

# Funkempfänger-Kompendium

**Ralf Rudersdorfer**

unter Mitarbeit von

**Ulrich Graf**

(in I.1, I.2, II.8.1, III.9, IV.5, V.2.3, V.3)

**Hans Zahnd**

(in I.2.3, I.3, III.6.1, III.9.5)

Überarbeitete und erweiterte Neuauflage

ISBN 978-3-89576-419-6

*eBook* 978-3-89576-420-2

Mit 25 Tabellen und 225 Abbildungen.

Elektor-Verlag, Aachen

Elektor-Verlag GmbH, Aachen (D)

© 2010, 1. Auflage

© 2013, 2. überarbeitete und erweiterte Neuauflage

© 2021, 3. überarbeitete und erweiterte Neuauflage

Als internationale Edition in englischer Sprache bei John Wiley & Sons, Chichester (UK), unter dem Titel „Radio Receiver Technology“, ISBN 978-1-1185-0320-1, © 2013.

Alle Rechte vorbehalten.

Die in diesem Buch veröffentlichten Beiträge, insbesondere alle Aufsätze und Artikel sowie alle Entwürfe, Pläne, Zeichnungen und Illustrationen sind urheberrechtlich geschützt. Ihre auch auszugsweise Vervielfältigung und Verbreitung ist grundsätzlich nur mit vorheriger schriftlicher Zustimmung des Herausgebers gestattet.

Die Informationen im vorliegenden Buch werden ohne Rücksicht auf einen eventuellen Patentschutz veröffentlicht.

Bei der Erarbeitung von Texten und Abbildungen wurde mit größter Sorgfalt vorgegangen. Trotzdem können Fehler nicht vollständig ausgeschlossen werden. Verlag, Herausgeber und Autor können für fehlerhafte Angaben und deren Folgen weder eine juristische Verantwortung noch irgendeine Haftung übernehmen.

Für die Mitteilung eventueller Fehler sind Verlag und Autor dankbar.

Umschlaggestaltung: etcetera, Aachen (D)

Fotografien Titel: iStockphoto, Calgary (CA)

Zeichnungen: Ralf Rudersdorfer, Ennsdorf (A)

Druck: WILCO, Amersfoort (NL)

Printed in the Netherlands

ISBN 978-3-89576-419-6

*eBook* 978-3-89576-420-2

Elektor-Verlag GmbH, Aachen

[www.elektor.de](http://www.elektor.de)

# Inhaltsverzeichnis

<b>FUNKEMPFÄNGER-KOMPENDIUM</b>	<b>1</b>
<b>VORWORT</b>	<b>5</b>
Danksagung	6
<b>INHALTSVERZEICHNIS</b>	<b>9</b>
<b>I    FUNKTIONSWEISE VON FUNKEMPFÄNGERN</b>	<b>17</b>
<b>I.1    Zur Einleitung etwas Historie</b>	<b>17</b>
I.1.1    Resonanzempfänger, Fritter, Kohärer und quadratischer Detektor(-Empfänger)	17
I.1.2    Der Schritt zum Audion	18
<b>I.2    Gegenwärtige Konzeptionen</b>	<b>21</b>
I.2.1    Einfachsuperhet	21
I.2.2    Mehrfachsuperhet	26
I.2.3    Direktmischer	33
I.2.4    Digitalempfänger	37
I.2.5    Klassifikationsübersicht	43
<b>I.3    Ausführungsbeispiel (voll-)digitaler Funkempfänger</b>	<b>45</b>
I.3.1    Funktionsblöcke der digitalen Signalverarbeitung	47
I.3.2    Der A/D-Wandler als Schlüsselement	47
I.3.3    Umsetzung auf Frequenz Null	56
I.3.4    Präzision und Reproduzierbarkeit	59
I.3.5    VFO zur Frequenzabstimmung	60
I.3.6    Weitere erforderliche Hardware	63
I.3.7    Empfangsfrequenzexpansion durch Unterabtastung	67
	<b>9</b>

