

Walter Bittner

Flugmechanik der Hubschrauber

Walter Bittner

Flugmechanik der Hubschrauber

Technologie,
das flugdynamische System Hubschrauber,
Flugstabilitäten, Steuerbarkeit

2., aktualisierte Auflage
Mit 122 Abbildungen

 Springer

Dipl. -Ing. Walter Bittner

Alpenstraße 22A

85614 Kirchseeon

e-mail: Walter-Bittner@t-online.de

Bibliografische Information der Deutschen Bibliothek

Die Deutsche Bibliothek verzeichnet diese Publikation in der Deutschen Nationalbibliografie; detaillierte bibliografische Daten sind im Internet über <http://dnb.ddb.de> abrufbar.

ISBN 3-540-23654-6 2. Aufl. Springer Berlin Heidelberg New York
ISBN 987-3-540-23654-2 Springer Berlin Heidelberg New York

Dieses Werk ist urheberrechtlich geschützt. Die dadurch begründeten Rechte, insbesondere die der Übersetzung, des Nachdrucks, des Vortrags, der Entnahme von Abbildungen und Tabellen, der Funksendung, der Mikroverfilmung oder Vervielfältigung auf anderen Wegen und der Speicherung in Datenverarbeitungsanlagen, bleiben, auch bei nur auszugsweiser Verwertung, vorbehalten. Eine Vervielfältigung dieses Werkes oder von Teilen dieses Werkes ist auch im Einzelfall nur in den Grenzen der gesetzlichen Bestimmungen des Urheberrechtsgesetzes der Bundesrepublik Deutschland vom 9. September 1965 in der jeweils geltenden Fassung zulässig. Sie ist grundsätzlich vergütungspflichtig. Zuwiderhandlungen unterliegen den Strafbestimmungen des Urheberrechtsgesetzes.

Springer ist ein Unternehmen von Springer Science+Business Media
springer.de

© Springer-Verlag Berlin Heidelberg 2005

Printed in The Netherlands

Die Wiedergabe von Gebrauchsnamen, Handelsnamen, Warenbezeichnungen usw. in diesem Buch berechtigt auch ohne besondere Kennzeichnung nicht zu der Annahme, dass solche Namen im Sinne der Warenzeichen- und Markenschutz-Gesetzgebung als frei zu betrachten wären und daher von jedermann benutzt werden dürften. Sollte in diesem Werk direkt oder indirekt auf Gesetze, Vorschriften oder Richtlinien (z. B. DIN, VDI, VDE) Bezug genommen oder aus ihnen zitiert worden sein, so kann der Verlag keine Gewähr für die Richtigkeit, Vollständigkeit oder Aktualität übernehmen. Es empfiehlt sich, gegebenenfalls für die eigenen Arbeiten die vollständigen Vorschriften oder Richtlinien in der jeweils gültigen Fassung hinzuzuziehen.

Einbandgestaltung: Struve & Partner, Heidelberg

Satz: Werbung + Gestaltung, E. Kirschner-Lüthje, Kirchseeon

Herstellung: medionet AG, Berlin

Gedruckt auf säurefreiem Papier 68/3020 - 5 4 3 2 1 0

Widmung

Dieses Buch ist meiner Tochter Barbara Sabine Bittner gewidmet, die, ganz im Gegensatz zu meiner Leidenschaft für die theoretische und praktische Luftfahrt, als Geologin eine Berufung mit ausgesprochener Bodenhaftung gefunden hat.

Vorwort zur zweiten Auflage

Das Interesse an der Hubschraubertechnik, und damit auch an meinem Buch, hat sich als erfreulich groß erwiesen, entsprechende Erfahrungen aus meinen Vorlesungen an der TU München und an der Uni-Bw München haben sich damit bestätigt. Speziell die erstmalige Darstellung des flugmechanischen Hintergrundes, und das hochaktuell, wurde sehr begrüßt.

Die Flut von E-mails, die mich erreichten, brach jäh ab durch die Löschung meiner Adresse bei der Firma Eurocopter. Seit dem bin ich zu erreichen unter: Walter-Bittner@t-online.de.

Nach der Erstauflage haben sich Neuerungen, Erweiterungen und Ergänzungen ergeben. Ich nutze die Gelegenheit der Zweitaufgabe diese einzuarbeiten.

Heuer werden die ersten Serienmaschinen des NH90 und des UH-Tiger in Dienst gestellt. Was gibt es schöneres für einen Dipl. Ing. der Luft- und Raumfahrt wie mich, die Produkte als gelungen zu sehen, an deren Entstehung er als damaliger Leiter im Vorentwurf des Hubschrauberbereiches von MBB und auch über weite Strecken der Entwicklung entscheidend beteiligt war!

Zingst, MV, im Sommer 2004

Walter Bittner

Vorwort zur ersten Auflage

Die Flugmechanik beschreibt als zentraler Themenkreis aller Entwicklungsarbeiten innerhalb der Luftfahrt die flugführungsbezogenen Eigenschaften von Luftfahrzeugen. Ihre Arbeitsschwerpunkte umfassen Flugeigenschaften, Stabilität und Steuerbarkeit, Flugregelung, Simulation, Erprobung, Dynamik, Lasten- und Flugleistungsberechnungen.

So, wie bereits nach der Vorentwurfsphase eines Hubschraubers zwei Drittel seiner späteren Kosten feststehen, liegen auch schon sehr frühzeitig seine Flugeigenschaften und damit seine spätere Einsatzeignung fest.

Es ist deshalb unerlässlich, schon weit im Vorfeld von Neuentwicklungen die flugmechanischen Charakteristika der neuen Hubschraubertechnologien zu beherrschen und die später zu erfüllenden Anforderungen und anzuwendenden Vorschriften komplett und abgestimmt vorliegen zu haben. Nur unter diesen Voraussetzungen kann zielorientiert entwickelt werden, und teure Korrekturen sind später nicht mehr zu erwarten.

Hubschraubernutzer stellen sehr schnell fest, dass moderne Hubschrauber ohne Kenntnisse des Systemverhaltens nur unzureichend, vor allem aber nicht mit bestmöglicher Sicherheit und Wirtschaftlichkeit betrieben werden können.

Mit der damals revolutionären Entwicklung des Hubschraubers Bo105 unter der Regie von Herrn Dipl.-Ing. Emil Weiland in der Firma MBB erhielt die in

Europa und den USA verfolgte Hubschraubertechnik einen entscheidenden Anstoß in Richtung Spitzentechnologie, die sie heute ist.

In anspruchsvollster Ingenieurskunst wurden innovative Auslegungsphilosophien und -methoden erarbeitet und verwirklicht, um damit für Hubschrauber bis dato undenkbare Flugeigenschaften und Einsatzzeichnungen zu erreichen. Die wichtigste aus der langen Reihe verwirklichter Innovationen ist die des gelenklosen Rotors. In einer Zeit, in der für jedermann feststand, dass Rotorblätter über Schlag- und Schwenkgelenke an den Rotorkopf angelenkt werden müssen, gerade diese Gelenke zu eliminieren, war die Durchsetzung dieser Vorstellung, unter Wahrung von deren aus flugmechanischer Sicht auch weiterhin unabdingbaren funktionalen Aufgaben, nur mit maximaler Beherrschung der vollen Wissensbreite aller benötigten Technologien zu verwirklichen. Das ursprüngliche Bestreben war dabei die beiden wartungsintensiven Gelenklager zu eliminieren, den Rotorkopf widerstandsärmer und weniger komplex zu gestalten. Nach der Verwirklichung dieser Idee stellte sich jedoch die mit dieser Technologie zu erzielende überlegene Agilität des Hubschraubers im Flug als der wichtigere Nutzen dieser Innovation heraus. Technologisch wurde dies durch die erstmalige Verwendung faserverstärkter Werkstoffe zum Bau hochbelasteter Strukturen, in diesem Fall speziell für Rotorblätter, ermöglicht.

