

Inhaltsverzeichnis

Abbildungsverzeichnis	XIII
Tabellenverzeichnis	XIX
Bezeichnungen	XXI
Vorwort	XXIX
Danksagung	XXXI

1 Einführung	1
1.1 Einleitung	1
1.2 Die Entwicklungsgeschichte der Drehflügler	2
1.2.1 Literatur zur Geschichte und Theorie des Drehflüglers	2
1.2.2 Von der Antike bis 1900	5
1.2.3 Die Pionierzeit des Hubschraubers: 1900 bis 1936	10
1.2.4 Entwicklungen bis zum Ende des 2. Weltkriegs	21
1.2.5 Entwicklungen nach dem 2. Weltkrieg	31
1.2.6 Entwicklung der Größe und Flugleistungen von Drehflüglern	69
1.2.7 Muskelkraftgetriebene Hubschrauber (Human Powered Helicopter)	71
1.2.8 Elektrische Hubschrauber	73
1.3 Der Blattanschluss am Rotorkopf	73
1.3.1 Einleitung	73
1.3.2 Zentrales Schlaggelenk	76
1.3.3 Gimbalrotor	77
1.3.4 Voll gelenkige Rotoren	78
1.3.5 Gelenklose Rotoren	79
1.3.6 Lagerlose Rotoren	80
1.3.7 Heckrotoren	81
1.4 Grundbegriffe	82
1.4.1 Klassifikation von Luftfahrzeugen	82

1.4.2	Drehflügelkonzepte	82
1.4.3	Marktentwicklung	89
1.4.4	Vergleich zum Flächenflugzeug	90
1.4.5	Steuerelemente	92
1.4.6	Bezeichnungen und Beispielhubschrauber Bo105	92
1.4.7	Hubschraubermuseen	92
1.4.8	Hubschrauberhersteller	95
1.5	Übungen zu Kap. 1	96
1.5.1	Geschichte der Drehflügler	96
1.5.2	Blattanschluss am Rotorkopf	96
1.5.3	Kurzfragen	97
1.6	Literaturverzeichnis	97
2	Grundlagen der Drehflügleraerodynamik	103
2.1	Einleitung	103
2.1.1	Charakterisierung der Flugzustände	103
2.1.2	Aerodynamische Phänomene	106
2.1.3	Grundgleichungen zur Strahltheorie	109
2.2	Schwebeflug	110
2.2.1	Induzierte Geschwindigkeit	110
2.2.2	Druckverlauf	114
2.2.3	Schub und Leistung	115
2.2.4	Dimensionslose Beiwerte	118
2.2.5	Profilwiderstand und globale Korrekturen	119
2.2.6	Einfluss der Kompressibilität	121
2.2.7	Leistungsgütegrad	122
2.2.8	Blattspitzenverluste	124
2.2.9	Spezifische Rotorblattbelastung	126
2.2.10	Leistungs- und Flächenbelastung	130
2.3	Axialer Steig- und Sinkflug	132
2.3.1	Strömungszustände im axialen Flug	132
2.3.2	Steigflug	134
2.3.3	Schneller Sinkflug: Windmühlenstadium	135
2.3.4	Langsamer Sinkflug, Wirbelringstadium	136
2.3.5	Leistungsbedarf im axialen Flug	137
2.3.6	Autorotation	139
2.3.7	Strahleinschnürung	141
2.3.8	Bodeneffekt	143
2.3.9	Nachbarschaft von Rotoren	144
2.3.10	Ummantelte Rotoren	145

