogar an der Decke fahren – solange seine Geschwindigkeit nicht unter ca. 200 km/h sinkt.

Die Mindestgeschwindigkeit muss ein Flugzeug auch während des Fluges halten, damit es nicht zum *Strömungsabriss* kommt und das Flugzeug absackt oder gar ins Trudeln gerät. Aber auch zu schnell darf es nicht fliegen – erreicht es die Schallgeschwindigkeit, reißt die Strömung ebenfalls ab.

Und nicht nur die Geschwindigkeit kann Ursache für einen Strömungsabriss sein – auch der Anstellwinkel des Flügels ist kritisch, wenn er über einem von Flügel-form, Größe und Material abhängigen *Grenzwinkel* liegt (deutlich unter 45°).

Drehflügler

Bei einem Hubschrauber (*Drehflügler*) wird – im Unterschied zum Flugzeug – nicht das gesamte Flugobjekt bewegt, sondern nur die Flügel im Kreis – sie werden daher Rotoren genannt. Auch beim Rotor hängt die Stärke des Auftriebs von der Geschwindigkeit und der Neigung des Rotorblatts ab.

Da sich ein Rotorblatt an der äußersten Spitze sehr schnell durch die Luft bewegt – bei üblichen Rotordurchmessern von ca. 10 m und 400 Umdrehungen pro Minute mehr als 720 km/h – und es sich daher schon bei verhältnismäßig niedriger Fluggeschwindigkeit (ca. 350 km/h) der Schallgeschwindigkeit und damit der Gefahr eines Strömungsabrisse nähert, wird die Umdrehungsgeschwindigkeit des Rotors konstant gehalten. Damit ist die Höchstgeschwindigkeit eines Hubschraubers konstruktionsbedingt beschränkt.

Der Auftrieb wird allein über die Neigung des Rotorblatts gesteuert, auch Blattverstellung oder *Pitch* genannt.

Entwicklung

Eine zentrale Herausforderung bei der Konstruktion eines Hubschraubers ist der Drehmomentausgleich, der verhindert, dass sich der Hubschrauber unter dem Rotor um die Rotorachse dreht. Eine der ersten Konstruktionen, die das Drehmoment mit koaxialen Rotoren (zwei übereinander angeordneten Rotoren mit entgegengesetzter Drehrichtung) ausglich, stammt von dem russischen Universalgelehrten *Michail Lomonissow* (1711–1765). Die Idee der Blattverstellung geht angeblich auf den Amerikaner *Robert Taylor* zurück, der diese Erfindung 1842 dem Luftfahrtpionier Sir *George Cayley* (1773–1857) angeboten haben soll.

Im Jahr 1861 ließ *Gustave de Ponton d'Amecourt* (1825–1888) einen koaxialen Rotor (Abb. 16–4) patentieren. Dieses Prinzip wird heute noch bei kleinen ferngesteuerten Modellhubschraubern verwendet. *Gustav Wilhelm von Achenbach* (1847–1911) entwarf 1874 den ersten einrotorigen Hubschrauber mit einem Heckrotor zum Ausgleich des Drehmoments.

Der Bau funktionsfähiger Hubschrauber scheiterte jedoch daran, dass ausreichend leistungsfähige Dampfmaschinen zu schwer waren. Erst mit der Entwicklung des Verbrennungsmotors durch *Nicolaus August Otto* (1832–1891) um



das Jahr 1876 waren hinreichend starke und zugleich leichtere Motoren verfügbar.

Am 13.11.1907 gelang *Paul Cornu* (1881–1944) mit seiner Konstruktion eines »fliegenden Fahrrads« der erste anerkannte Drehflügler-Flug über 20 Sekunden mit zwei Tandemrotoren, die an Auslegern befestigt waren und gegenläufig angetrieben wurden. Weitere Fortschritte erzielte der Spanier *Raúl Pateras Pescara* (1890–1966), der 1924 einen steuerbaren Hubschrauber mit vier koaxialen Rotoren und zyklischer Blattverstellung konstruierte.

Sein Landsmann *Juan de la Cierva* (1895–1936) entwickelte einen *Tragschrauber*, ein einmotoriges Flugzeug mit einem zusätzlichen Rotor für den Auftrieb, der Anfang 1923 einen erfolgreichen Jungfernflug absolvierte. Da der Rotor vom Fahrtwind angetrieben wurde, benötigte er keinen Drehmomentausgleich.