Dr. Ludwig Bölkow hat auf der Grundlage seiner profunden Kenntnisse aller Technologien in der von ihm geschaffenen Firma die VTOL-Technik, wie sie in Ottobrunn betrieben wurde, als Schlüssel- und Hochtechnologie implantiert, inspiriert und durch zuverlässige Förderung entscheidend vorangetrieben. Vor allem durch ihn konnte eine Entwicklungsmannschaft aufgebaut werden, die weltweit als eine der höchstqualifizierten anerkannt war. Dies zeigte sich in wiederholten Bitten namhafter Firmen um Mitarbeit, speziell bei der Entwicklung neuer Rotoren, dem Herz aller Hubschrauber. Hier ist vor allem die Firma Boeing mit der damaligen UTTAS-Ausschreibung zu nennen.

Nur Firmenkulturen wie die von Dr. Bölkow initiierte, vorgelebte und an Spitzenprodukten orientierte machen Innovationen, gekrönt mit solchen Erfolgen, möglich. Woraus diese Kulturen zu bestehen haben, stellt er in seinem Buch „Der Zukunft verpflichtet“ [1] als Geist von Ottobrunn treffend dar. Komplementär zu dieser Firmenkultur existierte auf der Arbeitsebene eine kürzestgeschlossene Entwicklungsspirale. Diese durchläuft zunächst die originären Entwicklungsbereiche Technologie, Konstruktion und Festigkeit, Musterbau, Komponenten- System- und Flugerprobung und läuft, die gewonnenen Erkenntnisse rückkoppelnd, wieder zur Technologie zurück. Später sind in diesen Zyklus die Serienreifmachung und die Fertigung mit aufzunehmen. Die Flugmechanik ist in diesem Prozess die Kommunikationsebene zwischen der Flugerprobung und der Technologie. Für die gesamte Entwicklungsspirale ist das Entwicklungs-Know-How die Arbeitsebene.

Die Entwicklungsspirale muss immer wieder und so lange durchlaufen werden, bis sich die Auslegung auf das Optimum fokussiert hat. Geschieht dies nicht, entstehen nicht konkurrenzfähige Produkte. Sind die genannten Entwicklungssparten organisatorisch oder räumlich getrennt, dann explodieren die Kosten durch überdehnte Laufzeiten. Die gleichen Folgen haben Unterqualifikationen oder Inkompatibilitäten, selbst wenn dies nur in einer einzigen der Sparten der Fall sein sollte. Eine typische Unterqualifikation entsteht, wenn der fertigungstypische

Einflug als ausreichend für die von der Entwicklung benötigte Flugerprobung angesehen wird.

Nach dem beschriebenen Zyklus zu bearbeitende Entwicklungsarbeiten fallen in der Luftfahrtindustrie im Laufe aller Programmphasen an: zunächst während der eigentlichen Entwicklung, dann im Verlauf der Serienreifmachung, der Serienfertigung, der Nutzungsphase, durch Weiterentwicklungen um die erst im praktischen Einsatz, wieder nur durch die Entwicklung, zu erkennenden Reserven und um neueste technologische Fortschritte auszunutzen, bei Weiterentwicklungen zu militärischen und zivilen Varianten, im Rahmen von Produktpflegemaßnahmen, Anpassentwicklungen, Kampfwertsteigerungen und Erhaltungsmaßnahmen, alles sowohl im Soft- als auch im Hardwarebereich.

Solche innovativen Entwicklungskulturen sind mit fertigungsorientierten Strukturen ebensowenig kompatibel wie mit managementorientierten Organisationen. Für neue Produkte in der LRI sind Entwicklungskonfigurationen der beschriebenen Leistungsfähigkeit unabdingbar.

Nur die Kombination: einer, vor allem auch im technischen Wissen, höchst kompetenten Firmenleitung in Verbindung mit einer höchst qualifizierten und alle Ingenieurdisziplin umfassenden, systemfähigen Entwicklungsmannschaft ermöglicht solche Erfolge wie die der Hubschrauberentwickler in Ottobrunn und sichert durch laufend innovative Produkte mit höchsten Ansprüchen auf Spitzentechnologie die Zukunft.

Mit den Rotoren für den PAH 2 „Tiger“ und für den zivilen Vielzweckhubschrauber EC135 sind dem genannten Team weitere überzeugende Leistungsbeispiele gelungen. Der „Tiger“ ist mit seinem FEL-Rotor seinen derzeitigen Konkurrenten in den entscheidenden Einsatzbereichen überlegen, das gleiche gilt für den EC135; dieser erreicht zusätzlich mit seinem völlig lagerlosen FVW-Rotor hohe Wirtschaftlichkeit.

Für die Konkurrenz war die Adaption der überlegenen Hubschraubertechnologie des Bo105 ein langwieriger, aber notwendiger Lernprozess, da auch auf Seiten der Hubschrauberbetreiber die Flugeigenschaften dieses Hubschraubers bald als optimal erkannt wurden - unser Markterfolg, obwohl Newcomer, hat dies gezeigt. Mit dem Hubschrauber Bo105 wurden neue, höchst anspruchsvolle Standards gesetzt. Es konnte nur eine Frage der Zeit sein, bis diese auch festgeschrieben würden.

Es dauerte trotzdem Jahrzehnte, bis das hohe Leistungsniveau des Bo105 zum allgemeinen Standard der Hubschraubertechnik wurde. Heute gültige Entwurfsrichtlinien für Neuhubschrauber orientieren sich an den Flugeigenschaften des Bo105, allerdings übertrifft dieser, etwa im Präzisionsflug, diese Forderungen immer noch bei weitem, denn er erreicht die überlegenen Steuereigenschaften von Starrflüglern.

In der Flugmechanik wurden in dem angesprochenen Technologieschub die traditionellen Analysemethoden im Sinne einer Open-Loop-Steuerung einschließlich der, für den Präzisionsflug wichtigen mittelschnellen Steuerimpulse verfeinert.

Mit dem Einzug der Elektronik auch in die Steuerungssysteme der Hubschrauber, als Stabilisierungshilfen oder auch als Autopiloten von immer höherer Komplexität und Autorität, wurden die Steuerimpulse immer kürzer, d.h. höherfrequent und vor allem auch rückkoppelnd, im Sinne von Closed-Loop-Systemen. Um

die sich daraus für den Hochleistungsflug ergebenden völlig neuartigen, jedoch hoch relevanten Systemeigenschaften überhaupt erfassen, um sie quantifizieren und bewerten zu können, mussten die flugmechanischen Methoden ausgebaut werden. Dabei wurde die Vorgehensweise der elektronischen Verstärkertechnik adaptiert, wobei zu den klassischen Methoden für die auch weiterhin relevanten nieder- bis mittelfrequenten, nicht rückkoppelnden Steuerbewegungen kein systematischer Bruch auftreten durfte.

Die neuen Technologien, einschließlich der Methoden, sie zu erfassen, berücksichtigen eine Vielzahl höchst komplexer und vor allem systemtechnisch voneinander abhängiger Auslegungsparameter. Ihre optimale Kombination ergibt sich erst im oben beschriebenen Entwicklungsprozess. Künftige Hochleistungshubschrauber können deshalb nicht länger nach zu verwendenden Technologien und zu erreichenden primären Flugleistungen bzw. über die Abflugmasse definiert werden. Heute ist die Abflugmasse eine zentrale Auslegegröße aller Entwicklungsverträge, unbegründeterweise, denn sie hat für den praktischen Einsatz nur eine sehr sekundäre Bedeutung. Die Erfüllung aller flugmechanischer Forderungen ist entscheidend. In Zukunft werden missionsbezogene Flugeigenschaften gefordert, für die Handling Quality Ratings bestmöglichen Levels erreicht werden müssen. Daraus ergeben sich dann sowohl die optimale Konfiguration und Abflugmasse als auch am günstigsten anzuwendenden Technologien bzw. auf der anderen Seite die Kosten.

Diese neue Systematik, Projekte zu definieren, bedingt auch bei den Auftraggebern weitestgehende Fachkompetenzen, wobei die mit anderen Mustern gemachten Erfahrungen in die Spezifikationen mit einfließen können.