2.4	Vorwärtsflug	148
2.4.1	Schub und Leistung	148
2.4.2	Induzierte Geschwindigkeit	151
2.4.3	Leistungsbedarf im Vorwärtsflug	155
2.4.4	Bodeneffekt im Vorwärtsflug	156
2.4.5	Wirbelringstadium im Vorwärtsflug	157
2.5	Übungen zu Kap. 2	158
2.5.1	Kurzfrage	158
2.5.2	Strahltheorie	158
2.5.3	Leistungsrechnung mit der Strahltheorie	160
2.5.4	Leistungsrechnung: Bodeneffekt, Steigflug, Sinkflug, Autorotation	161
2.6	Literaturverzeichnis	163
3	Die Blattelemententheorie	167
3.1	Einleitung	167
3.2	Koordinatensysteme	173
3.3	Schwebeflug sowie axialer Steig- und Sinkflug	175
3.3.1	Grundlegende Zusammenhänge	175
3.3.2	Näherungslösungen für Schub und Leistung	177
3.3.3	Lösung für unverwundene Rotorblätter und konstan- ten Durchflussgrad	178
3.3.4	Blattspitzenverluste, Profilwiderstand	180
3.3.5	Beispiel der Anwendung	182
3.3.6	Lösung für linear verwundene Rotorblätter und kon- stanten Durchfluss	185
3.4	Kombinierte Blattelementen- und Strahltheorie	186
3.4.1	Induzierter Durchflussgrad im Schweb-, Steig- und schnellen Sinkflug	187
3.4.2	Die ideale Verwindung	190
3.4.3	Beispiel zur Blattelemententheorie	192
3.4.4	Numerischer Lösungsansatz	193
3.4.5	Der optimale Schwebeflugrotor	197
3.4.6	Zirkulationsverteilung	204
3.4.7	Blattspitzenverluste	205
3.4.8	Einfluss der Kompressibilität	208
3.4.9	Verschiedene Definitionen der Flächendichte	209
3.4.10	Der mittlere Auftriebsbeiwert und der mittlere Anstell- winkel	211
3.4.11	Vergleich mit Messungen an Modellrotoren	212

3.4.12	Schlussfolgerungen	214
3.5	Vorwärtsflug	214
3.5.1	Geschwindigkeiten am Blattelement	214
3.5.2	Bereich rückwärtiger Anströmung	219
3.5.3	Modellierung der induzierten Geschwindigkeiten	221
3.5.4	Modellierungen höherer Ordnung	223
3.6	Autorotation	232
3.6.1	Vertikale Autorotation	232
3.6.2	Autorotation im Vorwärtsflug	236
3.7	Übungen zu Kap. 3	239
3.7.1	Kurzfragen	239
3.7.2	Leistungsrechnung mit der Blattelemententheorie	239
3.7.3	Autorotationsrechnung mit der Blattelemententheorie	242
3.8	Literaturverzeichnis	242
4	Die Bewegung rotierender Flügel	247
4.1	Einleitung	247
4.2	Grundlagen der Schwingungsbewegung	248
4.3	Die Schlagbewegung des starren, gelenkig angeschlossenen Rotorblattes	251
4.3.1	Aufstellung der Bewegungsdifferentialgleichung	251
4.3.2	Blattmasse und statisches Massenmoment	252
4.3.3	Das Massenträgheitsmoment	253
4.3.4	Die Zentrifugalkraft und ihr Moment	254
4.3.5	Das Coriolismoment	255
4.3.6	Das aerodynamische Moment	255
4.3.7	Das Feder- und Dämpfermoment	256
4.3.8	Der Schwebeflug	257
4.3.9	Der Vorwärtsflug bei $\alpha = 0$	262
4.3.10	Schlussbemerkungen	265
4.4	Die Schwenkbewegung	266
4.4.1	Aufstellung der Bewegungsdifferentialgleichung	266
4.4.2	Massen-, Trägheits-, Feder- und Dämpfermomente	267
4.4.3	Das Moment aus der Zentrifugalkraft	268
4.4.4	Das Coriolismoment	269
4.4.5	Das aerodynamische Moment	270
4.4.6	Der Schwebeflug	271
4.4.7	Schlussbemerkungen	275
4.5	Die Torsionsbewegung	276
4.5.1	Aufstellen der Bewegungsdifferentialgleichung	277