Abb. 16–4 Modellhubschrauber von Gustave de Ponton d'Amecourt (1863)



Abb. 16–5 Hubschrauber FW 61 von Heinrich Focke (1937)

Der erste einsetzbare Hubschrauber, das Modell FW 61 des deutschen Ingenieurs und Gründers der Focke-Wulf-Werke *Heinrich Focke* (1890–1979), verwendete wie Cornus Konstruktion zwei getrennte Hauptrotoren zum Ausgleich des Dreh-

moments (Abb. 16–5). Focke präsentierte seinen Hubschrauber 1937 in der Berliner Deutschlandhalle und stellte einen Flugrekord von einer Stunde und 20 Minuten auf, der erst von Sikorsky im Jahr 1941 gebrochenen werden konnte.

Igor Sikorsky

Das Konstruktionsprinzip von Hubschraubern der heute verbreitetsten Bauart mit einem Haupt- und einem Heckrotor wurde erstmals erfolgreich von dem gebürtigen Ukrainer *Igor Sikorsky* (1889–1972) umgesetzt, der nach der Oktoberrevolution 1919 in die USA emigriert war. Dort gründete er 1923 die Sikorsky Aircraft Corp., einen bis heute führenden Hersteller von Hubschraubern.

Am 14.09.1939 gelang Sikorsky der Erstflug mit seinem Heckrotor-Hubschrauber. Mit dem weiterentwickelten Modell VS-300 stellte er am 06.05.1941 einen neuen Flugrekord von über 1,5 Stunden auf (Abb. 16–6).



Abb. 16–6 Rekordflug von Igor Sikorsky im VS-300 (06.05.1941)

Die Endversion des VS-300 erhielt einen 55-kW-Motor, eine einfache Blechverkleidung und Kufen. Ein Foto dieses ersten Erfolgsmodells zierte am 21.06.1943 die Titelseite des traditionsreichen *LIFE Magazine* für Fotojournalismus (Abb. 16–7).



Igor Sikorskys Heckrotor-Konstruktion setzte sich erfolgreich gegen andere Konzepte wie die Verwendung von Doppelrotoren durch. Nach Ende des Zweiten Weltkriegs entwickelte er zahlreiche nicht nur in den USA sehr erfolgreiche Hubschraubermodelle vor allem für die zivile Nutzung als Transport- und Rettungshubschrauber. Das *TIME Magazine* widmete Igor Sikorsky in der Ausgabe vom 16.11.1956 die Titelgeschichte (Abb. 16–8).

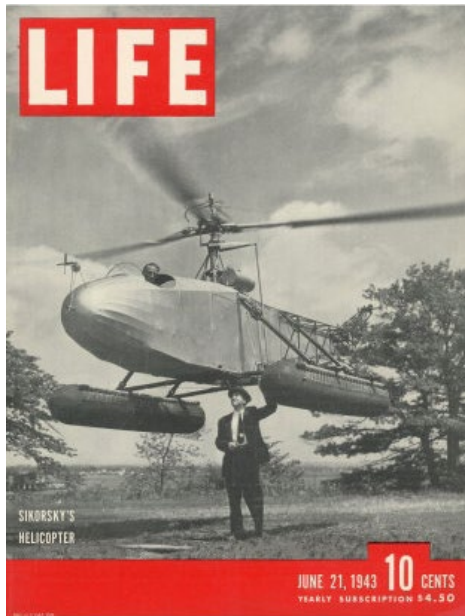


Abb. 16–7 Titelseite von LIFE von 21.06.1943

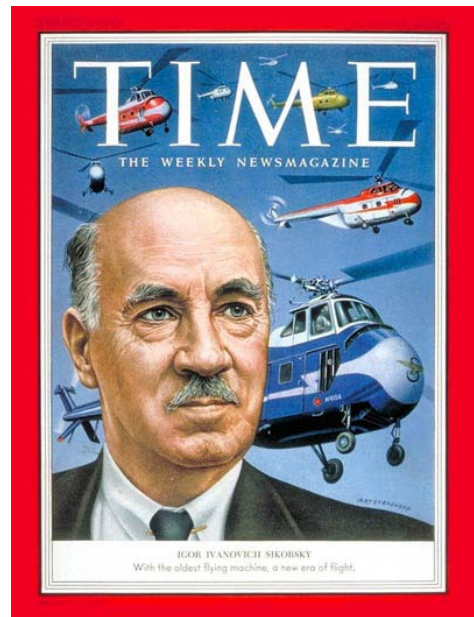


Abb. 16–8 Titelseite des TIME Magazine vom 16.11.1953

Für sein Lebenswerk als Pionier der Hubschraubertechnik wurde Igor Sikorsky im Jahr 1988 in den USA mit einer 36-ct-Luftpost-Briefmarke geehrt (Abb. 16–9).