<b>I.4</b>	<b>Ausführungsbeispiel portabler, breitbandiger Funkempfänger</b>	<b>69</b>
I.4.1	Analoges HF-Frontend für breiten Empfangsfrequenzbereich	70
I.4.2	Anschließende digitale Signalverarbeitung	71
I.4.3	Demodulation mit Empfangspegelmessung	73
I.4.4	Spektrale Auflösung der Frequenzbelegung	74
<b>I.5</b>	<b>Ausführungsbeispiel ökonomischer Single-Chip-Hörfunkempfänger</b>	<b>77</b>
I.5.1	Zwei interne Frontpfade	78
I.5.2	Niedrig-ZF-Architektur	80
<b>Literatur</b>		<b>81</b>
<b>II</b>	<b>FUNKEMPFÄNGER: EINSATZGEBIETE &amp; ANWENDUNGEN</b>	<b>85</b>
<b>II.1</b>	<b>Prolog</b>	<b>85</b>
<b>II.2</b>	<b>Drahtloses Fernwirken</b>	<b>88</b>
II.2.1	Funk-Rundsteuerung	90
<b>II.3</b>	<b>Nichtöffentliche Funkdienste</b>	<b>92</b>
II.3.1	Flugfunk	92
II.3.2	Seefunk	94
II.3.3	Landfunk	98
II.3.4	Amateurfunk	100
II.3.5	Mobilfunk	102
<b>II.4</b>	<b>Funkaufklärung, Funküberwachung</b>	<b>103</b>
II.4.1	Vielschichtige Signalarten	106
II.4.2	Suchen und aufspüren	109
II.4.3	Aussendungen überwachen	116
II.4.4	Funkszenarien klassifizieren und auswerten	119
II.4.5	Empfänger wider Spektrumanalysator	123
<b>II.5</b>	<b>Richtungsbestimmung und Standortbestimmung</b>	<b>127</b>
II.5.1	Grundlegende Prinzipien der Funkpeilung	127
II.5.2	In Funkaufklärung und Funküberwachung	139

II.5.3	In Flugnavigation und Flugsicherung	143
II.5.4	In Schiffsnavigation und Schifffahrt	145
<b>II.6</b>	<b>Terrestrischer Hörrundfunkempfang</b>	<b>147</b>
<b>II.7</b>	<b>Zeitzeichenempfang</b>	<b>152</b>
<b>II.8</b>	<b>Moderne Funkfrequenznutzung und Frequenzökonomie</b>	<b>155</b>
II.8.1	Bündelfunknetze	155
II.8.2	Cognitive Radio	155
<b>Literatur</b>		<b>157</b>
<b>III</b>	<b>EMPFÄNGEREIGENSCHAFTEN UND DEREN MESSTECHNISCHE ERMITTLUNG</b>	<b>161</b>
<b>III.1</b>	<b>Zweck und Nutzen</b>	<b>161</b>
<b>III.2</b>	<b>Vorbereitungen zur messtechnischen Untersuchung</b>	<b>163</b>
III.2.1	Sonderfall korrelative Rauschunterdrückung	165
III.2.2	Sonderfall digitale Funkstandards und EVM	165
<b>III.3</b>	<b>Empfängereingangsanpassung/-impedanz</b>	<b>170</b>
III.3.1	Messtechnische Erfassung	172
III.3.2	Problematiken bei der Bestimmung	173
<b>III.4</b>	<b>Empfindlichkeit</b>	<b>174</b>
III.4.1	Physikalische Grenzen	174
III.4.2	Rauschzahl und Rauschmaß	175
III.4.3	Messtechnische Erfassung	178
III.4.4	Äquivalente Rauschbandbreite	180
III.4.5	Grenzempfindlichkeit	183
III.4.6	Messtechnische Erfassung	185
III.4.7	Eingangsrauschspannung	186
III.4.8	Signal/Störabstand und Betriebsempfindlichkeit – $S/N$ , $(S+N)/N$ , SINAD	187
III.4.9	Deemphasis	192

