

# Inhaltsverzeichnis

|          |                                                 |           |
|----------|-------------------------------------------------|-----------|
| <b>1</b> | <b>Einleitung und Übersicht</b>                 | <b>1</b>  |
| 1.1      | Aufgaben der Flugregelung                       | 1         |
| 1.2      | Architektur eines Flugregelungssystems          | 3         |
| 1.3      | Algorithmen im Bordrechner                      | 4         |
| 1.4      | Digitaler Flugregler                            | 5         |
|          | Literatur                                       | 11        |
| <b>2</b> | <b>Flugmechanische Modellbeschreibung</b>       | <b>13</b> |
| 2.1      | Lineare Modelle                                 | 13        |
| 2.1.1    | Längs- und Seitenbewegung                       | 13        |
| 2.1.2    | Dynamik von Sensoren und Aktuatoren             | 19        |
| 2.1.3    | Windstörungen                                   | 22        |
| 2.1.4    | Flugbereichsgrenzen                             | 25        |
| 2.2      | Transformationen für den Flugzustand            | 28        |
| 2.2.1    | Zustandstransformation und praktische Anwendung | 28        |
| 2.2.2    | Diagonal- und Blockdiagonalform                 | 31        |
| 2.3      | Analyse der Flugeigenschaften                   | 34        |
| 2.3.1    | Eigenverhalten und Schwingungsformen            | 34        |
| 2.3.2    | Steuerbarkeit und Beobachtbarkeit               | 37        |
|          | Literatur                                       | 40        |
| <b>3</b> | <b>Sensoren und Flugzustandsbestimmung</b>      | <b>41</b> |
| 3.1      | Inertialsensoren und Magnetometer               | 41        |
| 3.1.1    | Kreiselinstrumente und Drehratensensoren        | 41        |
| 3.1.2    | Beschleunigungsmesser                           | 44        |
| 3.1.3    | Magnetfeldmessung                               | 49        |
| 3.2      | Strömungstechnische Sensoren                    | 51        |
| 3.2.1    | Fluggeschwindigkeit und Anströmung              | 51        |
| 3.2.2    | Höhe und Vertikalgeschwindigkeit                | 52        |