So viel zur Geschichte des Hubschraubers. Wie aber funktioniert Sikorskys Hubschrauberkonstruktion in der Praxis? Das wird in den folgenden Abschnitten anhand eines fischertechnik-Funktionsmodells erläutert.

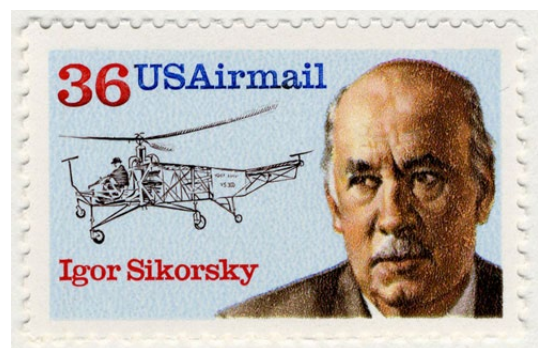


Abb. 16–9 36-ct-Briefmarke »Igor Sikorsky«

Funktionsmodell

Der Heckrotor

Zentrale Aufgabe des von Sikorsky entwickelten Heckrotors ist es, das Drehmoment des Hauptrotors auszugleichen, das sonst den Hubschrauber in entgegengesetzter Richtung um die Rotorachse rotieren lassen würde. Dazu wird der Heckrotor vertikal montiert. Auch dieser Rotor dreht sich mit fester Geschwindigkeit; die Neigung (der *Anstellwinkel*) der Rotorblätter sorgt für die richtige Gegenkraft. Durch Veränderung des Winkels richtet man den Hubschrauber in einer gewünschten Richtung aus.



Abb. 16–10 Steuerung des Anstellwinkels der Heckrotorblätter (Pitch)

Ein Funktionsmodell für einen Heckrotor findet sich in der Anleitung des fischertechnik-Baukastens *Technical Revolutions*. Abb. 16–10 zeigt eine für den Heckrotor optimierte Konstruktion, die stabiler und kompakter ist (und daher auch mit weniger Bauteilen auskommt).

Mit dem Zugseil werden zwei Bausteine 15 mit Bohrung (Lochsteine) auf der Rastachse verschoben. Der obere Lochstein ist über zwei I-Streben mit den Rotorblättern verbunden und dreht sich mit dem Rotor; wird er von dem unteren Lochstein angehoben, verändert sich der Neigungswinkel der Rotorblätter. Die Rückstellung des oberen Lochsteins übernimmt eine Druckfeder 30.

Die Steuerung des Pitches wird dabei im Modell – wie in einem echten Hubschrauber-Cockpit – durch zwei Fußpedale vorgenommen, die mit einem Seilzug über Umlenkrollen mit dem Stellhebel verbunden sind (Abb. 16–11).



Hauptrotor mit Taumelscheibe

Wie beim Heckrotor kann man auch beim Hauptrotor durch die gleichzeitige Änderung des Anstellwinkels der Rotorblätter (*kollektive Blattneigung*) den Auftrieb und damit das Steigen bzw. Sinken des Hubschraubers steuern. Wie aber lässt sich ein Richtungsflug erreichen?

Das gelingt mit dem vom dänischen Uhrmacher *Jakob Christian Ellehammer* (1871–1946) 1912 entwickelten Prinzip der *zyklischen Blattverstellung*. Dabei wird die Neigung der Rotorblätter während der Drehung des Rotors in einem zyklischen Ablauf verändert. Das führt dazu, dass an der Stelle mit dem steilsten Anstellwinkel der Rotorblätter der Auftrieb am größten ist. Dadurch neigt sich die Rotorebene und der Hubschrauber fliegt in die Richtung des kleinsten Anstellwinkels. Leider wurde der Hubschrauber-Prototyp, mit dem Ellehammer diesen Rotor am 18.09.1912 präsentierte, noch im gleichen Jahr bei einem Absturz vollständig zerstört und ist daher nicht erhalten.