III.4.10	Nutzbare und zweckmäßige Empfindlichkeit	194
III.4.11	Maximaler Signal/Störabstand	202
III.4.12	Messtechnische Erfassung	204
III.4.13	Problematiken bei der Bestimmung	205
<b>III.5</b>	<b>Störstellenempfang</b>	<b>207</b>
III.5.1	Entstehung von Eigenempfangsstellen	207
III.5.2	Messtechnische Erfassung	207
III.5.3	Spiegelfrequenzempfang und -unterdrückung	208
III.5.4	ZF-Durchschlag und -Durchschlagsdämpfung	212
III.5.5	Zusätzliche Empfangsstörstellen	213
III.5.6	Messtechnische Erfassung	214
III.5.7	Sonderfall des linearen Nebensprechens	214
III.5.8	Messtechnische Erfassung	215
III.5.9	Problematiken bei der Bestimmung	216
<b>III.6</b>	<b>Nahselektivität</b>	<b>218</b>
III.6.1	Empfangsbandbreite und Formfaktor (Shape-Faktor)	219
III.6.2	Messtechnische Erfassung	221
III.6.3	Nachbarkanalunterdrückung	223
III.6.4	Messtechnische Erfassung	223
III.6.5	Problematiken bei der Bestimmung	224
<b>III.7</b>	<b>Reziprokes Mischen</b>	<b>226</b>
III.7.1	ESB-Rauschen	226
III.7.2	Nichtharmonische (trägernahe) Verzerrungen	229
III.7.3	Empfindlichkeitsminderung durch reziprokes Mischen	230
III.7.4	Messtechnische Erfassung	233
III.7.5	Problematiken bei der Bestimmung	235
<b>III.8</b>	<b>Blocking</b>	<b>236</b>
III.8.1	Kompression im HF-Frontend oder ZF-Teil	236
III.8.2	Ansprechen der AGC auf Störsignale	236
III.8.3	Störabstandsreduzierung durch Blocking	237

III.8.4	Messtechnische Erfassung	237
III.8.5	Problematiken bei der Bestimmung	238
<b>III.9</b>	<b>Intermodulation</b>	<b>240</b>
III.9.1	Entstehung	240
III.9.2	Intermodulation zweiter und dritter Ordnung	240
III.9.3	Intermodulation höherer Ordnung	247
III.9.4	Sonderfall elektromechanische und keramische Filter sowie Quarzfilter	249
III.9.5	Sonderfall A/D-gewandelte und digital verarbeitete Signale	251
III.9.6	Intermodulationsfestigkeit	252
III.9.7	Maximaler intermodulationsfreier Dynamikbereich	252
III.9.8	Interceptpunkt	253
III.9.9	Effektiver Interceptpunkt (auch Empfängerfaktor oder ...)	254
III.9.10	Messtechnische Erfassung	256
III.9.11	Problematiken bei der Bestimmung	259
III.9.12	Inbandintermodulation und nichtlineares Übersprechen	265
III.9.13	Messtechnische Erfassung	267
<b>III.10</b>	<b>Kreuzmodulation</b>	<b>270</b>
III.10.1	Entstehung	270
III.10.2	Ionosphärische Kreuzmodulation	273
III.10.3	Messtechnische Erfassung	274
III.10.4	Problematiken bei der Bestimmung	275
<b>III.11</b>	<b>Betriebsgüte selektiver HF-Preselektoren</b>	<b>276</b>
III.11.1	Dynamikzugewinn durch Vorselektion hoher Güte	277
III.11.2	Messtechnische Erfassung	278
<b>III.12</b>	<b>Großsignalverhalten allgemein</b>	<b>282</b>
III.12.1	Konkretes Exempel	283
III.12.2	Der IP3-Interpretationsirrtum	286
<b>III.13</b>	<b>Summenmessverfahren</b>	<b>288</b>
III.13.1	Rauschleistungsverhältnis(maß)	288

