

Avionik und Flugsicherungstechnik

Holger Flühr

Avionik und Flugsicherungstechnik

Einführung in Kommunikationstechnik,
Navigation, Surveillance



Springer

FH-Prof. Dr. Holger Flühr
c/o
FH JOANNEUM Graz
Studiengang Luftfahrt / Aviation
Alte Poststr. 149
8020 Graz, Österreich
Holger.fluehr@fh-joanneum.at

ISBN 978-3-642-01611-0 e-ISBN 978-3-642-01612-7
DOI 10.1007/978-3-642-01612-7
Springer Heidelberg Dordrecht London New York

Die Deutsche Nationalbibliothek verzeichnet diese Publikation in der Deutschen Nationalbibliografie; detaillierte bibliografische Daten sind im Internet über <http://dnb.d-nb.de> abrufbar.

© Springer-Verlag Berlin Heidelberg 2010

Dieses Werk ist urheberrechtlich geschützt. Die dadurch begründeten Rechte, insbesondere die der Übersetzung, des Nachdrucks, des Vortrags, der Entnahme von Abbildungen und Tabellen, der Funksendung, der Mikroverfilmung oder der Vervielfältigung auf anderen Wegen und der Speicherung in Datenverarbeitungsanlagen, bleiben, auch bei nur auszugsweiser Verwertung, vorbehalten. Eine Vervielfältigung dieses Werkes oder von Teilen dieses Werkes ist auch im Einzelfall nur in den Grenzen der gesetzlichen Bestimmungen des Urheberrechtsgesetzes der Bundesrepublik Deutschland vom 9. September 1965 in der jeweils geltenden Fassung zulässig. Sie ist grundsätzlich vergütungspflichtig. Zuwiderhandlungen unterliegen den Strafbestimmungen des Urheberrechtsgesetzes.

Die Wiedergabe von Gebrauchsnamen, Handelsnamen, Warenbezeichnungen usw. in diesem Werk berechtigt auch ohne besondere Kennzeichnung nicht zu der Annahme, dass solche Namen im Sinne der Warenzeichen- und Markenschutz-Gesetzgebung als frei zu betrachten wären und daher von jedermann benutzt werden dürften.

Einbandentwurf: eStudio Calamar S.L., Figueres/Berlin

Gedruckt auf säurefreiem Papier

Springer ist Teil der Fachverlagsgruppe Springer Science+Business Media (www.springer.com)

Für meine Lieben

Vorwort

Die vorliegende Arbeit entstand aus der Beobachtung, dass im Bereich der nachrichtentechnischen Anwendungen in der Luftfahrt nur sehr eingeschränkt einführende und überblicksartige Literatur über das gesamte Fachgebiet zur Verfügung steht. Viele Werke behandeln lediglich ausgewählte Aspekte der Avionik (der Anwendungen der Elektronik in der Luftfahrt) und der zur Flugsicherung verwendeten Technologien und stellen diese häufig nicht in einem größeren Kontext dar. Um diese Lücke zwischen den in einem nachrichtentechnischen Studium vermittelten technisch-wissenschaftlichen Grundlagen einerseits und der konkreten Anwendung in der Luftfahrtbranche andererseits zu füllen, führt der vorliegende Text den Leser sowohl in die Avionik und Flugsicherungstechnik ein und bietet eine möglichst umfassende Darstellung des Fachgebiets an. Das Buch richtet sich daher nicht nur an Studierende der Fachrichtungen Elektrotechnik, Nachrichtentechnik und Luftfahrzeugtechnik an Fachhochschulen und Universitäten, sondern besonders auch an Ingenieure in Forschung, Entwicklung, Fertigung, in der Wartung, im Flugbetrieb oder bei Flugsicherungsbetreibern, die sich in dieses spannende Fachgebiet einarbeiten möchten oder ein Nachschlagewerk suchen.

Das Buch versucht, die historisch getrennt gewachsenen Bereiche der Avionik und Flugsicherungstechnik integriert darzustellen. Es werden zunächst das Umfeld und die Randbedingungen des Themengebiets überblicksartig betrachtet. In einem zweiten Schritt werden die Systeme der Navigation, Surveillance und Kommunikationstechnik als zentraler und in beiden Teilaspekten hineinreichender Themenbereich präsentiert. Letzlich werden darauf aufbauend typische Systeme und Architekturen der Flugzeugelektronik beschrieben.