Mit derselben zyklischen und kollektiven Blattneigung arbeitete auch der Hubschrauber-Prototyp des gebürtigen Argentiniers *Raúl Pateras Pescara* (1890–1966), der mit zwei coaxialen Doppelrotoren und einem 180 PS starken Motor am 18.04.1924 einen Flugrekord über 4 Minuten und 11 Sekunden aufstellte.

Bis heute verwenden Hubschrauber die zyklische Blattneigung für den Richtungsflug. Wie aber kann man die Blattneigung eines Rotorblatts während der Umdrehung des Rotors in einem festen Verlauf ändern?

Die verbreitetste Lösung ist die so genannte *Taumelscheibe*. Sie ist beim Hauptrotor das, was die Lochsteine in unserem Funktionsmodell des Heckrotors sind: die Komponente, die über eine Verbindung mit den Rotorblättern deren Neigung verändert. Der wesentliche Unterschied zu den Lochsteinen besteht darin, dass die Taumelscheibe in alle Richtungen beweglich sein muss – auf immer derselben Höhe. Dazu darf sie nicht mit der Achse verbunden sein, sondern muss lose um sie herum »taumeln«. Dennoch muss sie so stabil mit den Rotorblättern verbunden sein, dass sie auch bei hoher Umdrehungszahl nicht nachläuft und dadurch die Neigungswinkel der Rotorblätter verändert. Abb. 16–12 zeigt die Taumelscheibe in Sikorskys Patent US 1.994.488 vom 19.03.1935.

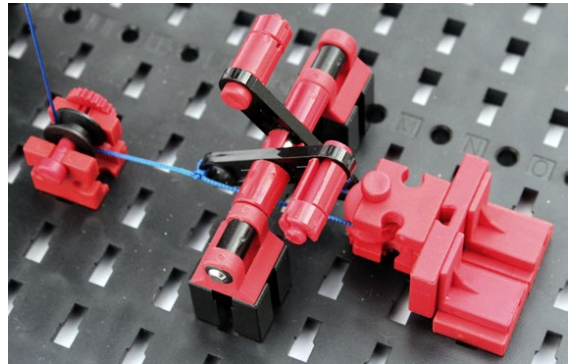


Abb. 16–11 Fußpedale zur Steuerung des Heckrotor-Pitches

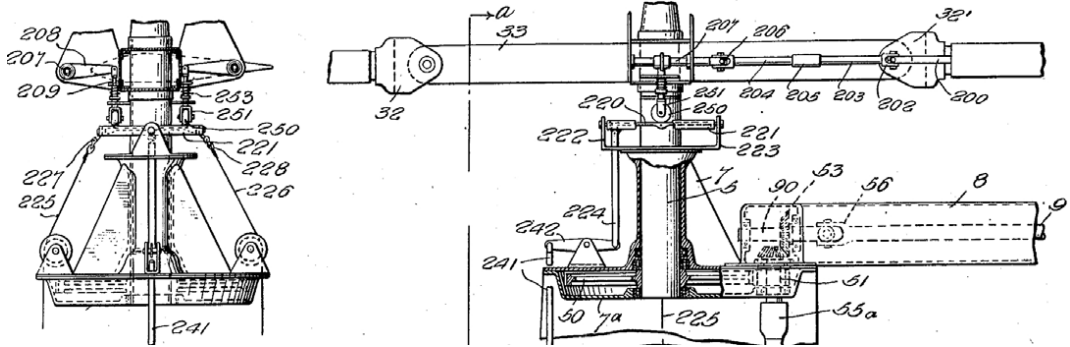


Abb. 16-12 Taumelscheibe im Patent von Igor Sikorsky vom 19.03.1935 (Patent No. US 1.994.488)

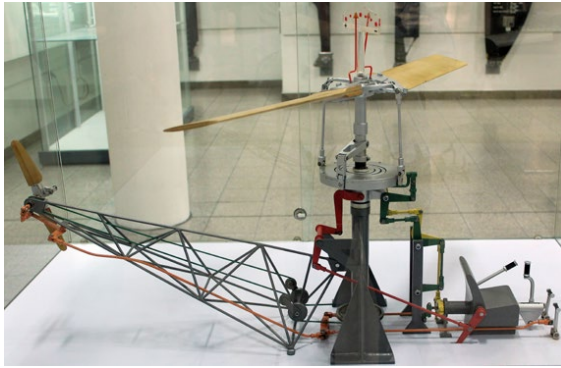


Abb. 16-13 Modell einer Taumelscheibe (Deutsches Museum, München)

Im Deutschen Museum in München kann man die Arbeitsweise einer Taumelscheibe sehr schön an einem Funktionsmodell ausprobieren (Abb. 16-13).

