

Walter Bittner

Flugmechanik der Hubschrauber

Technologie,
das flugdynamische System Hubschrauber,
Flugstabilitäten, Steuerbarkeit

3., aktualisierte Auflage

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 (as 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 Hubschraubermissionen und Markt.....	19
3 Wesentliche Bauelemente 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
3.2.6 Belastung des Rotormastes	41

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	92
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	97
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
8.4.2.4 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	132
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 langsamem 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	193
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
 Herangezogene Literatur	232
 Bildnachweis	233
 Stichwortverzeichnis	234