

# Inhaltsverzeichnis

<b>Verwendete Formelzeichen.....</b>	<b>XIX</b>
<b>1 Evolution des Hubschraubers .....</b>	<b>1</b>
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
<b>2 Hubschraubermissionen und Markt .....</b>	<b>19</b>
<b>3 Wesentliche Bauelemente der Hubschrauber .....</b>	<b>31</b>
3.1 Übersichten.....	31
3.2 Beschreibung und Wirkungsweise des Hauprotors .....	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

<b>4 Grundzüge der Leistungsrechnung .....</b>	<b>47</b>
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, Zusitzung.....	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
 <b>5 Die Schlagbewegung der Rotorblätter .....</b>	<b>71</b>
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
 <b>6 Die Schwenkbewegung der Rotorblätter .....</b>	<b>85</b>
6.1 Schwenken zunächst ohne Coriolis- und Luftkräfte.....	85
6.2 Die Schwenkbewegung unter Berücksichtigung der Luft- und der Corioliskräfte.....	87

<b>7 Die höherfrequenten Rotorblattschwingungen .....</b>	<b>89</b>
7.1 Blattverformungen, das Resonanzdiagramm.....	89
7.2 Formänderungen des Rotorsystems, Luft- und/oder Bodenresonanz .....	92
7.3 Unterdrückung von Schwingungen und Vibrationen .....	94
<b>8 Leistungsbedarf, Flugleistungen .....</b>	<b>96</b>
8.1 EinsatzEnvelope von Hubschraubern.....	96
8.2 Wichtige Leistungsparameter und -begriffe .....	96
8.3 Standardbedingungen, Druckhöhe/Dichtheit .....	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
8.4.2.3 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) .....	118
<b>9 Auslegung des Hauptrotors .....</b>	<b>121</b>
9.1 Rotordurchmesser.....	122
9.2 Blattspitzenumlaufgeschwindigkeit .....	123
9.3 Blattgeometrie .....	124
9.3.1 Blattflächen und -tiefen .....	128
9.3.2 Manövriertbarkeit .....	129
9.3.3 Blattzahl .....	129
9.3.4 Trapezform, Zuspitzen .....	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

<b>10 Der Hubschrauber als Gesamtsystem</b>	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
<b>11 Flugtechnische Stabilitäten</b> .....	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
<b>12 Steuerbarkeit</b> .....	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
<b>13 Spiegelung des Aeronautical Design Standard 33 an Projekten ..</b>	<b>214</b>
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
<b>14 Ausblick .....</b>	<b>231</b>
<b>Herangezogene Literatur .....</b>	<b>232</b>
<b>Bildnachweis .....</b>	<b>234</b>
<b>Stichwortverzeichnis .....</b>	<b>235</b>