Mit fischertechnik gelingt die Konstruktion eines Hauptrotors mit Taumelscheibe, indem man eine Drehscheibe 60 ohne Nabe um die Rotorachse legt – und diese über I-Streben mit den Rotorblättern verbindet. Die Verwindungssteifigkeit erreicht man durch zwei – mit einem Verbindungsstopfen und einem Abstandsring stabil verbundene – auf Gelenkwürfeln gelagerte Kupplungsstücke (Abb. 16-14).

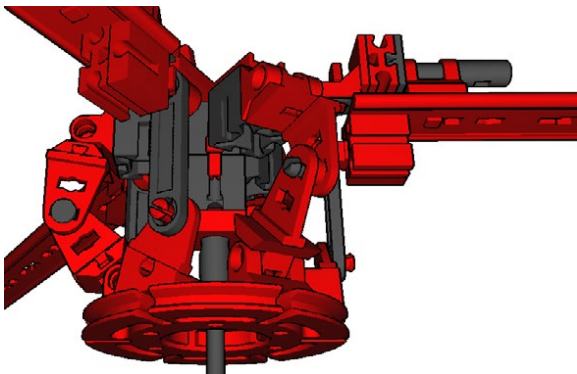


Abb. 16-14 Taumelscheibe mit Rotorverbindung und Kupplungsstücken



Tatsächlich würde sogar eine einzige Verbindung über Kupplungsstücke die gewünschte Steifigkeit liefern; das führt aber zu einer Unwucht im Rotorkopf. Das oben erwähnte Funktionsmodell des fischertechnik-Baukastens *Technical Revolutions* verwendet eine ähnliche Konstruktion.

Zur Steuerung der Taumelscheibe benötigen wir einen nicht rotierenden zweiten Teil, über den – analog zum unteren Lochstein beim Heckrotor – die Neigung eingestellt wird. Bei einem Hubschrauberrotor sind diese beiden Teile über ein Lager drehbar miteinander verbunden. Wie gelingt das mit fischertechnik?

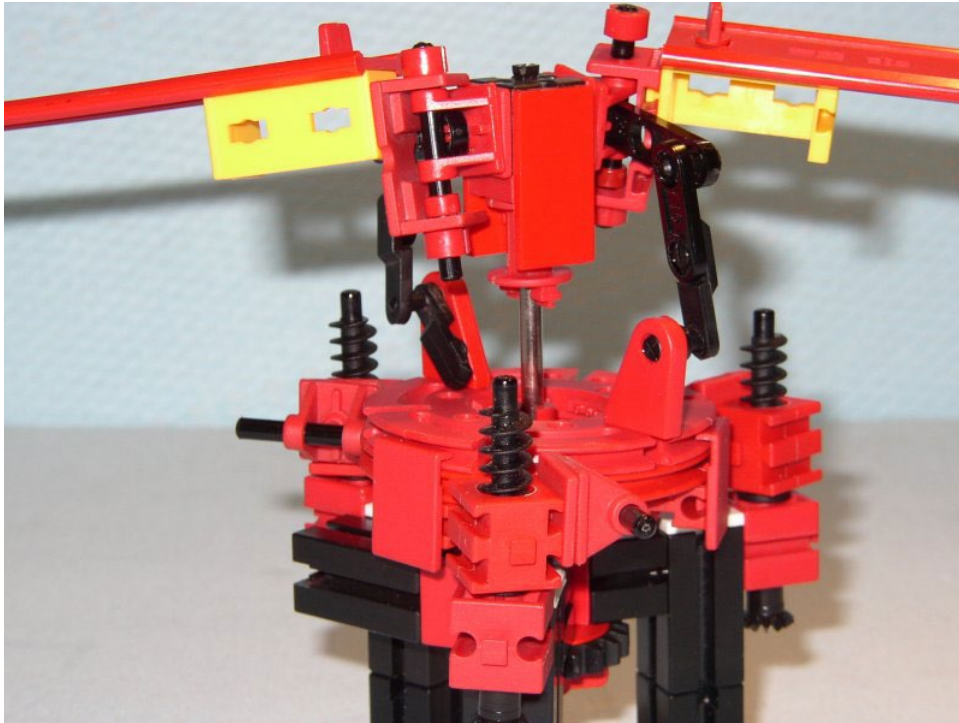


Abb. 16–15 Konstruktion von Harald Steinhaus

Von Harald Steinhaus stammt die erste bekannte fischertechnik-Konstruktion einer funktionierenden Taumelscheibe vom April 2003. In einer deutlich stabileren Konstruktion vom Januar 2007 (Abb. 16–15) verwendet er zur Verbindung von Ober- und Unterseite der Taumelscheibe außen angebrachte Führungsplatten. Diese Teile sind leider sehr selten; daher eignet sich die Lösung nicht für jede fischertechnik-Materialsammlung.