Im ersten Kapitel wird ein knapper historischer Rückblick auf den Einsatz der Elektronik im Flugzeug und auf die Flugsicherung gegeben. Hierzu sind anhand ausgewählter Beispiele wichtige Entwicklungsschritte dargestellt. Das Kapitel schließt mit einem Überblick zur wirtschaftlichen Bedeutung der modernen Avionik.

Das zweite Kapitel führt den Leser in die wichtigsten Organisationen der Luftfahrt ein und erläutert in knapper Form die Funktionsweise der Systeme „Luftfahrt“ und „Flugsicherung“. Hierdurch soll die Bedeutung und Komplexität der Flugsicherung

cherungstechnik und insbesondere der im modernen Luftverkehrsmanagement eingesetzten Systeme zur Kommunikation, Navigation und Surveillance (kurz: CNS oder CNS/ATM) dargelegt werden.

Das dritte Kapitel widmet sich der Avionik und den Besonderheiten beim Einsatz elektrotechnischer Systeme im Luftfahrzeug. Hierzu werden zunächst die relevanten Organisationen vorgestellt und die Systematik der Standardisierung erläutert. Ebenso wird der zentrale Begriff der Zuverlässigkeit behandelt.

Im vierten Kapitel wird vermittelt, wie die aufgrund der dargestellten Randbedingungen zunächst als verschieden erscheinenden Teilgebiete integral betrachtet werden können. Der Begriff der Luft-Boden-Schnittstelle als Bindeglied zwischen Avionik und Flugsicherungstechnik wird definiert.

Im fünften Kapitel werden Radionavigationsanlagen vorgestellt. Diese umfassen Systeme am Boden und an Bord des Flugzeugs zur Richtungsbestimmung und zur Entfernungsbestimmung sowie integrierte Systeme, Systeme der Satellitennavigation und Einrichtungen zum Landeanflug.

Der Aspekt der Flugüberwachung oder Surveillance ist im sechsten Kapitel betrachtet. Es deckt neben dem Primärradar und seinen Baugruppen das Sekundärradar mit den Betriebsmoden A, C und S ab.

Im siebten Kapitel sind unter dem Begriff der Kommunikationstechnik Einrichtungen der Sprach- und Datenkommunikation zusammengefasst. Die Sprachkommunikationssysteme umfassen den Sprechfunk auf Kurzwelle und Ultrakurzwelle, die Datenkommunikation beschreibt neben den kurz- und ultrakurzwelligigen Datenlinks auch den auf dem Transponder-Mode S aufbauenden Datenlink und führt in die Satellitenkommunikation ein.

Das achte Kapitel erläutert den Aufbau von Flugzeughordnetzen. Hierzu wird kurz auf die Aspekte der Energieerzeugung im Flugzeug eingegangen; es wird die Hierarchisierung des Bordnetzes vorgestellt und anhand von Beispielen dargelegt.

Das neunte Kapitel beschreibt mit den zur Integration der Flugzeugsysteme verwendeten Datenbussen eine wesentliche Grundlage der Avionik. Es werden neben den weit verbreiteten Busstandards auch aktuelle und zukunftsweisende Technologien wie AFDX und TTP betrachtet.

Im zehnten Kapitel werden die als Flugzeugsensoren bezeichneten Einrichtungen zur autonomen Messung von Flugparametern wie Lage, Kinematik (Position, Geschwindigkeit, Beschleunigung) und Umgebungsbedingungen (Außentemperatur, Anströmung, Luftdruck, Wetter) betrachtet.

Das elfte Kapitel beschreibt komplexere Flugzeugsysteme und -architekturen, die primär der Flugdurchführung oder der Überwachung des Luftfahrzeugs dienen.

Der Anhang stellt die für das Verständnis des Buches relevanten nachrichtentechnischen Grundlagen in kompakter Form zusammen. Auf diese Weise kann in den einzelnen Fachkapiteln der Schwerpunkt der Betrachtungen auf die konkreten Aspekte der Systeme in der Luftfahrtumgebung gelegt werden, ohne diese durch Ausführungen von Grundlagenwissen unterbrechen zu müssen.

Der Leser findet zu Beginn jedes Kapitels eine knappe Hinführung zum Thema, welche im Sinne einer Zieldefinition den Inhalt und die Bedeutung der folgenden Abschnitte hervorhebt. Wiederholungsfragen und exemplarische Aufgaben am En-

de des Kapitels sollen zur Reflexion des zuvor gelesenen anregen. Die verwendete Literatur und vertiefende Werke sind ebenfalls am Ende eines jeden Kapitels für die weiterführende Arbeit an speziellen Fragestellungen zusammengestellt.