Nach dem beschriebenen Technologieschub ist auch im Bereich der Flugmechanik eine gewisse Konsolidierung eingetreten. Ein erneuter Schub ist aus verschiedenen Gründen nicht zu erwarten, der wichtigste Grund hierfür wird im Buch „Der Zukunft verpflichtet“ [1] herausgearbeitet. Es erscheint mir deshalb sinnvoll, das erreichte Wissen zu dokumentieren. Das vorliegende Buch stellt einen Beitrag dazu dar. Es diene als eine Grundlage für die Weiterentwicklung der Hubschraubertechnik, die mit Sicherheit noch ein umfangreiches Potential besitzt.

Flugmechanisch weist der Hubschrauber im Vergleich zum Starrflügler typische Besonderheiten auf. Durch die Art und Weise, diese Extravaganzen sowohl technisch als auch flugmechanisch in den Griff zu bekommen, und auf Grund ihrer Komplexität entfernt sich die Hubschraubertechnik mittlerweile schon in vielen Bereichen sehr stark von der allgemeinen Flugtechnik.

Mein Dank gilt vor allem Herrn Dipl.-Ing. Emil Weiland und Herrn Prof. Dipl.-Ing. Volker von Tein. Ersterem für den mir gewährten tiefen Einstieg in die Hubschraubertechnik und dem Zweiten für die Chance, durch Ausbau der Vorlesung Flugmechanik der Hubschrauber an der TU München dieses Buch zu verfassen.

Der Leser wird feststellen, dass mit zunehmender Aktualität des behandelten Stoffes die Anglizismen zunehmen. Sich dagegen aufzulehnen wäre sinnlos. Vorschriften und Standards sind in englischer Sprache verfasst, vor allem auch von der JAA, die auch in Deutschland gültig sind. Das von staatenübergreifenden Firmen als Verkehrssprache vereinbarte Englisch ist in internationalen Programmen schon lange Usus. Zwanghafte Übersetzungen führten nur zu Verständigungsproblemen. Diese Toleranz sollte auch den Dimensionen der auftretenden

Zahlenwerte entgegengebracht werden. Solange es z. B. in der Geographie Bogenminuten gibt, wird es auch nautische Meilen als Strecken- und Knoten als Geschwindigkeitseinheiten geben. Unsere sperrige Art, die Zeit zu messen, müsste sonst auch in Frage gestellt werden. Lediglich nicht physikalisch begründete Dimensionen wie slugs, pints, pounds, imperial galons, US galons, short und long tons, horse power und yards/feet/inches sollten ausgephast werden, wie es mit Kilopond und PS bereits geschehen ist.

Eine Reihe von Angaben und Werten in diesem Buch sind Vorschriften und Veröffentlichungen entnommen. Das kann nicht davon entbinden, für die praktische Arbeit auf die Originalunterlagen zurückzugreifen, um eventuelle Übertragungsfehler folgenlos bleiben zu lassen bzw. auch um Vorgaben zu berücksichtigen, die im Rahmen der vorliegenden Darstellung nicht erwähnt wurden. Angegebene technische und flugmechanische Daten zu einzelnen Hubschraubern sollen nur Bezüge zu praktisch auftretenden Werten herstellen - schon das Fehlen von Angaben wie Weiterentwicklungsvariante der Maschine, Ermittlungsverfahren der Daten, Randbedingungen u. ä. zeigt, dass diese nur Anhaltswerte sein können.

Kirchseeon, im Sommer 2001

Walter Bittner

Inhaltsverzeichnis

Verwendete Formelzeichen	XIX
1 Evolution des Hubschraubers	1
1.1 Die Natur hat Drehflügler, aber keine Hubschrauber hervorgebracht	1
1.1.1 Entwicklung des Hubschraubers	1
1.1.2 Periode der Tragschrauber (1919–1935)	8
1.1.2.1 Erfindung und Verwirklichung des Schlaggelenkes	8
1.1.2.2 Erfindung des Schwenkgelenkes	9
1.1.2.3 Unterschied zwischen Propeller (als Hubschuberzeuger) und Rotor	9
1.2 Entstehen der ersten brauchbaren Hubschrauber	10
1.2.1 Bréguet/Dorand	12
1.2.2 Professor Focke	12
1.2.3 Igor Sikorsky	14
1.3 Phase der Reife und Spezialisierung	15
2 Hubschraubermmissionen und Markt	19
3 Wesentliche Baelemente der Hubschrauber	31
3.1 Übersichten	31
3.2 Beschreibung und Wirkungsweise des Hauptrotors	34
3.2.1 Blattanlenkung, Schlag- und Schwenkbewegungen	34
3.2.2 Kollektive und zyklische Blattverstellung	37
3.2.3 Taumelscheibe, Steuermomente	37
3.2.4 Steuerelemente	39
3.2.5 Rotorbedingte Kopplungen	40
4 Grundzüge der Leistungsrechnung	47
4.1 Strahltheorie (Bernoulli)	47

4.1.1	Der stationäre Schwebeflug	49
4.1.2	Reale Rotoren im Schwebeflug	50
4.1.3	Senkrechter Steigflug (idealer Rotor)	51
4.1.4	Senkrechter Sinkflug (idealer Rotor)	53
4.1.4.1	Der langsame Sinkflug	53
4.1.4.2	Das Wirbelringstadium (WR)	53
4.1.4.3	Der schnelle Sinkflug	54
4.1.4.4	Autorotation (AR)	54
4.1.4.5	Strahlkontraktion	55
4.1.4.6	Übergang zum Flug mit Horizontalgeschwindigkeit	55
4.2	Die Blattelementenmethode	56
4.2.1	Ideale Verwindung	58
4.2.2	Mittlere aerodynamische Beiwerte und Einstellwinkel	62
4.2.3	Reale und sonstige Effekte	63
4.2.3.1	Ungleichförmige induzierte Geschwindigkeit	64
4.2.3.2	Blattspitzenverluste	65
4.2.3.3	Trapezform, Zuspitzung	66
4.2.3.4	Bodeneffekt	67
4.2.3.5	Drall, Zirkulation, dynamische Verwindung, Grenzschicht	68
4.2.3.6	Leistungsbedarf im Schwebeflug	69
5	Die Schlagbewegung der Rotorblätter	71
5.1	Trägheitsmoment des Rotorblattes	71
5.2	Herleitung der Schlaggleichung	72
5.2.1	Rotoren mit zentralem Schlaggelenk	72
5.2.2	Ein Blick in die Schwingungslehre	73
5.2.3	Rotoren mit Schlaggelenksabstand	75
5.3	Die Schlagbewegung unter Einbeziehung der Luftkräfte	76
5.4	Der gelenklose Rotor	78
5.5	Quantifizierung der Schlagbewegung	80
5.5.1	Die Rotoransteuerung	81
5.5.2	Der Konuswinkel	81
5.5.3	Die Schlagkoeffizienten	83
6	Die Schwenkbewegung der Rotorblätter	85
6.1	Schwenken zunächst ohne Coriolis- und Luftkräfte	85
6.2	Die Schwenkbewegung unter Berücksichtigung der Luft- und der Corioliskräfte	87
7	Die höherfrequenten Rotorblattschwingungen	89
7.1	Blattverformungen, das Resonanzdiagramm	89