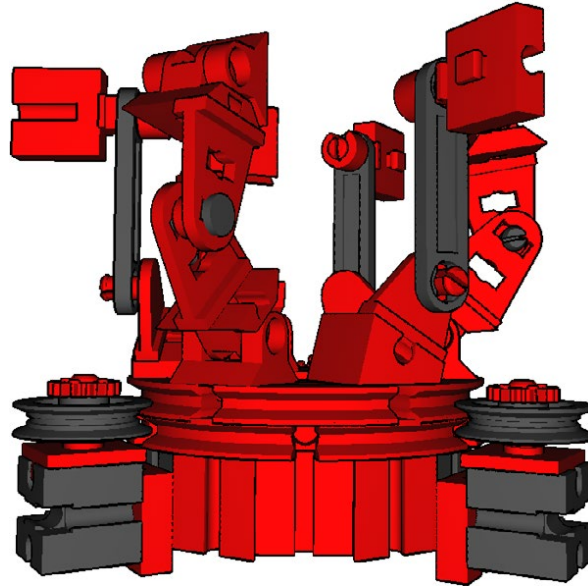


Abb. 16-16 Verbindung der Taumelscheibe von außen durch Seilrollen auf Aufnahmeachsen

Aber die lose Verbindung der beiden Drehscheiben 60 gelingt auch mit verbreiteteren Standardbauteilen: den Seilrollen.

Sie greifen von außen in die umlaufenden Nuten der beiden Drehscheiben 60. Bei dieser Lösung fällt der Reibungswiderstand besonders gering aus. Dreht sich der Rotor, »gleiten« die beiden Drehscheiben aufeinander (Abb. 16-16).

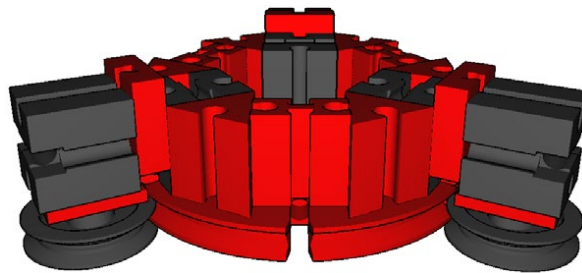


Abb. 16-17 Befestigung der Seilrollen

Damit die Seilrollen nicht bei der Rotation nach außen weggedrückt werden, müssen sie stabil mit der Drehscheibe 60 verbunden werden (Abb. 16-17).



Statt Rastachsen und Schnecken, die im Modell von Harald Steinhaus zur Verstellung des Neigungswinkels mit einem Motor angetrieben werden müssen, befestigen wir die untere Drehscheibe 60 mit Lagerstücken und Gelenkwürfeln beweglich an drei Führungsstangen und montieren unter den drei Seilrollen jeweils einen Radhalter mit kleiner Seilrolle. Damit lässt sich die Neigung der Taumelscheibe stufenlos und rein mechanisch in alle Richtungen über drei an den Seilrollen befestigte Seilzüge steuern (Abb. 16–18).

