

Klaus Finkenzeller

RFID-Handbuch

Grundlagen und praktische Anwendungen
induktiver Funkanlagen, Transponder und
kontaktloser Chipkarten

4., aktualisierte und erweiterte Auflage

HANSER

Inhaltsverzeichnis

Vorwort zur 4. Auflage	XV
1 Einführung	1
1.1 Automatische Identifikationssysteme.....	2
1.1.1 Barcode-Systeme.....	2
1.1.2 Optical Character Recognition.....	3
1.1.3 Biometrische Verfahren.....	4
1.1.3.1 Sprachidentifizierung.....	4
1.1.3.2 Fingerabdruckverfahren (Daktyloskopie).....	4
1.1.4 Chipkarten.....	4
1.1.4.1 Speicherkarten.....	5
1.1.4.2 Mikroprozessorkarten.....	6
1.1.5 RFID-Systeme.....	6
1.2 Vergleich verschiedener ID-Systeme.....	7
1.3 Bestandteile eines RFID-Systems.....	7
2 Unterscheidungsmerkmale von RFID-Systemen	11
2.1 Grundsätzliche Unterscheidungsmerkmale.....	11
2.2 Bauformen von Transpondern.....	14
2.2.1 Disks und Münzen.....	14
2.2.2 Glasgehäuse.....	14
2.2.3 Plastikgehäuse.....	15
2.2.4 Werkzeug- und Gasflaschenidentifikation.....	16
2.2.5 Schlüssel und Schlüsselanhänger.....	17
2.2.6 Uhren.....	18
2.2.7 Bauform ID-1, kontaktlose Chipkarten.....	18
2.2.8 Smart Label.....	20
2.2.9 Coil-on-Chip.....	21
2.2.10 Weitere Bauformen.....	22
2.3 Frequenz, Reichweite und Kopplung.....	22
2.4 Aktive und passive Transponder.....	23
2.5 Informationsverarbeitung im Transponder.....	25
2.6 Auswahlkriterien für RFID-Systeme.....	27
2.6.1 Arbeitsfrequenz.....	28
2.6.2 Reichweite.....	28
2.6.3 Sicherheitsanforderungen.....	29
2.6.4 Speicherkapazität.....	30
3 Grundlegende Funktionsweise	31
3.1 1-bit-Transponder.....	32
3.1.1 Radiofrequenz.....	32
3.1.2 Mikrowelle.....	35

3.1.3	Frequenzteiler.....	37
3.1.4	Elektro-Magnetisch.....	38
3.1.5	Akustomagnetisch.....	40
3.2	Voll-und Halbduplexverfahren.....	42
3.2.1	Induktive Kopplung.....	44
3.2.1.1	Energieversorgung passiver Transponder.....	44
3.2.1.2	Datenübertragung Transponder > Leser.....	46
3.2.2	Elektromagnetische Backscatter-Kopplung.....	50
3.2.2.1	Energieversorgung der Transponder.....	50
3.2.2.2	Datenübertragung Transponder > Leser.....	52
3.2.3	Close Coupling.....	53
3.2.3.1	Energieversorgung der Transponder.....	53
3.2.3.2	Datenübertragung Transponder > Leser.....	54
3.2.4	Datenübertragung Leser > Transponder.....	55
3.2.5	Elektrische Kopplung.....	55
3.2.5.1	Energieversorgung passiver Transponder.....	55
3.2.5.2	Datenübertragung Transponder > Lesegerät.....	57
3.3	Sequentielle Verfahren.....	57
3.3.1	Induktive Kopplung.....	58
3.3.1.1	Spannungsversorgung des Transponders.....	58
3.3.1.2	Vergleich zwischen FDX-/HDX-und SEQ-Systemen.....	58
3.3.1.3	Datenübertragung Transponder > Leser.....	60
3.3.2	Oberflächenwellen-Transponder.....	61
4	Physikalische Grundlagen für RFID-Systeme.....	65
4.1	Magnetisches Feld.....	66
4.1.1	Magnetische Feldstärke H	66
4.1.1.1	Feldstärkeverlauf $H(x)$ bei Leiterschleifen.....	67
4.1.1.2	Optimierter Antennendurchmesser.....	69
4.1.2	Magnetischer Fluss und magnetische Flussdichte.....	71
4.1.3	Induktivität L	71
4.1.3.1	Induktivität einer Leiterschleife.....	72
4.1.4	Gegeninduktivität M	72
4.1.5	Kopplungsfaktor k	74
4.1.6	Induktionsgesetz.....	76
4.1.7	Resonanz.....	78
4.1.8	Praktischer Betrieb des Transponders.....	83
4.1.8.1	Spannungsversorgung des Transponders.....	83
4.1.8.2	Spannungsregelung.....	83
4.1.9	Ansprechfeldstärke H_{min}	85
4.1.9.1	„Energereichweite“ von Transpondersystemen.....	88
4.1.9.2	Ansprechbereich von Lesegeräten.....	90