|          |                                                                    |            |
|----------|--------------------------------------------------------------------|------------|
| 3.3      | Funknavigation. . . . .                                            | 54         |
| 3.3.1    | Positionsbestimmung in der Horizontalebene . . . . .               | 54         |
| 3.3.2    | Positionsbestimmung in drei Dimensionen . . . . .                  | 55         |
| 3.4      | Inertialnavigation. . . . .                                        | 59         |
| 3.4.1    | Funktionsprinzip . . . . .                                         | 59         |
| 3.4.2    | Voraussetzungen und Beschränkungen . . . . .                       | 60         |
| 3.4.3    | Navigationsfilter. . . . .                                         | 62         |
|          | Literatur. . . . .                                                 | 67         |
| <b>4</b> | <b>Basisregelung. . . . .</b>                                      | <b>69</b>  |
| 4.1      | Stabilisierungsregler der Längsbewegung . . . . .                  | 70         |
| 4.1.1    | Entwurfsmodell und Regler . . . . .                                | 70         |
| 4.1.2    | Stabilisierungsregler und Trimmung . . . . .                       | 73         |
| 4.1.3    | Verifikation mit der vollständigen linearen Längsbewegung. . . . . | 74         |
| 4.1.4    | Kurvenkompensation . . . . .                                       | 76         |
| 4.1.5    | Stabilisierungsregler ohne Anstellwinkelmessung. . . . .           | 78         |
| 4.2      | Stabilisierungsregler der Seitenbewegung. . . . .                  | 82         |
| 4.2.1    | Entwurfsmodelle und Reglerstruktur . . . . .                       | 82         |
| 4.2.2    | Verifikation mit linearem Modell der Seitenbewegung . . . . .      | 85         |
| 4.2.3    | Rückführung der Querschleunigung . . . . .                         | 86         |
| 4.2.4    | Integrierter Reglerentwurf . . . . .                               | 87         |
| 4.3      | Vorgaberegler. . . . .                                             | 89         |
| 4.3.1    | Längsbewegung mit I-Anteil . . . . .                               | 90         |
| 4.3.2    | Seitenbewegung mit Entkopplung . . . . .                           | 96         |
| 4.3.3    | Seitenbewegung mit Vorfaktor . . . . .                             | 100        |
| 4.3.4    | Vorgaberegler mit Lagelimitierungen . . . . .                      | 101        |
| 4.4      | Spezifikationen und Reglerentwurf . . . . .                        | 101        |
| 4.4.1    | Eigenwertvorgabe . . . . .                                         | 101        |
| 4.4.2    | Entwurfskompromiss . . . . .                                       | 102        |
| 4.4.3    | Control Anticipation Parameter . . . . .                           | 102        |
| 4.4.4    | Reglereinstellung im Erprobungsflug . . . . .                      | 104        |
|          | Literatur. . . . .                                                 | 104        |
| <b>5</b> | <b>Einfache Autopiloten. . . . .</b>                               | <b>105</b> |
| 5.1      | Regelung für Geschwindigkeit und Rollwinkel. . . . .               | 105        |
| 5.1.1    | Geschwindigkeitsregelung. . . . .                                  | 106        |
| 5.1.2    | Regelung des Rollwinkels . . . . .                                 | 109        |
| 5.2      | Autopilot zur Höhen- und Kurshaltung . . . . .                     | 111        |
| 5.2.1    | Höhenregelung. . . . .                                             | 112        |
| 5.2.2    | Kursregelung . . . . .                                             | 115        |
| 5.3      | Einfache Bahnfolge . . . . .                                       | 117        |
| 5.3.1    | Beschreibung der Sollbahn . . . . .                                | 118        |
| 5.3.2    | Entwurfsmodell für die Bahnablage . . . . .                        | 119        |

---

|          |                                               |            |
|----------|-----------------------------------------------|------------|
| 5.3.3    | Reglerstruktur und Reglerentwurf . . . . .    | 120        |
| 5.3.4    | Umschaltung zwischen Geradenstücken . . . . . | 122        |
|          | Literatur. . . . .                            | 124        |
| <b>6</b> | <b>Lenkung und Bahnplanung . . . . .</b>      | <b>125</b> |
| 6.1      | Bahnbeschreibung . . . . .                    | 126        |
| 6.1.1    | Dubins Problem . . . . .                      | 126        |
| 6.1.2    | Splines . . . . .                             | 128        |
| 6.2      | Sollwertberechnung . . . . .                  | 130        |
| 6.2.1    | Flachheit. . . . .                            | 130        |
| 6.2.2    | Position als flacher Ausgang . . . . .        | 130        |
| 6.3      | Lenkung und Regelung . . . . .                | 134        |
| 6.3.1    | Bestimmung der Referenzposition. . . . .      | 135        |
| 6.3.2    | Nichtlineare Entkopplung . . . . .            | 136        |
| 6.3.3    | Gesamtsystem . . . . .                        | 138        |
| 6.4      | Konstruktion von Trajektorien . . . . .       | 140        |
| 6.4.1    | Wegpunkttypen und Dubins Bahn . . . . .       | 140        |
| 6.4.2    | Höhen- und Geschwindigkeitsprofil . . . . .   | 142        |
| 6.4.3    | Erweiterungen . . . . .                       | 146        |
|          | Literatur. . . . .                            | 149        |
| <b>7</b> | <b>Anwendungsbeispiel . . . . .</b>           | <b>151</b> |
| 7.1      | Lineare Modellierung. . . . .                 | 152        |
| 7.2      | Reglerauslegung. . . . .                      | 153        |
| 7.3      | Flugergebnisse . . . . .                      | 156        |
|          | Literatur. . . . .                            | 156        |
|          | <b>Anhang A . . . . .</b>                     | <b>157</b> |
|          | <b>Stichwortverzeichnis . . . . .</b>         | <b>181</b> |