

# 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)<br>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,<br>Grenzschicht.....                     | 68        |
| 4.2.3.6  | Leistungsbedarf im Schwebeflug.....                                                 | 69        |
| <b>5</b> | <b>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</b> | <b>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<br>Corioliskräfte..... | 87        |
| <b>7</b> | <b>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</b>  | <b>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</b>  | <b>Auslegung des Hauptrotors .....</b>                              | <b>123</b> |
| 9.1       | Rotordurchmesser.....                                               | 124        |
| 9.2       | Blattspitzenumlaufgeschwindigkeit .....                             | 125        |
| 9.3       | Blattgeometrie .....                                                | 126        |
| 9.3.1     | Blattflächen und -tiefen .....                                      | 130        |
| 9.3.2     | Manövrierbarkeit .....                                              | 131        |
| 9.3.3     | Blattzahl.....                                                      | 131        |
| 9.3.4     | Trapezform, Zuspitzung .....                                        | 132        |
| 9.3.5     | Verwindung .....                                                    | 134        |
| 9.4       | Profilierung.....                                                   | 136        |
| 9.4.1     | Grenzen des maximalen Auftriebsbeiwertes, stationär.....            | 137        |
| 9.4.2     | Maximale Auftriebsbeiwerte im Bereich hoher Machzahlen ....         | 138        |
| 9.4.3     | Instationäre Auftriebsbeiwerte.....                                 | 139        |
| 9.4.4     | Der Widerstandsbeiwert, stationär und dynamisch .....               | 140        |
| 9.4.5     | Der Momentenbeiwert stationär und dynamisch .....                   | 140        |
| 9.4.6     | Feinabstimmungen der Profilierung .....                             | 143        |
| 9.5       | Weitere Auslegungsparameter.....                                    | 145        |
| 9.5.1     | Drehrichtung, Trägheitsmomente, Blattspitzen .....                  | 145        |
| 9.5.2     | Zusammenstellung aktueller Rotoren .....                            | 146        |
| <b>10</b> | <b>Der Hubschrauber als Gesamtsystem .....</b>                      | <b>149</b> |

|                                                                                     |            |
|-------------------------------------------------------------------------------------|------------|
| 10.1 Die Bewegungsgleichungen .....                                                 | 150        |
| 10.1.1 Der allgemeine instationäre Flug .....                                       | 150        |
| 10.1.2 Eingrenzung der Freiheitsgrade .....                                         | 152        |
| 10.1.3 Der stationäre Flug .....                                                    | 153        |
| 10.1.3.1 Schwebeflug als Grenzfall sehr langsamen<br>Vorwärtsfluges .....           | 153        |
| 10.1.3.2 Stationärer Vorwärtsflug .....                                             | 154        |
| 10.2 Flugdynamik .....                                                              | 154        |
| 10.2.1 Linearisierter Ansatz für die Luftkräfte .....                               | 155        |
| 10.2.2 Die Bewegungsgleichungen für kleine Störungen .....                          | 156        |
| 10.2.3 Flugdynamische Eigenschaften .....                                           | 158        |
| 10.2.3.1 Ermittlung der Eigenwerte .....                                            | 158        |
| 10.2.3.2 Laplace-Transformation der Bewegungsgleichungen ..                         | 162        |
| 10.2.3.3 Dynamikmatrix, charakteristische Gleichung .....                           | 162        |
| 10.2.3.4 Stabilitätskriterien .....                                                 | 163        |
| 10.2.3.5 Typische Eigenwerte eines Beispiel-Hubschraubers ..                        | 167        |
| 10.2.4 Inverse Bestimmung der Derivativa, Übertragungsfunktionen .                  | 172        |
| 10.2.4.1 System- oder Parameter-Identifikation .....                                | 174        |
| 10.2.4.2 Multidimensionale Vorgehensweise der Flugregelung                          | 174        |
| <br><b>11 Flugtechnische Stabilitäten .....</b>                                     | <b>176</b> |
| 11.1 Die statische Längsstabilität .....                                            | 176        |
| 11.2 Die Anstellwinkelstabilität .....                                              | 177        |
| 11.3 Richtungsstabilität, Spiralbewegung .....                                      | 177        |
| 11.4 Das laterale Gleichgewicht .....                                               | 178        |
| 11.5 Dynamische Stabilität .....                                                    | 179        |
| 11.6 Mindestforderungen bezüglich der Stabilitäten .....                            | 180        |
| 11.7 Künstliche Stabilität, Flugregelung .....                                      | 180        |
| 11.8 Kopplungen .....                                                               | 183        |
| <br><b>12 Steuerbarkeit .....</b>                                                   | <b>189</b> |
| 12.1 Steuerbarkeitsforderungen an Zivilhubschrauber .....                           | 190        |
| 12.2 Zeitkonstante, Steuerempfindlichkeit, -wirksamkeit .....                       | 190        |
| 12.3 Rating Scales .....                                                            | 193        |
| 12.4 Normpilotenmodell .....                                                        | 194        |
| 12.5 Das Steuerbarkeitsdiagramm .....                                               | 195        |
| 12.5.1 Langsame Steuereingaben .....                                                | 195        |
| 12.5.2 Ursprüngliche Forderungen .....                                              | 195        |
| 12.5.3 Neufassung der Steuerbarkeitsforderungen .....                               | 197        |
| 12.6 Höherfrequente Ansteuerungen/Reaktionen .....                                  | 200        |
| 12.6.1 Dynamische Stabilitätskriterien mittelschneller<br>Reaktionsbewegungen ..... | 200        |
| 12.6.1.1 Die Nickbewegung .....                                                     | 201        |
| 12.6.1.2 Die Rollbewegung .....                                                     | 202        |