4.5.2	Massen-, Trägheits- und Federmomente	278
4.5.3	Das Propellermoment	278
4.5.4	Das aerodynamische Moment	278
4.5.5	Der Schwebeflug	281
4.5.6	Das Eigenfrequenz- oder Fan-Diagramm	283
4.5.7	Kopplungen von Schlag- und Steuerbewegung	284
4.5.8	Schlussbemerkungen	284
4.6	Die Kräfte und Momente am Rotorkopf	286
4.6.1	Koordinatensysteme	286
4.6.2	Blattanschlusskräfte	287
4.6.3	Die Rotorkomponenten im nicht drehenden System	290
4.6.4	Schlussbemerkungen	294
4.7	Übungen zu Kap. 4	294
4.7.1	Kurzfragen	294
4.7.2	Blattbewegung im Schwebeflug	295
4.7.3	Blattbewegung im Vorwärtsflug	295
4.8	Literaturverzeichnis	296
5	Leistungsberechnung im stationären Flug	299
5.1	Einleitung	299
5.2	Trimmung des Hubschraubers	301
5.2.1	Einleitung	301
5.2.2	Vereinfachte Trimmrechnung	304
5.2.3	Berechnung der Rotorkräfte	309
5.2.4	Aerodynamische Wechselwirkungen (Interferenzen)	316
5.2.5	Beispiele zur Trimmrechnung	319
5.3	Zusammensetzung der Gesamtleistung	322
5.4	Axialer Steig- und Schwebeflug	325
5.4.1	Leistungsbedarf im Schwebeflug	325
5.4.2	Maximale Steiggeschwindigkeit	326
5.4.3	Maximale Sinkrate	327
5.5	Vorwärtsflug	328
5.5.1	Leistungsbedarf im Horizontalflug	328
5.5.2	Gleitverhältnis	330
5.5.3	Maximale Steiggeschwindigkeit	330
5.5.4	Maximale Sinkrate	331
5.5.5	Längste Flugdauer	333
5.5.6	Maximale Reichweite	334
5.6	Übungen zu Kap. 5	334
5.7	Literaturverzeichnis	335

6	Grundlagen des Hubschrauberentwurfs	337
6.1	Einleitung	337
6.2	Hauptrotorentwurf	339
6.2.1	Rotorradius	339
6.2.2	Blattspitzengeschwindigkeit	341
6.2.3	Flächendichte	342
6.2.4	Blattzahl	343
6.2.5	Verwindung	344
6.2.6	Zuspitzung und Pfeilung	344
6.2.7	Profilauswahl	345
6.2.8	Blattspitze	347
6.3	Rumpfeinflüsse	347
6.4	Das Höhenleitwerk	350
6.5	Das Seitenleitwerk	352
6.6	Der Heckrotor	353
6.6.1	Konventioneller Heckrotor	353
6.6.2	Alternative Konstruktionen	356
6.7	Überwindung der Grenzen von Hubschraubern	357
6.8	Übungen zu Kap. 6	358
6.9	Literaturverzeichnis	358
7	Fachbegriffe, Tabellen und ergänzendes Material	361
7.1	Englische Fachbegriffe	361
7.2	Technische Daten früher Hubschrauberentwürfe	364
7.3	Technische Daten der Bo105	364
7.4	Tabellen der Blattanschlusskräfte	367
7.5	Umrechnung der Einheiten	374
7.6	Schlagbewegung im Vorwärtsflug	374
7.7	Blattelemententheorie: Variation des Schubbeiwertes	382
8	Lösungen zu den Übungsaufgaben	387
8.1	Lösungen zu den Übungen von Kap. 1	387
8.1.1	Geschichte der Drehflügler	387
8.1.2	Blattanschluss am Rotorkopf	388
8.2	Lösungen zu den Übungen von Kap. 2	390
8.2.1	Kurzfrage	390
8.2.2	Strahltheorie	391
8.2.3	Leistungsrechnung mit der Strahltheorie	394
8.2.4	Leistungsrechnung: Bodeneffekt, Steigflug, Sinkflug, Autorotation	398

8.3	Lösungen zu den Übungen von Kap. 3	402
8.3.1	Kurzfragen	402
8.3.2	Leistungsrechnung mit der Blattelemententheorie . . .	404
8.3.3	Autorotationsrechnung mit der Blattelemententheorie	412
8.4	Lösungen zu den Übungen von Kap. 4	414
8.4.1	Kurzfragen	414
8.4.2	Blattbewegung im Schwebeflug	416
8.4.3	Blattbewegung im Vorwärtsflug	422
8.5	Lösungen zu den Übungen von Kap. 5	426
8.6	Lösungen zu den Übungen von Kap. 6	428

Sachverzeichnis	429
-----------------	-----