4.1.10	Gesamtsystem Transponder - Lesegerät.....	91
4.1.10.1	Transformierte Transponderimpedanz ZT'	93
4.1.10.2	Einflussgrößen von ZT'	96
4.1.10.3	Lastmodulation.....	103
4.1.11	Messung von Systemparametern.....	110
4.1.11.1	Messung des Kopplungsfaktors k	110
4.1.11.2	Messung von Transponderresonanzfrequenz und Gütefaktor.....	111
4.1.12	Magnetische Werkstoffe.....	115
4.1.12.1	Eigenschaften magnetischer Werkstoffe und Ferrite.....	115
4.1.12.2	Ferritantennen in LF-Transpondern.....	116
4.1.12.3	Ferritabschirmung in metallischer Umgebung.....	117
4.1.12.4	Einbau von Transpondern in Metall.....	118
4.2	Elektromagnetische Wellen.....	120
4.2.1	Entstehung elektromagnetischer Wellen.....	120
4.2.1.1	Übergang vom Nah- zum Fernfeld bei Leiterschleifen.....	121
4.2.2	Strahlungsdichte S	122
4.2.3	Feldwellenwiderstand und Feldstärke E	123
4.2.4	Polarisation elektromagnetischer Wellen.....	124
4.2.4.1	Reflexion elektromagnetischer Wellen.....	125
4.2.5	Antennen.....	127
4.2.5.1	Gewinn und Richtwirkung.....	127
4.2.5.2	EIRP und ERP.....	129
4.2.5.3	Eingangsimpedanz.....	129
4.2.5.4	Wirksame Fläche und Rückstreuquerschnitt.....	130
4.2.5.5	Effektive Länge.....	133
4.2.5.6	Dipolantenne.....	134
4.2.5.7	Yagi-Uda-Antenne.....	136
4.2.5.8	Patch- oder Mikrostripantennen.....	136
4.2.5.9	Schlitzantennen.....	139
4.2.6	Praktischer Betrieb von Mikrowellentranspondern.....	139
4.2.6.1	Ersatzschaltbilder des Transponders.....	140
4.2.6.2	Spannungsversorgung passiver Transponder.....	141
4.2.6.3	Spannungsversorgung aktiver Transponder.....	149
4.2.6.4	Reflexion und Auslöschung.....	150
4.2.6.5	Ansprechempfindlichkeit des Transponders.....	151
4.2.6.6	Modulierter Rückstreuquerschnitt.....	151
4.2.6.7	Lesereichweite.....	154
4.3	Oberflächenwellen.....	157
4.3.1	Entstehung einer Oberflächenwelle.....	157
4.3.2	Reflexion einer Oberflächenwelle.....	159