Die Luftfahrt und damit auch die Avionik und Flugsicherungstechnik sind sehr stark von der Verwendung englischsprachiger Abkürzungen geprägt. Daher ist dem Buch ein Abkürzungsverzeichnis hintangestellt, welches als Nachschlagewerk bei der Lektüre dienen soll. Im Text wurde jede Abkürzung bei der erstmaligen Verwendung sowohl in englischer und deutscher Sprache aufgelöst. Aus Gründen der Lesbarkeit sind in weiterer Folge abwechselnd die Abkürzung und/oder die ausführliche Schreibweise verwendet. Englischsprachige Begriffe sind im Text nahezu durchgängig in Großschreibung und damit im Sinne eines Eigenwortes angegeben. Der Index am Ende des Buchs dient dem schnellen Auffinden von Informationen. Werden im Text mathematische Symbole zur Beschreibung von Vektoren oder Matrizen verwendet, so sind diese in Fettschrift gesetzt. Eine Transition wird durch ein hochgestelltes „T“ dargestellt. In Gleichungen wird in der Regel kein Multiplikationszeichen verwendet. Dieses ist nur dann gesetzt, wenn es der Lesbarkeit der Gleichung dient. Internet-Zitate sind in verkürzter Form ohne vorangestelltes „http://“ angegeben. Ebenso wurde auf die Angabe eines Datums verzichtet, welches die letzte Verifikation eines Links spezifiziert. Alle angegebenen Internet-Adressen wurden auf Richtigkeit und Aktualität überprüft, bevor das Manuskript im September 2009 an den Verlag übermittelt wurde. Die Verwendung von Quellen aus dem Internet mit teilweise gleichlautenden Erläuterungen machte es häufig unmöglich zu verifizieren, welche die originale Quelle darstellt. In solchen Fällen sind daher fallweise Phrasen oder Redewendungen aus dem Internet adaptiert, ohne eine Quelle anzugeben. Im Sinne einer besseren Lesbarkeit wurde auf geschlechtsspezifische Formulierungen verzichtet. Es wird ausdrücklich darauf hingewiesen, dass sich der Text immer sowohl auf Frauen als auch auf Männer bezieht.

Mein Dank gilt meinem Arbeitgeber, der FH JOANNEUM in Graz mit dem Studiengang Luftfahrt / Aviation und insbesondere auch dem Studiengangsleiter Dipl.-Ing. Bruno Wiesler. Durch das im Rahmen meiner FH-Professur aus Lehre sowie angewandter Forschung und Entwicklung vorhandene Umfeld wurde die Entstehung dieses Buches erst möglich. Weiter möchte ich folgenden Personen und Organisationen (in alphabetischer Reihenfolge) für die freundliche Bereitstellung von Bild- und Informationsmaterial zur Illustration des Buchs danken:

- ATCNEA, Verband österreichischer Flugsicherungsingenieure und -Techniker, Wien-Flughafen
- Austro Control Österreichische Gesellschaft für Zivilluftfahrt mbH, Wien
- Herrn Marc Genicot
- Herrn Dipl.-HTL-Ing. Robert Matousek
- Herrn Dipl.-Ing. Gerald Nittnaus
- Rohde & Schwarz Österreich GmbH, Wien
- Saft S.A., Bagnolet
- Herrn Dipl.-Ing. Robert Schneebauer, MMBA

Abschließend danke ich dem Springer-Verlag und insbesondere dem Team der Programmplanung Technik um Frau Hestermann-Beyerle für die äußerst angenehme und konstruktive Zusammenarbeit und Unterstützung beginnend mit der Konzeption des Buches bis hin zur Erstellung des Manuskripts.

Graz,
September 2009

Holger Flühr

Inhaltsverzeichnis

- 1 Einleitung** 1
 - Literaturverzeichnis 4

- 2 Grundlagen der Flugsicherung** 5
 - 2.1 Relevante Behörden und Organisationen 5
 - 2.1.1 Internationale Zivilluftfahrtorganisation (ICAO) 5
 - 2.1.2 Europäische Union (EU) 6
 - 2.1.3 Europäische Zivilluftfahrt-Konferenz (ECAC) 7
 - 2.1.4 Europäische Agentur für Flugsicherheit (EASA) 7
 - 2.1.5 EUROCONTROL 7
 - 2.1.6 Nationale Behörden und Organisationen 8
 - 2.2 Organisation der Luftfahrt und des Luftraums 8
 - 2.2.1 Luftfahrtgesetzgebung 8
 - 2.2.2 Strukturierung des Luftraums 9
 - 2.3 Flugsicherung und Flugsicherungsdienste 13
 - 2.4 Wiederholungsfragen und Aufgaben 17
 - Literaturverzeichnis 17