7.2	Formänderungen des Rotorsystems, Luft- und/oder Bodenresonanz	91
7.3	Unterdrückung von Schwingungen und Vibrationen	94
8	Leistungsbedarf, Flugleistungen	96
8.1	Einsatzenvelope von Hubschraubern.....	96
8.2	Wichtige Leistungsparameter und -begriffe	96
8.3	Standardbedingungen, Druckhöhe/Dichtehöhe	96
8.4	Die Leistungspolare.....	98
8.4.1	Schwebeflug	98
8.4.2	Vorwärtsflug.....	98
8.4.2.1	Induzierte Leistung	99
8.4.2.2	Profilwiderstandsleistung	101
8.4.2.3	Schädliche Leistung	101
8.4.2.3	Manöverleistung am Beispiel „Steigen“	102
8.4.3	Gesamtleistungsbedarf.....	103
8.5	Flugleistungen	106
8.5.1	Triebwerksleistungen.....	106
8.5.2	Leistungsbilanzen	108
8.6	Höhen-/Geschwindigkeitsdiagramm, Avoid Zones.....	115
8.7	Autorotation (AR)	117
9	Auslegung des Hauptrotors	121
9.1	Rotordurchmesser.....	122
9.2	Blattspitzenumlaufgeschwindigkeit	123
9.3	Blattgeometrie	124
9.3.1	Blattflächen und -tiefen	128
9.3.2	Manövrierbarkeit	129
9.3.3	Blattzahl.....	129
9.3.4	Trapezform, Zuspitzung	130
9.3.5	Verwindung	131
9.4	Profilierung.....	134
9.4.1	Grenzen des maximalen Auftriebsbeiwertes, stationär	135
9.4.2	Maximale Auftriebsbeiwerte im Bereich hoher Machzahlen	136
9.4.3	Instationäre Auftriebsbeiwerte.....	137
9.4.4	Der Widerstandsbeiwert, stationär und dynamisch	138
9.4.5	Der Momentenbeiwert stationär und dynamisch	138
9.4.6	Feinabstimmungen der Profilierung	141
9.5	Weitere Auslegungsparameter.....	143
9.5.1	Drehrichtung, Trägheitsmomente, Blattspitzen	143
9.5.2	Zusammenstellung aktueller Rotoren	144
10	Der Hubschrauber als Gesamtsystem.....	147

10.1 Die Bewegungsgleichungen	148
10.1.1 Der allgemeine instationäre Flug	148
10.1.2 Eingrenzung der Freiheitsgrade	150
10.1.3 Der stationäre Flug	151
10.1.3.1 Schwebeflug als Grenzfall sehr langsamen Vorwärtsfluges	151
10.1.3.2 Stationärer Vorwärtsflug	152
10.2 Flugdynamik	152
10.2.1 Linearisierter Ansatz für die Luftkräfte	153
10.2.2 Die Bewegungsgleichungen für kleine Störungen	154
10.2.3 Flugdynamische Eigenschaften	156
10.2.3.1 Ermittlung der Eigenwerte	156
10.2.3.2 Laplace-Transformation der Bewegungsgleichungen ..	160
10.2.3.3 Dynamikmatrix, charakteristische Gleichung	160
10.2.3.4 Stabilitätskriterien	161
10.2.3.5 Typische Eigenwerte eines Beispiel-Hubschraubers	165
10.2.4 Inverse Bestimmung der Derivativa, Übertragungsfunktionen .	170
10.2.4.1 System- oder Parameter-Identifikation	172
10.2.4.2 Multidimensionale Vorgehensweise der Flugregelung	172
11 Flugtechnische Stabilitäten	174
11.1 Die statische Längsstabilität	174
11.2 Die Anstellwinkelstabilität	175
11.3 Richtungsstabilität, Spiralbewegung	175
11.4 Das laterale Gleichgewicht	176
11.5 Dynamische Stabilität	177
11.6 Mindestforderungen bezüglich der Stabilitäten	178
11.7 Künstliche Stabilität, Flugregelung	178
11.8 Kopplungen	181
12 Steuerbarkeit	187
12.1 Steuerbarkeitsforderungen an Zivilhubschrauber	188
12.2 Zeitkonstante, Steuerempfindlichkeit, -wirksamkeit	188
12.3 Rating Scales	191
12.4 Normpilotenmodell	192
12.5 Das Steuerbarkeitsdiagramm	192
12.5.1 Langsame Steuereingaben	193
12.5.2 Ursprüngliche Forderungen	193
12.5.3 Neufassung der Steuerbarkeitsforderungen	195
12.6 Höherfrequente Ansteuerungen/Reaktionen	198
12.6.1 Dynamische Stabilitätskriterien mittelschneller Reaktionsbewegungen	198
12.6.1.1 Die Nickbewegung	199
12.6.1.2 Die Rollbewegung	200

12.6.2	Sekundärreaktionen	201
12.6.3	Hochfrequente rückkoppelnde Steuerbewegungen kleiner Amplituden	202
12.6.3.1	Grundlagen.....	203
12.6.3.2	Geforderte Systemeigenschaften.....	206
12.6.3.3	Ergebnisse aus der Flugerprobung.....	210
12.6.3.4	Vergleichende Darstellung von Messergebnissen.....	211
12.7	Flugerprobung unter Berücksichtigung der neuen Kriterien	213
13	Spiegelung des Aeronautical Design Standard 33 an Projekten	214
13.1	Nachweisbedingungen.....	215
13.1.1	Zuordnung der Leistungskategorien zu den MTE	215
13.1.2	Sichtverhältnisse, G/DVE.....	217
13.1.3	Hilfen zur Wahrnehmung der Umgebung, UCE.....	217
13.1.4	Einsatzenvelope (Operational Flight Envelope, OFE).....	218
13.1.5	Geteilte Aufmerksamkeit (Divided Attention Operation, DAO).....	219
13.1.6	Ausfälle	219
13.2	Die neue Systematik in der Praxis.....	220
13.2.1	Definitionen und Generelles	221
13.2.2	Quantitative Kriterien	222
13.2.3	Hochfrequente Steuerbarkeit der UH-60A Black Hawk.....	224
13.3	Flugversuchsmanöver.....	225
13.3.1	Flugversuchsmanöver für Transporthubschrauber	225
13.3.2	Definition der Versuchsbedingungen und -manöver	226
13.3.3	Auswertung der Messkampagnen.....	229
14	Ausblick	231
Literatur	233
Bildnachweis	234
Stichwortverzeichnis	235

Verwendete Formelzeichen

a	-	Steigung der aufgelösten Polaren
a	m	Schlaggelenksabstand
a^*	m	fiktiver Schlaggelenksabstand
a_0	°	Konuswinkel
a_1, b_1	°	Schlagkoeffizienten
A	N	Luftkraft
A_n	div.	Faktoren der Frequenzgleichung
B	-	Blattspitzenverlust
B	-	Position des Schlaggelenkes
b_C	m/sec ²	Coriolisbeschleunigung
BW_{gain}	rad/sec	Bandbreite aus der Amplitudenverstärkung
BW_{phase}	rad/sec	Bandbreite aus der Phasenverschiebung
c	m	Blatttiefe (ggf. mittlere)
c_a	-	Profilauftriebsbeiwert
$c_{a,\text{max}}$	-	maximal möglicher Profilauftriebsbeiwert
\bar{c}_A	-	mittlerer aerodynamischer Auftriebsbeiwert
\bar{c}_{d0}	-	mittlerer Widerstandsbeiwert Rotor
$c_{d0} = \delta$	-	mittlerer Widerstandsbeiwert angenäherter Polaren
c_m	-	Profilmomentenbeiwert
c_p	-	Powerbeiwert
c_Q	-	Torquebeiwert
c_{Q0}	-	Torquebeiwert aus dem Profilwiderstand
c_{Qi}	-	Torquebeiwert induziert
c_T	-	Thrustbeiwert
c_w	-	Profilwiderstandsbeiwert
c_{wi}	-	Beiwert des induzierten Widerstandes
c_{WP}	-	Profilwiderstandsbeiwert
c_{WR}	-	mittlerer Widerstandsbeiwert des Gesamt-HS bezogen auf F
dA	N	differenzielle Luftkraft
dZ	N	differenzielle Zentrifugalkraft
dP	N	differenzielle Trägheitskraft
dm	kg	Massenelement
dM	Nm	differenzielles Luftkraftmoment
$d\theta_{0,L,Q,HeRo}$		Differenzielle Steuerwinkel: kollektiv, längs, quer, Heckrotor
D	m	Rotordurchmesser
D	Nmsec/°	Schwenkdämpfung