4.3.3	Funktionsschema von OFW-Transpondern.....	160
4.3.4	Der Sensoreffekt.....	163
4.3.4.1	Reflektive Verzögerungsleitung.....	164
4.3.4.2	Resonante Sensoren.....	165
4.3.4.3	Impedanzsensoren.....	167
4.3.5	Geschaltete Sensoren.....	167
5	Frequenzbereiche und Funkzulassungsvorschriften.....	169
5.1	Verwendete Frequenzbereiche.....	169
5.1.1	Frequenzbereich 9 ... 135 kHz.....	171
5.1.2	Frequenzbereich 6,78 MHz (ISM).....	173
5.1.3	Frequenzbereich 13,56 MHz (ISM, SRD).....	174
5.1.4	Frequenzbereich 27,125 MHz (ISM).....	174
5.1.5	Frequenzbereich 40,680 MHz (ISM).....	175
5.1.6	Frequenzbereich 433,920 MHz (ISM).....	175
5.1.7	UHF-Frequenzbereich.....	176
5.1.7.1	Frequenzbereich 865,0 MHz (SRD).....	176
5.1.7.2	Frequenzbereich 915,0 MHz..... ^.....	176
5.1.8	Frequenzbereich 2,45 GHz (ISM, SRD).....	176
5.1.9	Frequenzbereich 5,8 GHz (ISM, SRD).....	177
5.1.10	Frequenzbereich 24,125 GHz (ISM).....	177
J5.1.11	Auswahl der Frequenz für induktiv gekoppelte RFID-Systeme.....	177
5.2	Internationale Fernmeldeunion (ITU).....	180
5.3	Europäische Zulassungsvorschriften.....	181
5.3.1	CEPT/ERC REC 70-03.....	182
5.3.1.1	Annex 1: Non-specific Short Range Devices.....	183
5.3.1.2	Annex 4: Railway applications.....	184
5.3.1.3	Annex 5: Road Transport & Traffic Telematics.....	185
5.3.1.4	Annex 9: Inductive applications.....	186
5.3.1.5	Annex 11: RFID applications.....	188
5.3.2	Standardisierte Messverfahren.....	188
5.3.2.1	Übergreifende Standards.....	188
5.3.2.2	Anwendungsspezifische Messvorschriften.....	190
5.4	Nationale Zulassungsvorschriften in Europa.....	191
5.4.1	Bundesrepublik Deutschland.....	191
5.4.1.1	Induktive Funkanwendungen.....	191
5.4.1.2	RFID-Systeme im UHF-Bereich.....	193
5.5	Nationale Zulassungsvorschriften.....	195
5.5.1	USA.....	195
5.6	Vergleich nationaler Regulierungsvorschriften.....	196
5.6.1	Umrechnung bei 13,56 MHz.....	196
5.6.2	Umrechnung auf UHF.....	198

6	Codierung und Modulation.....	199
6.1	Codierung im Basisband.....	200
6.2	Digitale Modulationsverfahren.....	202
6.2.1	Amplitudentastung (ASK).....	203
6.2.2	2-FSK.....	205
6.2.3	2-PSK.....	206
6.2.4	Modulationsverfahren mit Hilfsträger.....	207
7	Datenintegrität.....	209
7.1	Prüfsummenverfahren.....	209
7.1.1	Paritätsprüfung.....	209
7.1.2	LRC-Verfahren.....	210
7.1.3	CRC-Verfahren.....	211
7.2	Vielfachzugriffsverfahren - Antikollision.....	213
7.2.1	Raummultiplex - SDMA.....	216
7.2.2	Frequenzmultiplex - FDMA.....	217
7.2.3	Zeitmultiplex - TDMA.....	218
7.2.4	Beispiele für Antikollisionsverfahren.....	220
7.2.4.1	ALOHA-Verfahren.....	220
7.2.4.2	Slotted-ALOHA-Verfahren.....	222
7.2.4.3	Binary-Search-Algorithmus.....	226
8	Sicherheit von RFID-Systemen.....	235
8.1	Angriffe auf RFID-Systeme.....	236
8.1.1	Angriffe auf den Transponder.....	237
8.1.1.1	Dauerhaftes Zerstören des Transponders.....	237
8.1.1.2	Abschirmen oder Verstimmen des Transponders.....	238
8.1.1.3	Emulieren und Klonen eines Transponders.....	238
8.1.2	Angriffe über das HF-Interface.....	240
8.1.2.1	Abhören der Kommunikation.....	240
8.1.2.2	Störsender.....	241
8.1.2.3	Lesen mit vergrößerter Lesereichweite.....	241
8.1.2.4	Denial of Service-Angriff durch Blocker Tags.....	248
8.1.2.5	Relay-Attack.....	249
8.2	Abwehr durch kryptographische Maßnahmen.....	252
8.2.1	Gegenseitige symmetrische Authentifizierung.....	253
8.2.2	Authentifizierung mit abgeleiteten Schlüsseln.....	254
8.2.3	Verschlüsselte Datenübertragung.....	255
8.2.3.1	Streamcipher.....	256