- 3 Zertifizierungs- und Zulassungsaspekte** 19
 - 3.1 Relevante Behörden und Organisationen 19
 - 3.2 Ebenen der Standardisierung 21
 - 3.3 Standards für Avionik 22
 - 3.3.1 Anforderungen an die Hardware und Software 23
 - 3.3.2 Anforderungen aus den Umgebungsbedingungen 24
 - 3.4 Standardisierung am Beispiel von Avionik-Gehäusebauformen 25
 - 3.5 Zuverlässigkeit von Avionik 26
 - 3.5.1 Fehlerrate eines Bauelements 26
 - 3.5.2 Bestimmung der MTBF 27
 - 3.5.3 Parts-Count-Methode 29
 - 3.5.4 Parts-Stress-Methode 29
 - 3.5.5 Verfügbarkeit eines Systems 30

3.6	Wiederholungsfragen und Aufgaben	31
	Literaturverzeichnis	32
4	Integrale Betrachtung der Avionik und der Flugsicherungstechnik	35
4.1	Boden-Luft-Schnittstelle als Bindeglied	35
4.2	Wiederholungsfragen und Aufgaben	40
	Literaturverzeichnis	41
5	Radionavigation	43
5.1	Grundlagen zur Radionavigation	43
5.1.1	Verwendete Koordinatensysteme und Modell der Erde	44
5.1.2	Umrechnungen zwischen den Koordinatensystemen	46
5.1.3	Darstellung der Lageinformation	47
5.1.4	Kartendarstellung	48
5.2	Ungerichtete Funkfeuer (NDB)	48
5.2.1	Systemübersicht	48
5.2.2	Signalkomposition	49
5.2.3	Auswertung des Signals	52
5.3	Drehfunkfeuer (VOR)	58
5.3.1	Systemübersicht	58
5.3.2	Signalkomposition	59
5.3.3	Auswertung des Signals	67
5.4	Entfernungsmessung (DME)	69
5.4.1	Systemübersicht	70
5.4.2	Signalkomposition	71
5.4.3	Auswertung des Signals	74
5.4.4	Präzisions-DME (DME/P)	77
5.5	Integrierte Navigationshilfen	77
5.5.1	Tactical Air Navigation (TACAN)	78
5.5.2	Long Range Navigation (LORAN C)	81
5.6	Satellitennavigation (GNSS)	89
5.6.1	Konzept eines Satellitennavigationssystems	90
5.6.2	GNSS-Komponenten	92
5.6.3	Missionsdateneinheit	93
5.6.4	Signalausbreitung	95
5.6.5	Konzept eines GNSS-Empfängers	96
5.6.6	Global Positioning System (GPS)	98
5.6.7	GLONASS	104
5.6.8	GPS-Modernisierung	105
5.6.9	Galileo	107
5.6.10	GNSS-Augmentierung	113
5.7	Landehilfen	118
5.7.1	Instrument Landing System (ILS)	118
5.7.2	Microwave Landing System (MLS)	128
5.8	Wiederholungsfragen und Aufgaben	133

- Literaturverzeichnis 135
- 6 Surveillance** 137
 - 6.1 Primärradar 137
 - 6.1.1 Grundlagen 139
 - 6.1.2 Radargleichung 144
 - 6.1.3 Hochfrequenzkopf 146
 - 6.1.4 Zielerkennung 152
 - 6.1.5 Zielverfolgung 154
 - 6.1.6 Zieldarstellung 155
 - 6.2 Sekundärradar 158
 - 6.2.1 Air Traffic Control Radar Beacon System (ATCRBS) 159
 - 6.2.2 Mode-S-Radarsystem 165
 - 6.3 Wiederholungsfragen und Aufgaben 172
 - Literaturverzeichnis 172
- 7 Kommunikationstechnik** 175
 - 7.1 Sprachkommunikation 175
 - 7.1.1 UKW-Sprechfunk 175
 - 7.1.2 KW-Sprechfunk 184
 - 7.2 Datenkommunikation 189
 - 7.2.1 Aircraft Communications and Reporting System (ACARS) 190
 - 7.2.2 HF Data Link (HFDL) 191
 - 7.2.3 VHF Data Link (VDL) 194
 - 7.2.4 Mode S Data Link 205
 - 7.2.5 Satellitenkommunikation (SATCOM) 207
 - 7.2.6 Sonstige und künftige Datenlinks 208
 - 7.3 CNS/ATM-Services 208
 - 7.3.1 Aeronautisches Telekommunikationsnetzwerk (ATN) 209
 - 7.3.2 Automatic Dependent Surveillance (ADS-B) 210
 - 7.3.3 Multilateration (MLAT) 211
 - 7.4 Wiederholungsfragen und Aufgaben 212
 - Literaturverzeichnis 213
- 8 Bordautonome Energieerzeugung und -verteilung** 215
 - 8.1 Generatorantrieb 217
 - 8.2 Wechselspannungsquellen 217
 - 8.2.1 Primäre Wechselspannungsquellen 217
 - 8.2.2 Sekundäre Wechselspannungsquellen 220
 - 8.2.3 Staudruckturbine 220
 - 8.2.4 Wechselrichter 220
 - 8.3 Gleichspannungsquellen 222
 - 8.3.1 Primäre Gleichspannungsquellen 222
 - 8.3.2 Sekundäre Gleichspannungsquellen 223
 - 8.3.3 Transformer Rectifier Unit (TRU) 228

