

Inhaltsverzeichnis

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 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
4 Grundzüge der Leistungsrechnung	45
4.1 Strahltheorie (Bernoulli).....	45
4.1.1 Der stationäre Schwebeflug	47
4.1.2 Reale Rotoren im Schwebeflug.....	48
4.1.3 Senkrechter Steigflug (idealer Rotor)	49
4.1.4 Senkrechter Sinkflug (idealer Rotor)	51

4.1.4.1	Der langsame Sinkflug	51
4.1.4.2	Das Wirbelringstadium (WR).....	51
4.1.4.3	Der schnelle Sinkflug	52
4.1.4.4	Autorotation (AR)	52
4.1.4.5	Strahlkontraktion	53
4.1.4.6	Übergang zum Flug mit Horizontalgeschwindigkeit.....	53
4.2	Die Blattelementenmethode.....	54
4.2.1	Ideale Verwindung.....	56
4.2.2	Mittlere aerodynamische Beiwerte und Einstellwinkel.....	60
4.2.3	Reale und sonstige Effekte.....	61
4.2.3.1	Ungleichförmige induzierte Geschwindigkeit	62
4.2.3.2	Blattspitzenverluste	63
4.2.3.3	Trapezform, Zuspitzung	64
4.2.3.4	Bodeneffekt	65
4.2.3.5	Drall, Zirkulation, dynamische Verwindung, Grenzschicht.....	66
4.2.3.6	Leistungsbedarf im Schwebeflug	67
5	Die Schlagbewegung der Rotorblätter.....	69
5.1	Trägheitsmoment des Rotorblattes	69
5.2	Herleitung der Schlaggleichung.....	70
5.2.1	Rotoren mit zentralem Schlaggelenk	70
5.2.2	Ein Blick in die Schwingungslehre	71
5.2.3	Rotoren mit Schlaggelenksabstand	73
5.3	Die Schlagbewegung unter Einbeziehung der Luftkräfte	74
5.4	Der gelenklose Rotor	76
5.5	Quantifizierung der Schlagbewegung.....	78
5.5.1	Die Rotoransteuerung	79
5.5.2	Der Konuswinkel	79
5.5.3	Die Schlagkoeffizienten.....	81
6	Die Schwenkbewegung der Rotorblätter	83
6.1	Schwenken zunächst ohne Coriolis- und Luftkräfte	83
6.2	Die Schwenkbewegung unter Berücksichtigung der Luft- und der Corioliskräfte	85
7	Die höherfrequenten Rotorblattschwingungen	87
7.1	Blattverformungen, das Resonanzdiagramm	87
7.2	Formänderungen des Rotorsystems, Luft- und/oder Bodenresonanz	89
7.3	Unterdrückung von Schwingungen und Vibrationen.....	92

8 Leistungsbedarf, Flugleistungen	94
8.1 Einsatzenvelope von Hubschraubern	94
8.2 Wichtige Leistungsparameter und -begriffe	94
8.3 Standardbedingungen, Druckhöhe/Dichtehöhe	94
8.4 Die Leistungspolare	96
8.4.1 Schwebeflug.....	96
8.4.2 Vorwärtsflug.....	96
8.4.2.1 Induzierte Leistung.....	97
8.4.2.2 Profilwiderstandsleistung	99
8.4.2.3 Schädliche Leistung	99
8.4.2.3 Manöverleistung am Beispiel „Steigen“	100
8.4.3 Gesamtleistungsbedarf.....	101
8.5 Flugleistungen.....	104
8.5.1 Triebwerksleistungen.....	104
8.5.2 Leistungsbilanzen	106
8.6 Höhen-/Geschwindigkeitsdiagramm, Avoid Zones	112
8.7 Autorotation (AR).....	114
9 Auslegung des Hauptrotors	117
9.1 Rotordurchmesser	118
9.2 Blattspitzenumlaufgeschwindigkeit.....	119
9.3 Blattgeometrie.....	120
9.3.1 Blattflächen und -tiefen.....	124
9.3.2 Manövrierbarkeit.....	125
9.3.3 Blattzahl	125
9.3.4 Trapezform, Zuspitzung.....	126
9.3.5 Verwindung	127
9.4 Profilierung.....	130
9.4.1 Grenzen des maximalen Auftriebsbeiwertes, stationär	131
9.4.2 Maximale Auftriebsbeiwerte im Bereich hoher Machzahlen.....	132
9.4.3 Instationäre Auftriebsbeiwerte	133
9.4.4 Der Widerstandsbeiwert, stationär und dynamisch.....	134
9.4.5 Der Momentenbeiwert stationär und dynamisch	134
9.4.6 Feinabstimmungen der Profilierung.....	137
9.5 Weitere Auslegungsparameter	139
9.5.1 Drehrichtung, Trägheitsmomente, Blattspitzen	139
9.5.2 Zusammenstellung aktueller Rotoren	140
10 Der Hubschrauber als Gesamtsystem	143
10.1 Die Bewegungsgleichungen	144
10.1.1 Der allgemeine instationäre Flug	144
10.1.2 Eingrenzung der Freiheitsgrade	146
10.1.3 Der stationäre Flug.....	147