9	Normung.....	259
9.1	Tieridentifikation.....	259
9.1.1	ISO/IEC 11784-Codestruktur.....	259
9.1.2	ISO/IEC 11785-Technisches Konzept.....	260
9.1.2.1	Anforderungen.....	260
9.1.2.2	Voll-/Halbduplex-System.....	262
9.1.2.3	Sequentielles System.....	262
9.1.3	ISO/IEC 14223 - Advanced Transponders.....	263
9.1.3.1	Teil 1 - Air Interface.....	263
9.1.3.2	Teil 2 - Code and Command Structure.....	265
9.2	Kontaktlose Chipkarten.....	267
9.2.1	ISO/IEC 10536 - Close-coupling-Chipkarten.....	268
9.2.1.1	Part 1 - Physical characteristics.....	268
9.2.1.2	Part 2 - Dimensions and locations of coupling areas.....	268
9.2.1.3	Part 3 - Electronic Signals and reset procedures.....	268
9.2.1.4	Part 4 - Answer to reset and transmission protocols.....	270
9.2.2	ISO/IEC 14443 - Proximity-coupling-Chipkarten.....	270
9.2.2.1	Part 1 - Physical characteristics.....	271
9.2.2.2	Part 2 - Radio frequency interface.....	271
9.2.2.3	Part 3 - Initialization and anticollision.....	276
^ 9.2.2.4	Part 4 - Transmission protocols.....	283
9.2.3	ISO/IEC 15693-Vicinity-coupling-Chipkarten.....	287
9.2.3.1	Part 1 - Physical characteristics.....	288
9.2.3.2	Part 2 - Air interface and initialization.....	288
9.2.4	ISO/IEC 10373 - Prüfmethode für Chipkarten.....	293
9.2.4.1	Part 4 - Testverfahren für Close-coupling-Chipkarten.....	294
9.2.4.2	Part 6 - Testverfahren für Proximity-coupling-Chipkarten.....	294
9.2.4.3	Part 7 - Testverfahren für Vicinity-coupling-Chipkarten.....	297
9.3	ISO/IEC 69873 - Datenträger für Werk- und Spanzeuge.....	298
9.4	ISO/IEC 10374 - Containeridentifikation.....	298
9.5	VDI4470 - Warensicherungssysteme.....	299
9.5.1	Teil 1 - Kundenabnahmerichtlinien für Schleusen-systeme.....	299
9.5.1.1	Ermittlung der Fehlalarmquote.....	300
9.5.1.2	Ermittlung der Detektionsrate.....	300
9.5.1.3	Formblätter in VDI 4470.....	301
9.5.2	Teil 2 - Kundenabnahmerichtlinien für Deaktivierungsanlagen.....	301
9.6	Güter- und Warenwirtschaft.....	302
9.6.1	ISO/IEC 18000 Reihe.....	302
9.6.1.1	ISO/IEC 15691 und 15692.....	303
9.6.2	GTAG Initiative.....	305
9.6.2.1	GTAG-Transportschicht (physical layer).....	306
9.6.2.2	GTAG Leitungs- und Anwendungsschicht.....	307

9.6.3	EPCglobal Network.....	307
9.6.3.1	Generation 2.....	309
9.6.3.2	Normen und Spezifikationen.....	310
9.6.3.3	Der Electronic Product Code (EPC).....	311
9.6.3.4	Transponderklassen.....	314
9.6.3.5	Einführung in das EPC-Netzwerk.....	315
10	Architektur elektronischer Datenträger.....	317
10.1	Transponder mit Speicherfunktion.....	317
10.1.1	HF-Interface.....	318
10.1.1.1	Schaltungsbeispiel - Lastmodulation mit Hilfsträger.....	318
10.1.1.2	Schaltungsbeispiel - HF-Interface für ISO-14443 Transponder.....	320
10.1.2	Adress- und Sicherheitslogik.....	322
10.1.2.1	State-Machine.....	323
10.1.3	Speicherarchitektur.....	324
10.1.3.1	Read-only-Transponder.....	324
10.1.3.2	Beschreibbare Transponder.....	326
10.1.3.3	Transponder mit Kryptofunktion.....	326
10.1.3.4	Segmentierte Speicher.....	328
10.1.3.5	MIFARE®-Applikationsverzeichnis.....	331
10.1.3.6	Dual-port-EEPROM.....	333
10.2	Mikroprozessoren.....	337
10.2.1	Dual Interface Karte.....	338
10.2.1.1	MIFAREplus.....	340
10.2.1.2	Moderne Konzepte für die Dual Interface Card.....	341
10.3	Speichertechnologie.....	343
10.3.1	RAM.....	344
10.3.2	EEPROM.....	344
10.3.3	FRAM.....	346
10.3.4	Leistungsvergleich FRAM - EEPROM.....	347
10.4	Messung physikalischer Größen.....	348
10.4.1	Transponder mit Sensorfunktionen.....	348
10.4.2	Messungen mit Mikrowellentranspondern.....	350
10.4.3	Sensoreffekt bei Oberflächenwellen-Transpondern.....	351
11	Lesegeräte.....	355
11.1	Datenfluss in einer Applikation.....	355
11.2	Komponenten eines Lesegerätes.....	356
11.2.1	HF-Interface.....	357
11.2.1.1	Induktiv gekoppeltes System, FDX/HDX.....	357
11.2.1.2	Mikrowellen-System - Halbduplex.....	358
11.2.1.3	Sequentielle Systeme - SEQ.....	360
11.2.1.4	Mikrowellen-System für OFW-Transponder.....	361
11.2.2	Steuerung.....	362