|           |                                                                       |            |
|-----------|-----------------------------------------------------------------------|------------|
| 12.6.2    | Sekundärreaktionen .....                                              | 203        |
| 12.6.3    | Hochfrequente rückkoppelnde Steuerbewegungen kleiner Amplituden ..... | 204        |
| 12.6.3.1  | Grundlagen .....                                                      | 205        |
| 12.6.3.2  | Geforderte Systemeigenschaften .....                                  | 208        |
| 12.6.3.3  | Ergebnisse aus der Flugerprobung .....                                | 212        |
| 12.6.3.4  | Vergleichende Darstellung von Messergebnissen .....                   | 213        |
| 12.7      | Flugerprobung unter Berücksichtigung der neuen Kriterien .....        | 215        |
| <b>13</b> | <b>Spiegelung des Aeronautical Design Standard 33 an Projekten ..</b> | <b>216</b> |
| 13.1      | Nachweisbedingungen .....                                             | 217        |
| 13.1.1    | Zuordnung der Leistungskategorien zu den MTE .....                    | 217        |
| 13.1.2    | Sichtverhältnisse, G/DVE .....                                        | 219        |
| 13.1.3    | Hilfen zur Wahrnehmung der Umgebung, UCE .....                        | 219        |
| 13.1.4    | Einsatzenvelope (Operational Flight Envelope, OFE) .....              | 220        |
| 13.1.5    | Geteilte Aufmerksamkeit (Divided Attention Operation, DAO) ..         | 221        |
| 13.1.6    | Ausfälle .....                                                        | 221        |
| 13.2      | Die neue Systematik in der Praxis .....                               | 222        |
| 13.2.1    | Definitionen und Generelles .....                                     | 224        |
| 13.2.2    | Quantitative Kriterien .....                                          | 225        |
| 13.2.3    | Hochfrequente Steuerbarkeit der UH-60A Black Hawk .....               | 227        |
| 13.3      | Flugversuchsmanöver .....                                             | 228        |
| 13.3.1    | Flugversuchsmanöver für Transporthubschrauber .....                   | 228        |
| 13.3.2    | Definition der Versuchsbedingungen und -manöver .....                 | 229        |
| 13.3.3    | Auswertung der Messkampagnen .....                                    | 232        |
| <b>14</b> | <b>Ausblick .....</b>                                                 | <b>234</b> |
|           | <b>Herangezogene Literatur .....</b>                                  | <b>235</b> |
|           | <b>Bildnachweis .....</b>                                             | <b>237</b> |
|           | <b>Stichwortverzeichnis .....</b>                                     | <b>238</b> |

Flugmechanik der Hubschrauber  
Technologie, das flugdynamische System  
Hubschrauber, Flugstabilitäten, Steuerbarkeit  
Bittner, W.  
2014, XXII, 237 S. 125 Abb., Hardcover  
ISBN: 978-3-642-54285-5