e	m	Schwenkgelenksabstand, Exzentrizität
E	-	Position des (ggf. fiktiven) Schwenkgelenkes
F	m ²	Rotorkreisfläche; Blattquerschnittsfläche
F _{0,1,2}	m ²	Flächen des Stromfadens in den Ebenen 0, 1, 2
f _s	m ²	schädliche Widerstandsfläche
G	N	Abfluggewicht
G/F	N/m ²	Kreisflächenbelastung
G _{Abfl}	N	Abfluggewicht
G _{Leer}	N	Leergewicht
G _{max}	N	maximales Abfluggewicht
G _{Nutz}	N	Nutzlast
G _{Zul}	N	Zuladung
I _B	kgm ²	Massenträgheitsmoment des Schlagblattes
I _{Dreh}	kgm ²	Massenträgheitsmoment des Rotors
I _E	kgm ²	Massenträgheitsmoment um das Schwenkgelenk
k	-	Dämpfungsfaktor
k _δ	Nm/°	Federkonstante des Schwenkdämpfers
k _F	Nm/°	Federkonstante für Biegung
k _F	-	Katzenbergerfaktor
k _z	-	Schubbeiwert
l	m	Länge des profilierten Blattes
L	Nm	axiales Rollmoment
ṁ	kg/sec	Luftmassenstrom
m _S	kgm	Massenmoment
m _{SE}	kgm	Massenmoment in Schwenkrichtung
M	Nm	axiales Nickmoment
M _{aerodyn}	Nm	Luftkraftmoment
M _D	Nm	Dämpfermoment
M _F	Nm	Federmoment
M _p	Nm	Moment aus der Massenkraft
M _{Tr}	Nm	Moment aus der Massenträgheit
M _z	Nm	Moment aus der Zentrifugalkraft
n	1/sec	Rotorenndrehzahl
N	Nm	axiales Giermoment
N _R	W	Rotorleistungsbedarf
N _{Ro,0}	W	Rotorleistungsbedarf im Schwebeflug
N _{Rotor,ideal}	W	Rotorleistungsbedarf ohne Verluste
N _{T0}	W	Bezugstriebwerksleistung
p	°/sec	Rollgeschwindigkeit
p ₀ , p _∞	N/m ²	Umgebungsdruck
p ₁	N/m ²	Druck unmittelbar oberhalb des Rotors
p ₁ '	N/m ²	Druck unmittelbar unterhalb des Rotors
P	N	Trägheitskraft
P _C	N	Corioliskraft
q	°/sec	Nickgeschwindigkeit
q	-	Logarithmisches Dekrement
r, dr	m	laufender Rotorradius, Radiuselement

R	m	Rotorradius
r	°/sec	Giergeschwindigkeit
RD	-	Routhsche Diskriminante
S	N	Rotorschub
s_i	-	Eigenwerte
S^*	N	Zuschlag zum Schubbedarf
SL	-	Sea Level
t	sec	Zeitvariable
$t_{0,63}$	sec	Zeitkonstante
t_{AR}	sec	Zeit als Maßzahl für AR
t_D	sec	Doppelwertszeit
t_H	sec	Halbwertszeit
T	sec	Schwingungsdauer, Periode; Tangentialkraft
T_0	°K	Temperatur bei Abgabe der Bezugstriebwerksleistung
Tip als Index:	-	an der Rotorblattspitze
u	m/s	axiale Vorwärtsgeschwindigkeit
U	m/sec	Blattspitzenumlaufgeschwindigkeit
v	m/s	axiale Seitwärtsgeschwindigkeit
V, v	m/sec	Fluggeschwindigkeit bzw. Anströmgeschwindigkeit
V^*	m/sec	örtliche Anströmgeschwindigkeit
v_0	m/sec	Anströmgeschwindigkeit in der Ebene „Null“
v_1	m/sec	Durchströmgeschwindigkeit in der Ebene „Eins“, Rotorebene
v_2	m/sec	Abströmgeschwindigkeit in der Ebene „Zwei“
v_i	m/sec	induzierte Geschwindigkeit
$v_i(x, \text{ oder } r)$	m/sec	Verteilung der induzierten Geschwindigkeit
v_{i0}	m/sec	induzierte Geschwindigkeit im Schwebeflug
v_r	m/sec	Relativgeschwindigkeit
V_{res}	m/sec	resultierende Anströmgeschwindigkeit
v_t	m/sec	Tangentialanströmungsgeschwindigkeit am Blattelement
v_z	m/sec	senkrechte Fluggeschwindigkeit
V_z	m/sec	$\Sigma v_i + v_z$
w	m/s	axiale Normalgeschwindigkeit
$x = r/R$	-	dimensionsloser Rotorradius
x	m	axiale Längsrichtung
X	N	axiale Längskraft
y	m	axiale Querrichtung
Y	N	axiale Seitenkraft
z	m	axiale Normalrichtung
Z	-	Blattzahl
Z	N	Zentrifugalkraft
Z	N	axiale Normalkraft
Z_p	m	Druckhöhe
Z_σ	m	Dichtehöhe

α	°	aerodynamisch wirksamer Anstellwinkel
α_{Anstr}	°	Anströmwinkel
α_{geom}	°	geometrischer Anstellwinkel
$\bar{\alpha}$	°	mittlere aerodynamische Anstellung
β, β_0	°	Schlagwinkel (Index „null“: Mittellage, Konuswinkel)
γ	-	Lockzahl
γ	°	Steigwinkel
Λ	-	Flügelstreckung
δ, δ_0	°	Schwenkwinkel (Index „null“: Mittellage)
δ_3	°	Rücksteuerungswinkel
ΔN_H	-	Höhenabhängigkeit der Triebwerksleistung
ΔN_T	-	Temperaturabhängigkeit der Triebwerksleistung
ζ	-	relative Dämpfung
ζ_{krit}	-	kritisches Dämpfungsmaß
η_e	-	Einbauwirkungsgrad von Triebwerken
η	-	Wirkungsgrad, Schwebegüte
Φ	°	axiale Hängewinkel
Φ	°	induzierter Winkel
$\vartheta_{0,7;s;c}$	°	Trimmwinkel
ϑ_{Blatt}	°	Blattansteuerungswinkel
Θ	°	axiale Nickwinkel
Θ	°	Steuerwinkel, geometrischer Anstellwinkel
$\Theta, \Theta_{0,1,2}$	°	Ansteuerungswinkel
μ	-	Fortschrittsgrad
ρ_B	kg/m ³	mittlere Blattdichte
σ	-	Flächendichte; Luftdichteverhältnis
τ	sec	Verzögerung der Reaktion auf eine Steuereingabe
τ_p	sec	Phase Delay
φ	-	Luftdruckverhältnis
ω	1/sec	Drehfrequenz; Eigenfrequenz
ω'	1/sec	Schlageigenfrequenz der gedämpften Schwingung
ω_0	1/sec	Nullfrequenz
ω_1	1/sec	Schlageigenfrequenz des gelenklosen Rotors
ω_{BWgain}	rad/sec	Grenzfrequenz Amplitudenverstärkung
$\omega_{BWphase}$	rad/sec	Grenzfrequenz Phasenverschiebung
ω_m	1/sec	Dämpfungsparameter
ω_n	1/sec	Schlageigenfrequenz der ungedämpften Schwingung
$\omega_{n\delta}$	1/sec	Schwenkeigenfrequenz
ψ	°	Umlaufwinkel
Ψ	°	axiale Gierwinkel
Ω	Hz	Rotordrehfrequenz

1 Evolution des Hubschraubers

1.1

Die Natur hat Drehflügler, aber keine Hubschrauber hervorgebracht

Darstellungen historischer Entwicklungen bieten immer einen guten Einstieg in technische Problemkreise. Der Lernprozess der frühen Erfinder ist gleich dem des heutigen Interessenten.

Für den Hubschrauber (HS) gibt es keine natürlichen Vorbilder; u.a. diese Tatsache hat dessen Entwicklung stark verzögert. Aus der Natur kennen wir lediglich antriebs- und steuerungslos autorotierende Drehflügler. Sie nutzen die ihnen mitgegebene potentielle Energie, um durch eine Art Segelflug auch horizontale Strecken zu erfliegen. Doch fehlen ihnen zwei entscheidende Komponenten: Die Natur hat die Maschinenelemente Welle/Nabe oder auch Achse/Nabe nicht entwickelt. Diese Baugruppen sind für den Hubschrauber unabdingbar, weil ohne sie der Pilot und die Nutzlast mit dem Flügel rotieren müssten. Erst nach der Erfindung des Rades war das Prinzip Achse/Nabe bekannt.