10.1.3.1	Schwebeflug als Grenzfall sehr langsamen Vorwärtsfluges	147
10.1.3.2	Stationärer Vorwärtsflug	148
10.2	Flugdynamik	148
10.2.1	Linearisierter Ansatz für die Luftkräfte	149
10.2.2	Die Bewegungsgleichungen für kleine Störungen	150
10.2.3	Flugdynamische Eigenschaften	152
10.2.3.1	Ermittlung der Eigenwerte	152
10.2.3.2	Laplace-Transformation der Bewegungsgleichungen	156
10.2.3.3	Dynamikmatrix, charakteristische Gleichung	156
10.2.3.4	Stabilitätskriterien	157
10.2.3.5	Typische Eigenwerte eines Beispiel-Hubschraubers	161
10.2.4	Inverse Bestimmung der Derivativa, Übertragungsfunktionen	166
10.2.4.1	System- oder Parameter-Identifikation	168
10.2.4.2	Multidimensionale Vorgehensweise der Flugregelung	168
11	Flugtechnische Stabilitäten	170
11.1	Die statische Längsstabilität	170
11.2	Die Anstellwinkelstabilität	171
11.3	Richtungsstabilität, Spiralbewegung	171
11.4	Das laterale Gleichgewicht	172
11.5	Dynamische Stabilität	173
11.6	Mindestforderungen bezüglich der Stabilitäten	174
11.7	Künstliche Stabilität, Flugregelung	174
11.8	Kopplungen	177
12	Steuerbarkeit	183
12.1	Steuerbarkeitsforderungen an Zivilhubschrauber	184
12.2	Zeitkonstante, Steuerempfindlichkeit, -wirksamkeit	184
12.3	Rating Scales	187
12.4	Normpilotenmodell	188
12.5	Das Steuerbarkeitsdiagramm	189
12.5.1	Langsame Steuereingaben	189
12.5.2	Ursprüngliche Forderungen	189
12.5.3	Neufassung der Steuerbarkeitsforderungen	191
12.6	Höherfrequente Ansteuerungen/Reaktionen	194
12.6.1	Dynamische Stabilitätskriterien mittelschneller Reaktionsbewegungen	194
12.6.1.1	Die Nickbewegung	195
12.6.1.2	Die Rollbewegung	196
12.6.2	Sekundärreaktionen	197
12.6.3	Hochfrequente rückkoppelnde Steuerbewegungen kleiner Amplituden	198
12.6.3.1	Grundlagen	199

12.6.3.2 Geforderte Systemeigenschaften	202
12.6.3.3 Ergebnisse aus der Flugerprobung	206
12.6.3.4 Vergleichende Darstellung von Messergebnissen	207
12.7 Flugerprobung unter Berücksichtigung der neuen Kriterien.....	209
13 Spiegelung des Aeronautical Design Standard 33 an Projekten .	210
13.1 Nachweisbedingungen	211
13.1.1 Zuordnung der Leistungskategorien zu den MTE.....	211
13.1.2 Sichtverhältnisse, G/DVE	213
13.1.3 Hilfen zur Wahrnehmung der Umgebung, UCE	213
13.1.4 Einsatzenvelope (Operational Flight Envelope, OFE)	214
13.1.5 Geteilte Aufmerksamkeit (Divided Attention Operation, DAO).....	215
13.1.6 Ausfälle	215
13.2 Die neue Systematik in der Praxis	216
13.2.1 Definitionen und Generelles	217
13.2.2 Quantitative Kriterien	218
13.2.3 Hochfrequente Steuerbarkeit der UH-60A Black Hawk	220
13.3 Flugversuchsmanöver	221
13.3.1 Flugversuchsmanöver für Transporthubschrauber	221
13.3.2 Definition der Versuchsbedingungen und -manöver.....	222
13.3.3 Auswertung der Messkampagnen	225
14 Ausblick	227
Herangezogene Literatur	229
Bildnachweis	231
Stichwortverzeichnis	233