

# 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 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

<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, 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
<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/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
8.4.2.3 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 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

<b>10 Der Hubschrauber als Gesamtsystem</b>	<b>147</b>
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
<b>11 Flugtechnische Stabilitäten</b>	<b>174</b>
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>	<b>187</b>
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 Flugprobung .....	210
12.6.3.4	Vergleichende Darstellung von Messergebnissen.....	211
12.7	Flugprobung 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 .....234**

## **Stichwortverzeichnis ..... 235**