Der Kolibri und die Libelle werden oft als natürlicher Hubschrauber gesehen, weil beide den Schwebeflug beherrschen, sogar rückwärts fliegen können und mit ihren Flügeln Kreisflächen bestreichen. Dabei müssen aber beide ihre Flügel nach vorn und wieder zurück bewegen! Sie sind damit nicht einmal Drehflügler.

Erschwerend zu dem Mangel an natürlichen Vorbildern kam hinzu, dass viele Problemkreise in ihrer vollen Tiefe erst erkannt werden konnten, als man begann, sich mit solchem Fluggerät intensiver zu befassen. Dabei handelt es sich vor allem um Probleme der *Dynamik* und der *Flugmechanik*.

1.1.1

Entwicklung des Hubschraubers

Erste Ansätze, den Luftraum zu erobern, findet man in China bereits vor unserer Zeitrechnung. Dort war man mit einem Gerät, das wir heute als Kinderdrachen bezeichnen würden, der restlichen Welt flugtechnisch weit voraus. Es wurden damit angeblich bereits Personen und Lasten in die Luft gehoben.

In diese Zeit fällt mit hoher Wahrscheinlichkeit auch die Erfindung des „*chinesischen Luftkreisels*“, eines Spielzeugs, das auch bei uns mindestens seit dem 14. Jahrhundert bekannt ist, wie Bild 1.1 oben rechts zeigt und das auch heute noch hergestellt wird, freilich entsprechend den modernen Möglichkeiten verbes-

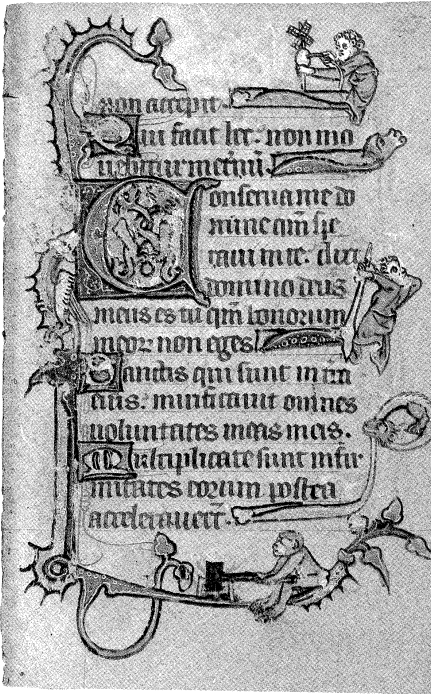


Bild 1.1 Flämische Illustration von 1325

sert. Es handelte sich um ein rotorähnliches Gebilde aus angestellten Vogelfedern. Wenn es in Drehung versetzt wurde, konnte es, ähnlich einem Hubschrauber, senkrecht in die Luft aufsteigen.

Leonardo da Vinci (1452–1519) baut erstaunlicherweise nicht auf dem Prinzip des Luftkreisels auf, als er sich im 15. Jahrhundert mit dem Hubschrauberprinzip beschäftigt.

Vielleicht verhalfen seine Kenntnisse über die Funktion der archimedischen Wasserschraube, damals schon seit langer Zeit bei der Wasserförderung im praktischen Einsatz, dem Universalgenie zu der Erkenntnis, dass eine wendelförmige Fläche an einem vertikalen Mast, mit ausreichender Geschwindigkeit in Umdrehung versetzt, imstande sein müsste, durch Beschleunigen von Luft nach unten eine Last vom Boden zu heben und in der Luft zu halten.

Dass dazu die Luftdichte ausreichen müsste, hatte er aus der Bewegung von Blättern im Wind gefolgert. Leonardo hielt seine Überlegungen zum Hubschrauber-Prinzip auf der bekannten Skizze fest, Bild 1.2. Sie zeigt eine Wendelschraube mit senkrechter Achse und einer Plattform als Basis. Eine darauf stehende Person sollte die Luftschraube antreiben.

Das Problem des *Drehmomentenausgleiches* wurde von Leonardo da Vinci nicht gelöst. Der gesamte Problembereich der *Flugsteuerung* lag noch außerhalb seiner Betrachtungen. Der von ihm vorgesehene Motor Mensch ist zum *Antrieb* eines solchen Fluggerätes nicht leistungsfähig genug.

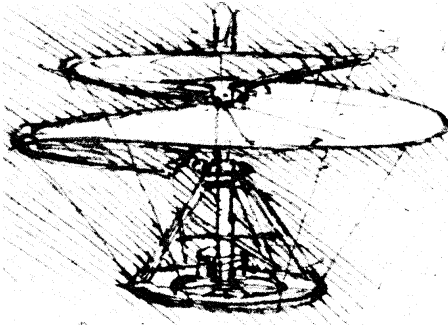


Bild 1.2 Leonardo da Vincis „Helikopter“

Leonardo da Vinci gilt als der Vater des Hubschraubers, auf ihn geht der Wortstamm für den Begriff „Helikopter“ („helix“ = Spirale, „pteron“ = Flügel) zurück, obwohl diese Bezeichnung schon nicht auf die damalige und erst recht nicht auf die heutigen Konfigurationen zutrifft; er wird trotzdem im Englischen benutzt.

Stellvertretend für die Vielzahl der aus den 18. und 19. Jahrhunderten bekannten hubschrauberähnlichen Fluggeräte sollen nur einige der wesentlichen Erfindernamen genannt werden: Michail Lomonossow (1711–1765, nach ihm ist die Moskauer Universität benannt), Bau eines Hubschraubermodells mit *koaxialen Rotoren* zur Erforschung der Atmosphäre. 1861 erhält Gustave de Ponton d’Amecourt ein Patent auf ein koaxiales Rotorenkonzept.

Beiden war offensichtlich die Notwendigkeit des Drehmomentenausgleichs bewusst. Sie erfüllten diese durch Einbau zweier gegenläufiger Hauptrotoren.

Im Jahre 1874 skizzieren Fritz und Wilhelm von Achenbach einen Hubschrauber mit *Haupt- und Heckrotor*, Bild 1.3. Als Antrieb sollte eine Dampfmaschine dienen.

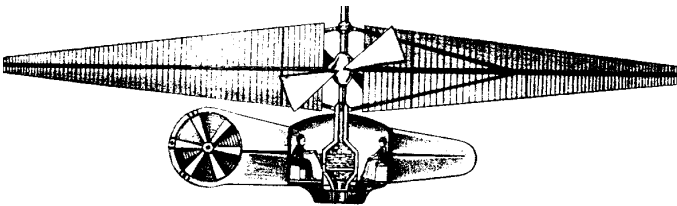


Bild 1.3 Heutige „Standard-HS-Konfiguration“

Um 1890 unternimmt Wilhelm Kress Messungen an einem Fluggerät mit Koaxialrotoren. Er ermittelte den Zusammenhang von Rotordurchmesser, Leistung und Auftrieb.

Schon sehr früh war also erkannt, dass und wie das Rotordrehmoment auszugleichen ist. Die Gebrüder von Achenbach schlugen sogar schon die heute gebräuchlichste Hubschrauberkonfiguration vor. Sicher wurde auch festgestellt, dass kein geeigneter Antrieb zur Verfügung stand, die bekannte Dampfmaschine hatte keine ausreichende Leistungsdichte.

Befruchtend und anspornend wirkten die sonstigen Fortschritte der Flugtechnik. Sie erbrachten Erkenntnisse, die auch dem Hubschrauber von hohem Nutzen waren.

In den Jahren 1891–1896 absolvierte Otto Lilienthal mehr als 2000 Gleitflüge. Lilienthal könnte somit als der Vater des Segelfluges betrachtet werden. Mit Sicherheit ist er der Vater des Drachenfluges. Er hat im Rahmen der Entwicklung seiner mit Gewichtsverlagerung gesteuerten Gleitapparate als erster nachweislich *Profilpolaren* vermessen: ein Diagramm zentraler Bedeutung für die gesamte Flugtechnik. Seine Flugapparate hat er bereits vermarktet. Die späteren Erfinder der ersten motorisierten Flugzeuge haben von seinen Gleitflügen profitiert. Die heutigen Flugdrachen stellen wohl das dar, was sich Lilienthal in seinen kühnsten Träumen erhofft hatte.