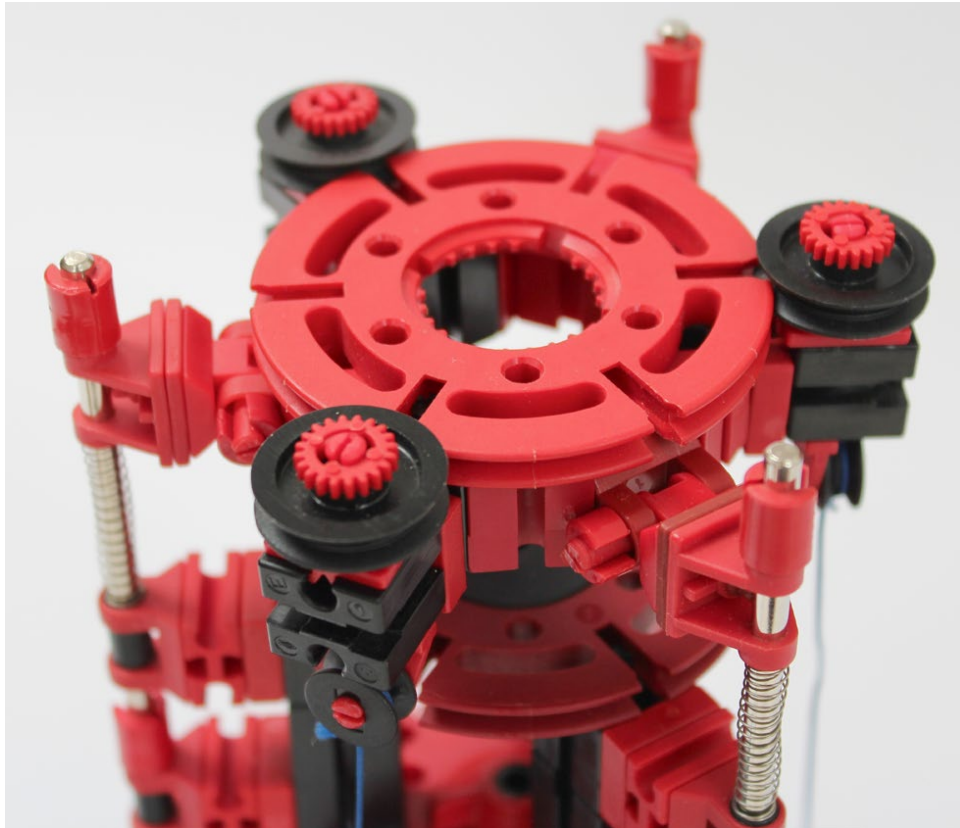


Abb. 16–18 Mechanische Neigungsverstellung

Die drei Rotorblätter des Hauptrotors – wie beim ursprünglichen Sikorsky VS-300 – werden über eine Sternlasche miteinander verbunden; als Rotorblätter bieten sich die 240 mm langen Laufschiene an. Damit erreicht der Modellrotor eine Spannweite von knapp 56 cm (Abb. 16–19).