III.13.2	Messtechnische Erfassung	289
III.13.3	Problematiken bei der Bestimmung	291
<b>III.14</b>	<b>NF-Wiedergabeeigenschaften</b>	<b>292</b>
III.14.1	NF-Frequenzgang	292
III.14.2	Messtechnische Erfassung	293
III.14.3	Wiedergabequalität und Verzerrungen	294
III.14.4	Messtechnische Erfassung	295
III.14.5	Problematiken bei der Bestimmung	296
<b>III.15</b>	<b>Regelverhalten der automatischen Verstärkungsregelung (AGC)</b>	<b>297</b>
III.15.1	Statisches Regelverhalten	297
III.15.2	Messtechnische Erfassung	299
III.15.3	Zeitdynamisches Regelverhalten	300
III.15.4	Messtechnische Erfassung	303
<b>III.16</b>	<b>Frequenzstabilität</b>	<b>305</b>
III.16.1	Messtechnische Erfassung	306
III.16.2	Problematiken bei der Bestimmung	307
<b>III.17</b>	<b>Charakteristiken der Rauschsperr</b>	<b>308</b>
III.17.1	Messtechnische Erfassung	309
<b>III.18</b>	<b>Empfängerstörstrahlung</b>	<b>310</b>
III.18.1	Messtechnische Erfassung	312
III.18.2	Problematiken bei der Bestimmung	312
<b>III.19</b>	<b>(Relative) Empfangssignalstärke und S-Werte</b>	<b>313</b>
III.19.1	Definition und festgesetzte Pegel für S-Werte	316
III.19.2	Messtechnische Erfassung	318
III.19.3	Problematiken bei der Bestimmung	318
<b>III.20</b>	<b>AM-Unterdrückung des F3E-Empfangszugs</b>	<b>321</b>
III.20.1	Messtechnische Erfassung	322
<b>III.21</b>	<b>Suchgeschwindigkeit des Scan-Betriebsmodus</b>	<b>324</b>



III.21.1	Messtechnische Erfassung	325
<b>Literatur</b>		<b>327</b>
<b>IV</b>	<b>(MODELL FÜR DIE) BETRIEBSPRAKTISCHE BEWERTUNG VON FUNKEMPFÄNGERN</b>	<b>331</b>
IV.1	Sachlage	331
IV.2	Objektive Bewertung betriebspraktischer Eigenschaften	333
IV.2.1	Kaum gleiche Bedingungen anzutreffen	333
IV.2.2	Approximation nicht möglich	335
IV.3	Betriebspraxis kann Aufschluss geben	337
IV.3.1	Vergleichsgerät hilft	339
IV.3.2	Feine Unterscheidung kaum möglich und nötig	340
IV.4	Interpretation (und Zusammensetzung der Tabelle der BetriebsPRAXIS)	341
IV.4.1	Der Zugewinn an Information	342
IV.5	Individuelle Gerätedetails	344
<b>Literatur</b>		<b>345</b>
<b>V</b>	<b>ANHANG</b>	<b>347</b>
V.1	Kaskade rauschender Zweitore (Gesamtrauschverhalten)	347
V.2	Kaskade intermodulierender Zweitore (Gesamtintermodulationsverhalten)	352
V.2.1	Gesamtinterceptpunkt dritter Ordnung	352
V.2.2	Gesamtinterceptpunkt zweiter Ordnung	354
V.2.3	Rechnergestützte Berechnungen	355
V.3	Mathematischer Entstehungsprozess von Intermodulation	357
V.3.1	Intermodulation zweiter Ordnung	358
V.3.2	Intermodulation dritter Ordnung	358
V.3.3	Weitere Terme im Übertragungskennlinienpolynom	360

## Inhaltsverzeichnis

---

<b>V.4</b>	<b>Mischung und Ableitung von Nebenempfang</b>	<b>364</b>
V.4.1	Mischung = Multiplikation	364
V.4.2	Mehrdeutiger Mischvorgang	366
<b>V.5</b>	<b>Geografische Aufteilung der Erde in Regionen gemäß ITU RR</b>	<b>369</b>
<b>V.6</b>	<b>Merkmale der Sendarten gemäß ITU RR</b>	<b>370</b>
<b>V.7</b>	<b>dB?-Konvertierungspraxis</b>	<b>378</b>
V.7.1	Spannungs-, Strom- und Leistungspegel	378
V.7.2	Elektrische und magnetische Feldstärke-, (Leistungs-)Flussdichtepegel	380
<b>Literatur</b>		<b>382</b>
<b>FACHGLOSSAR ENGLISCH ⇨ DEUTSCH</b>		<b>385</b>
<b>TABELLENVERZEICHNIS</b>		<b>429</b>
<b>STICHWORTVERZEICHNIS</b>		<b>431</b>