11.3	Low-cost-Aufbau - Leser-IC U2270B.....	363
11.4	Anschluss von Antennen für induktiv gekoppelte Systeme.....	365
11.4.1	Anschaltung mit Stromanpassung.....	366
11.4.2	Speisung über Koaxialkabel.....	368
11.4.3	Einfluss des Gütefaktors Q.....	372
11.5	Ausführungsformen von Lesegeräten.....	372
11.5.1	OEM-Lesegeräte.....	373
11.5.2	Lesegeräte für industriellen Einsatz.....	373
11.5.3	Portable Lesegeräte.....	374
12	Herstellung von Transpondern und kontaktlosen Chipkarten.....	377
12.1	Glas- und Plastiktransponder.....	377
12.1.1	Modulherstellung.....	377
12.1.2	Transponderhalbzeug.....	379
12.1.3	Komplettierung.....	380
12.2	Kontaktlose Chipkarten.....	380
12.2.1	Spulherstellung.....	381
12.2.2	Verbindungstechnik.....	385
12.2.3	Laminieren.....	386
13	Anwendungsbeispiele.....	389
13.1	Kontaktlose Chipkarten.....	389
13.2*!	ÖPNV.....	391
13.2.1	Ausgangssituation.....	391
13.2.2	Anforderungen.....	392
13.2.2.1	Transaktionszeit.....	392
13.2.2.2	Witterungsbeständigkeit, Lebensdauer, Bedienkomfort.....	393
13.2.3	Vorteile durch den Einsatz von RFID-Systemen.....	393
13.2.4	Tarifmodelle mit elektronischer Abrechnung.....	394
13.2.5	Marktpotenzial.....	395
13.2.6	Projektbeispiele.....	396
13.2.6.1	Korea-Seoul.....	396
13.2.6.2	Deutschland - Lüneburg, Oldenburg.....	398
13.2.6.3	EU-Projekte - „ICARE" und „CALYPSO".....	399
13.3	Elektronischer Reisepass.....	402
13.4	Ski-Ticketing.....	406
13.5	Zutrittskontrolle.....	407
13.5.1	Online-Systeme.....	408
13.5.2	Offline-Systeme.....	408
13.5.3	Transponder.....	410
13.6	Verkehrssysteme.....	411
13.6.1	Eurobalise S21.....	411
13.6.2	Internationaler Containerverkehr.....	413

13.7	Tieridentifikation.....	414
13.7.1	Rinderhaltung.....	414
13.7.2	Brieftauben-Preisflug.....	420
13.8	Elektronische Wegfahrsperr.....	422
13.8.1	Funktionsweise der Wegfahrsperr.....	422
13.8.2	Kurze Erfolgsgeschichte.....	425
13.8.3	Zukunftsaussichten.....	426
13.9	Behälteridentifikation.....	427
13.9.1	Gasflaschen und Chemikalienbehälter.....	427
13.9.2	Abfallentsorgung.....	429
13.10	Sportliche Veranstaltungen.....	431
13.11	Industrieautomation.....	433
13.11.1	Werkzeugidentifikation.....	433
13.11.2	Industrielle Fertigung.....	436
13.11.2.1	Zentrale Steuerung.....	437
13.11.2.2	Dezentrale Steuerung.....	438
13.11.2.3	Vorteile durch den Einsatz von RFID-Systemen.....	439
13.11.2.4	Auswahl geeigneter RFID-Systeme.....	439
13.11.2.5	Projektbeispiele.....	441
13.12	Medizinische Anwendungen.....	444
14	Anhang.....	447
14.1	Kontaktadressen, Verbände und Fachzeitschriften.....	447
14.1.1	Industrieverbände.....	447
14.1.2	Fachzeitschriften.....	449
14.1.3	RFID im Internet.....	450
14.2	Relevante Normen und Vorschriften.....	451
14.2.1	Normungsgremien.....	451
14.2.2	Normenliste.....	451
14.2.3	Bezugsquellen für Normen und Vorschriften.....	459
14.3	Literatur.....	460
14.4	Platinenlayouts.....	471
14.4.1	Testkarte nach ISO 14443.....	471
14.4.2	Feldgeneratorspule.....	475
15	Register.....	479