Oft unerwähnt bleibt folgender entscheidender Beitrag zur Luftfahrttechnik: Zur Jahrhundertwende hatte der *Verbrennungsmotor*, 1862 von *F. A. Otto* erfunden und erstmalig 1876 verwirklicht, seine Einsatzreife und eine für die Verwendung in der Luftfahrt ausreichende Leistungsdichte erlangt. Erst damit war der Weg frei für den Bau leistungsfähiger Fluggeräte, ob Drehflügler, Starrflügler oder Luftschiff.

Ursprüngliche HS-Enthusiasten wandten sich einfacheren Aufgaben zu:

Dayton, Ohio

15. Januar 1909

„Wie alle Neulinge begannen wir mit dem Hubschrauber, sahen aber bald ein, dass Hubschrauber einfach keine Zukunft haben und ließen daher das Projekt fallen. Der Hubschrauber vermag nur mit größter Anstrengung das zu tun, was ein Ballon ohne Mühe schafft, und er ist keinesfalls besser als der Ballon 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.“

Wilbur Wright

Die Gebrüder *Wilbur* und *Orville Wright* bauten einen Starrflügler, mit dem sie 1903 erstmals flogen. Dieser Erfolg war nur möglich, da sie sehr zielstrebig, ingenieurmäßig und öffentlichkeitswirksam vorgehen. Über Gleitflüge und Windkanalversuche kamen sie zu ihrem Wright Flyer, dem ersten bekannt gewordenen bemannten, gesteuerten und motorisierten Fluggerät der Menschheit.

Mit hoher Wahrscheinlichkeit kannten die Gebrüder Wright *Gustav Weißkopf*, der sich, nach Amerika ausgewandert, dort *Whitehead* nannte. Über ihn liegen Informationen vor, wonach er schon vorher ein ebenso lufttüchtiges Flugzeug gebaut und 1901 erstmals geflogen habe. Leider geschah dies nicht öffentlichkeitswirksam und auch deshalb unzureichend dokumentiert.

Am 18.8.1903, also ein halbes Jahr vor den Wrights, flog Karl Jatho bei Hannover erstmalig mit seinem Dreiecker und im November mit einem Doppeldecker. Für beide Flüge gibt es Zeugenaussagen. Jatho scheiterte an den Kosten, vor allem für die Motorisierung seiner Flugzeuge.

Der Wright Flyer war jedoch allen anderen bekannten Fluggeräten dieser Zeit objektiv weit voraus. Obwohl flugmechanisch instabil, war er dank seiner sehr guten Steuerbarkeit gut fliegbar. Mit ihm begann explosionsartig die ingenieurmäßige Weiterentwicklung der *Fluggeräte schwerer als Luft*. Solche Geräte sind in allen Einzelteilen schwerer als Luft, sie nutzen zum Flug die *Aerodynamik*.

Am Anfang des 20. Jahrhunderts folgte eine Flut von Rekorden durch ständige Leistungssteigerungen (Geschwindigkeit, Flugdauer, Flughöhe, Blindflug) und der Entwicklung eines breiten Anwendungsspektrums (zivil und militärisch).

Wichtige Meilensteine waren:

1919: erste Atlantiküberquerung durch Alcock und Brown,

1927: erste Atlantiküberquerung im Alleinflug durch Charles Lindberg,

1939: erstes Flugzeug mit Strahlantrieb, die He 178, mit einem TL-Triebwerk von Pabst von Ohain. Konstrukteur war E. Heinkel.

Der Schwebeflug war schon früher bekannt, nämlich mit *Fluggeräten leichter als Luft*. Sie bestehen größtenteils aus Bauteilen, die schwerer sind als Luft. Durch Integration von Elementen leichter als Luft entsteht ein Gerät, das in der Summe leichter ist als Luft, also *aerostatisch* fliegt.

Das dazu erforderliche Material für Fluggeräte leichter als Luft war schon sehr früh vorhanden, nämlich:

- Papier, Seide, leichte Stoffe,
- warme und deshalb aufsteigende Luft (Die glühende Asche eines Feuers steigt sichtbar auf!).

Aus diesem Grunde ist es erstaunlich, warum es so lange dauerte, bis der Heißluftballon und, auf dieser Erfahrung aufbauend, der Gasballon erfunden wurde:

1783: Heißluftballon der Gebrüder Montgolfier,

1783: Gasballon von Prof. Charles,

1852: luftschiffähnlicher Ballon des Franzosen Henri Giffard mit einer Dampfmaschinenantrieb des Propellers. $N = 2,2 \text{ kW}$, $v = 8 \text{ km/h}$, $R = 30 \text{ km}$.

1900–1930: weltweiter Einsatz von Luftschiffen, als Zepeline bezeichnet, in regelmäßigem Luftverkehr.

In Form von Höhenballons, Sportballons und selten als kommerzielle Luftschiffe sind solche Geräte auch heute noch im Einsatz. Die technischen Grenzen dieser „Aerostaten“ sind eng gezogen. Weitaus leistungsfähigere Fluggeräte, darunter die Hubschrauber, haben deshalb die Fluggeräte leichter als Luft an Bedeutung schnell überholt.

Im ersten Drittel des 20. Jahrhunderts konnte also schon recht zuverlässig geflogen werden, selbst der Schwebeflug war bekannt. Die Notwendigkeit, einen Hubschrauber zu bauen, war deshalb sicher kaum zu begründen. Dazu kam erschwerend die Komplexität des Systems, in Bezug auf Konstruktion und Festigkeit, mit seiner multidimensionalen Dynamik.

Trotzdem befassten sich in fast allen entwickelten Ländern Erfinder mit Fluggeräten, die man heute als Vorläufer der Hubschrauber betrachten kann.

1907:

Gyroplane Nr.1 der Gebrüder Bréguet in Zusammenarbeit mit Professor Richet: mit vier *gegenläufigen Rotoren*, 45-PS-Benzinmotor, 580 kg Abflugmasse. Aber nicht steuerbar!

Tandem-HS von Paul Cornu (Frankreich): mit zwei Rotoren, gegenläufig an Auslegern hintereinander, mit ca. 20 m langen Riemen angetrieben, 24-PS-Antoinette-Motor, 260 kg, nicht steuerbar. Erstes Abheben eines Hubschraubers.

1916:

Jakob Christian Ellehammer (Dänemark) baute einen Hubschrauber mit koaxialen Rotoren, mit *kollektiver und zyklischer Blattverstellung* (der Italiener Crocco hatte dies 1906 vorgeschlagen). Ellehammer ist damit der Erfinder der heute allgemein üblichen *Rotoransteuerung*! Dabei bedeutet kollektive Ansteuerung, dass bei allen Rotorblättern der Anstellwinkel gleichsinnig um den gleichen Betrag verändert wird. Sie bewirkt Schubänderungen. Die zyklischen Ansteuerungen verändern den Blattanstellwinkel über dem Umlauf entsprechend einer sin- bzw. cos-Funktion des Umlaufwinkels. Damit werden die Nick- und Rollbewegungen gesteuert. Ellehammers Fluggerät hat sich allerdings schon am Boden zerlegt.

1918:

Die Ungarn Stefan von Petroczy, Theodore von Kámán, Asboth und Wilhelm Zurovec testeten erfolgreich eine gefesselte Spähplattform (als Alternative zu den damals üblichen Fesselballons, die im Ersten Weltkrieg stellenweise eingesetzt wurden). Merkmale: koaxialer Rotor, drei Motoren mit je 120 PS Leistungsabgabe. Mit diesem Gerät wurde ein Mann 50 m hoch in die Luft gehoben. Zu praktischen Einsätzen kam es nicht.

1919/22:

Henry A. Berliner konstruierte in den USA einen HS mit koaxialen Rotoren und experimentierte mit Hubschraubern mit Rotoren in *SbS* (Side by Side)-Anordnung. Mit beiden unternahm er freie Schwebeflüge von kurzer Dauer.