8.4	Externe Energieversorgung	228
8.5	Energieverteilung	230
8.5.1	Verteilnetz	230
8.5.2	Schutzeinrichtungen	232
8.6	Typische Bordnetzarchitekturen	233
8.6.1	Kleinflugzeug mit DC-Netz	234
8.6.2	Zweimotoriges Flugzeug mit DC-Netz	235
8.6.3	Verkehrsflugzeug mit AC-Netz	236
8.7	Wiederholungsfragen und Aufgaben	238
	Literaturverzeichnis	240
9	Avionik-Busse	241
9.1	Grundprinzipien	241
9.2	ARINC 429	243
9.3	Mil-STD-1553	247
9.4	ARINC 629	251
9.5	Time-Triggered Protocol (TTP)	253
9.6	ARINC 664-7 (Avionics Full Duplex Switched Ethernet)	256
9.7	Wiederholungsfragen und Aufgaben	258
	Literaturverzeichnis	259
10	Flugzeugsensoren	261
10.1	Luftdatenrechner	261
10.1.1	Normalatmosphäre	261
10.1.2	Luftdaten	263
10.1.3	Verarbeitung und Anzeige der Luftdaten	266
10.2	Inertiales Navigationssystem (INS)	267
10.2.1	Inertiale Messeinheit	267
10.2.2	Beschleunigungssensoren	267
10.2.3	Drehratensensoren	268
10.2.4	Verarbeitung der inertialen Messgrößen	270
10.2.5	Ausführungsformen des INS	274
10.2.6	Stützung des inertialen Navigationssystems	275
10.3	Radarhöhenmesser	277
10.3.1	Impulshöhenmesser	278
10.3.2	FMCW-Radar	279
10.4	Wetterradar	282
10.5	Wiederholungsfragen und Aufgaben	283
	Literaturverzeichnis	284
11	Flugzeugsysteme	287
11.1	Systemintegration	287
11.1.1	Architektur	287
11.1.2	Redundanzkonzepte	288
11.2	Flugführungssysteme	291

- 11.2.1 Flugkontrollsystem (FCS) 293
- 11.2.2 Autopilotensystem (AP/FD) 296
- 11.2.3 Flugmanagementsystem (FMS) 298
- 11.2.4 Autonome Triebwerkssteuerung (FADEC) 300
- 11.3 Flugsupport- und Maintenancesysteme 301
 - 11.3.1 Zentrale Flugzeugüberwachung 302
 - 11.3.2 Kollisionsverhinderung (ACAS) 303
 - 11.3.3 Bodenannäherungswarnsystem (TAWS) 305
- 11.4 Weitere Flugzeugsysteme 307
 - 11.4.1 Elektrische Flugzeugsysteme 307
 - 11.4.2 Feuer- und Rauchdetektion 307
- 11.5 Wiederholungsfragen und Aufgaben 307
- Literaturverzeichnis 308

- A Nachrichtentechnische Grundlagen 311**
 - A.1 Allgemeines 311
 - A.2 Signale und Rauschen 313
 - A.2.1 Signalbeschreibung im Zeitbereich 313
 - A.2.2 Signalbeschreibung im Frequenzbereich 314
 - A.2.3 Grundlagen zum Rauschen 315
 - A.2.4 Rauschen in Systemen 318
 - A.3 Codierung und Modulation 320
 - A.3.1 Kanalcodierung 321
 - A.3.2 Leitungscodierung 324
 - A.3.3 Digitale Modulation 328
 - Literaturverzeichnis 330

- Abkürzungsverzeichnis 331**

- Sachverzeichnis 341**

- Bildnachweis 347**