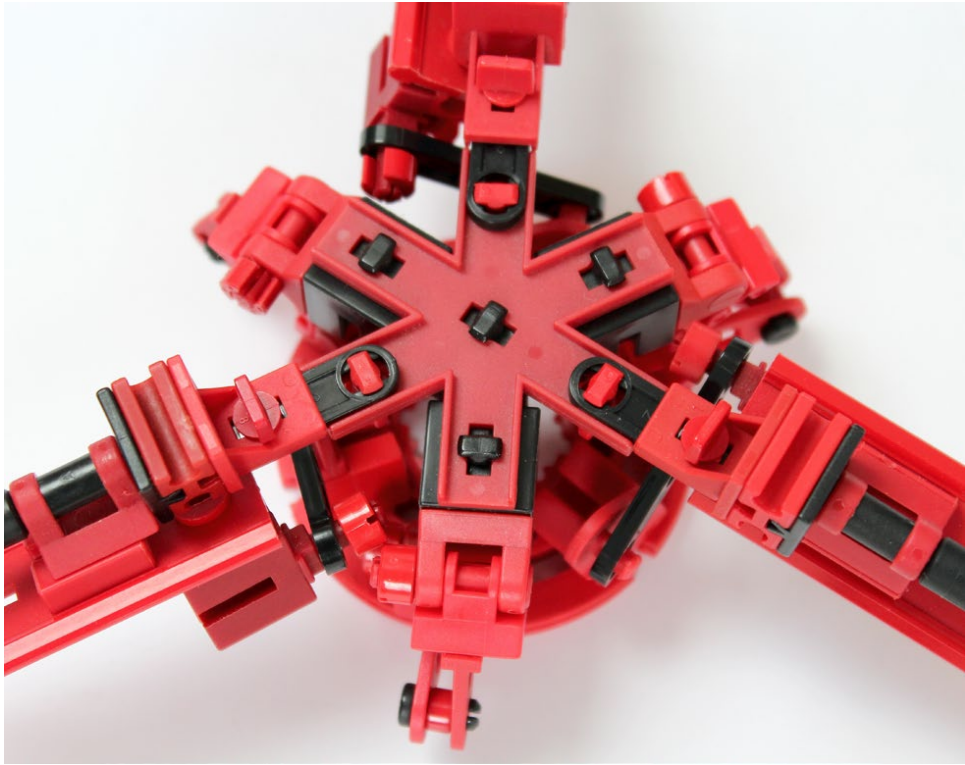


Abb. 16–19 Rotorblätter mit Sternlasche

Die Antriebsachse des Rotors wird über einen Rastadapter an einem Baustein 15 befestigt, der über vier Federnocken mit den Nuten eines in der Mitte der Sternlasche eingesetzten Riegelsteins verbunden ist. Die Achse wird in der Mitte der beiden unteren, fest mit dem Hubschrauber verbundenen Drehscheiben 60 durch zwei schwarze Freilaufnaben geführt und von einem Power-Motor (1:20) angetrieben.

Damit die Gelenkwürfel halten, sollten sie mit einer Rastachse 20, die von der Seite bis zum Anschlag in das Lager geschoben wird, und einer Klemmbuchse 5 verriegelt werden. Abb. 16–20 zeigt den gesamten Rotor mit Taumelscheibe und Seilrollenführung.



Abb. 16–20 Rotorkopf mit Taumelscheibe

Wie in einem echten Hubschrauber kann nun die Steuerung über einen in x - und y -Richtung beweglichen Steuerknüppel (*Cyclic*) erfolgen. Durch Verkürzung aller drei Zugseile mit einem zweiten Hebel (*Collective*) zur gleichzeitigen Verstellung der Blattneigung aller drei Rotorblätter lassen sich Steig- und Sinkflug steuern.

Schließlich kann man Heckrotor und Hauptrotor noch um eine Hubschrauberkarosserie ergänzen – und so z.B. einen zwar nicht flugfähigen, aber sehr realitätsnahen Sikorsky VS-300 nachbauen.

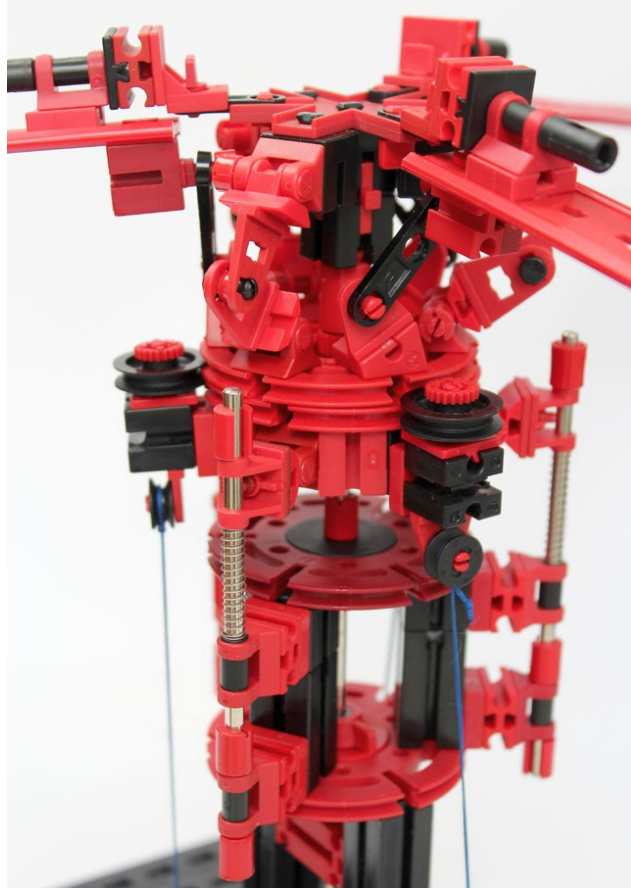


Abb. 16–21 Gesamtansicht des Rotors

Literatur

Eine sehr anschauliche Einführung in die Technik und Geschichte des Hubschraubers bietet der 15minütige Film von Jörg Richter aus dem Jahr 2005 [2].

- [1] Walter Bittner: *Flugmechanik der Hubschrauber*. 4. Auflage, Springer-Verlag, 2014.
- [2] Jörg Richter: *Igor Sikorsky und der Hubschrauber*. Sendereihe »Meilensteine der Naturwissenschaft und Technik«, ARD, 2005.
<https://www.youtube.com/watch?v=vpgMUJ6ZFcY>.
- [3] Dirk Sandhop: *Geschichte des Hubschraubers*.
<http://www.heliport.de/lexika/geschichte-des-hubschraubers/>.