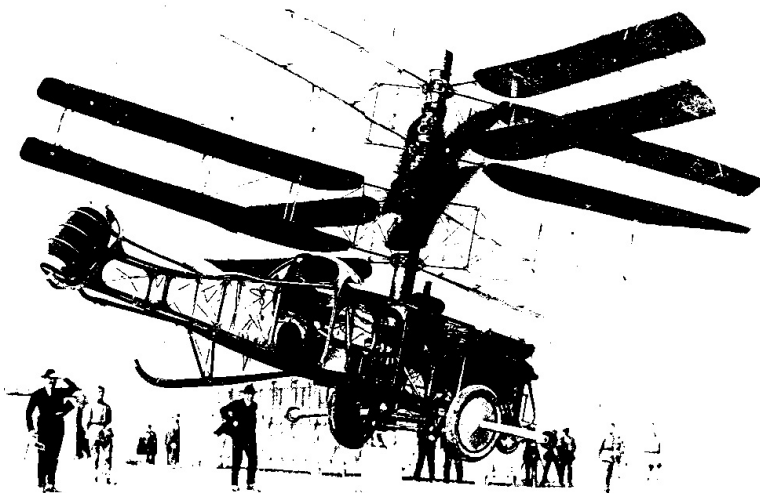


Bild 1.4 4-koaxial-4-Blatt-Rotor-HS von Pescara

1923/1924:

Der in Argentinien geborene Marquis Paul Pateras Pescara erzielte mit seinem dritten HS-Projekt, mit vier koaxialen Rotoren mit je vier Blättern (Bild 1.4) einen überlegenen Fortschritt gegenüber allen bis dahin gebauten Geräten. Die Steueror-

gane für kollektive und zyklische Blattverstellung funktionierten. Bei Motorausfall konnte dieser HS schon autorotieren und blieb steuerbar. 1924 flog er ca. 700 m weit („fliegender Totempfahl“).

1923:

Dr. George de Bothezat flog in den USA einen HS mit vier Rotoren auf Auslegern und zwei zusätzlichen kleineren Steuerrotoren.

Merkmale dieses damals größten HS der Welt: 220 PS, 1600 kg Abflugmasse, Pilot und Passagiere.

1924:

Etienne Oemichen, ein aus der französischen Automobilindustrie kommender Ingenieur, baute einen Hubschrauber, der von den damaligen Zeitgenossen als eine „Ansammlung von Windmühlen“ bezeichnet wurde. Merkmale: vier Hauptrotoren (verstellbar), fünf Propeller zur Stabilisierung, zwei Propeller zum Vortrieb, ein Propeller zur Steuerung, 180-PS-Gnôme-Motor. Obwohl er mit diesem außerordentlich komplizierten Gerät den ersten offiziell anerkannten „Weltrekord“ für Hubschrauber flog (Reichweite 525 m), muss dieser Weg als eine technische Sackgasse eingestuft werden. Das gleiche gilt für die Geräte von Bothezat und Pescara.

1925-1930:

Die heute gebräuchliche Rotoranordnung mit je einem Haupt- und Heckrotor versuchte der Holländer A. G. von Baumhauer zu realisieren, wobei er den Hauptrotor, der ca. 15 m Durchmesser hatte, mit einem 200-PS-Motor antrieb. Für den Antrieb des Heckrotors verwendete er einen eigenen Motor mit 80 PS. Der Erstflug fand 1930 statt. Nach dem Bruch eines Hauptrotorblattes wurden die Versuche nicht mehr fortgeführt, obwohl dieses Gerät sehr nahe an der heutigen Standardkonfiguration war.

1930:

Nicholas Florine erprobte in Belgien relativ erfolgreich einen HS mit *Tandem-Rotoranordnung*. Dieser HS, der zwei Vierblattrotoren von 7,2 m Durchmesser hatte, ca. 950 kg wog und von einem 220-PS-Hispano-Suiza-Motor angetrieben wurde, erlaubte Schwebeflüge von bis zu zehn Minuten.

Der von d'Ascanio konstruierte HS mit koaxialen Rotoren und drei verstellbaren Zusatzpropellern stellte mit seinen „Weltrekorden“ den Maßstab für die damalige Zeit dar, seine Flugleistungen:

Streckenflug: 1078 m, Flughöhe: 18 m, Flugdauer: 9 min.

1932:

Unter der Leitung von Jurjew wurde in der Sowjetunion ein Hubschrauber mit einem Hauptrotor und je zwei Steuerrotoren am Bug und am Heck entwickelt. Dieser Hubschrauber hatte bei 1200 kg Abflugmasse zwei Motoren mit je 120 PS Leistung und ermöglichte angeblich relativ erfolgreiche Schwebeflüge.

1930-1935:

Zu erwähnen ist noch, dass von Asboth in Ungarn und Rieseler in Deutschland mit Hubschraubern mit koaxialen Rotoren experimentierten, bei denen die Steuerbarkeit mit *Leitwerken im Rotorabwind* verbessert werden sollte.

Die Abbrüche all dieser Projekte waren Folge der noch nicht beherrschten Komplexität des Systems Hubschrauber. Auf die Problematik der Flugeigenschaf-

ten war noch keiner gestoßen. Bedauerlicherweise wurden auch ausgesprochene Irrwege beschritten.

1.1.2

Periode der Tragschrauber (1919–1935)

Obwohl der Spanier Juan de la Cierva keinen Hubschrauber im Sinn hatte, leistete er bei der Entwicklung seiner Tragschrauber (Autogiro, Bild 1.5) entscheidende Beiträge zur Verwirklichung des Hubschraubers. Die ihm gestellte Aufgabe forderte ein überzihsicheres Flugzeug.

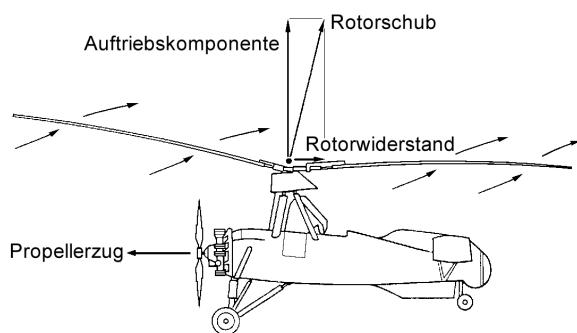


Bild 1.5 Tragschrauber

Beim Tragschrauber handelt es sich um ein Fluggerät, bei dem der Vortrieb durch einen Propeller und der Auftrieb durch einen Drehflügel in Segelstellung erzeugt wird. Ein derartiges Fluggerät benötigt nur extrem kurze Start- und Landestrecken in Kombination mit der Fähigkeit, sehr langsam fliegen zu können. VTOL (Vertical Take Off and Landing) ist jedoch nicht möglich.

Die Tragschraube (der Drehflügel) wird nur vom Fahrtwind in Eigendrehung (Autorotation) versetzt. Damit entfällt das Problem des Drehmomentenausgleichs, mit dem die Ingenieure beim Hubschrauber zu kämpfen hatten.

1.1.2.1

Erfindung und Verwirklichung des Schlaggelenkes

De La Cierva erreichte mit seinen Tragschraubern schon relativ hohe Flugeschwindigkeiten. Dadurch wurde er erstmalig mit den Auswirkungen, der *asymmetrischen Rotoranströmung* konfrontiert, die bei allen Drehflüglern im Vorwärts-

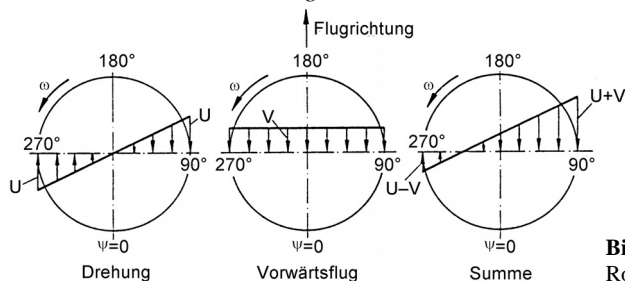


Bild 1.6 Anströmung der Rotorblattelemente