

# Software Defined Radio zum Selbstbau

Praktischer Einstieg mit Arduino,  
GnuRadio und FPGA



Thomas Duden



# Software Defined Radio zum Selbstbau

## Praktischer Einstieg mit Arduino, GnuRadio und FPGA



Dr. Thomas Duden

---

● © 2024: Elektor Verlag GmbH, Aachen.

1. Auflage 2024

● 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. Die in diesem Buch erwähnten Soft- und Hardwarebezeichnungen können auch dann eingetragene Warenzeichen sein, wenn darauf nicht besonders hingewiesen wird. Sie gehören dem jeweiligen Warenzeicheninhaber und unterliegen gesetzlichen Bestimmungen.

Bei der Zusammenstellung 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.

### ● **Erklärung**

Autor, Übersetzer und Verlag haben sich nach besten Kräften bemüht, die Richtigkeit der in diesem Buch enthaltenen Informationen zu gewährleisten. Sie übernehmen keine Haftung für Verluste oder Schäden, die durch Fehler oder Auslassungen in diesem Buch verursacht werden, unabhängig davon, ob diese Fehler oder Auslassungen auf Fahrlässigkeit, Versehen oder eine andere Ursache zurückzuführen sind, und lehnen jegliche Haftung hiermit ab.

● **ISBN 978-3-89576-650-3** Print

**ISBN 978-3-89576-651-0** eBook

● Satz und Aufmachung: D-Vision, Julian van den Berg | Oss (NL)

Druck: Ipskamp Printing, Enschede (NL)

Elektor Verlag GmbH, Aachen

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

Elektor ist die weltweit wichtigste Quelle für technische Informationen und Elektronik-Produkte für Maker, Ingenieure und Elektronik-Entwickler und für Firmen, die diese Fachleute beschäftigen. Das internationale Team von Elektor entwickelt Tag für Tag hochwertige Inhalte für Entwickler und DIY-Elektroniker, die über verschiedene Medien (Magazine, Videos, digitale Medien sowie Social Media) in zahlreichen Sprachen verbreitet werden. [www.elektor.de](http://www.elektor.de)

## Inhaltsverzeichnis

<b>Kapitel 1 • Einleitung</b> . . . . .	<b>10</b>
<b>Kapitel 2 • Mechanik</b> . . . . .	<b>12</b>
2.1 Das RF-Brick-Template . . . . .	12
2.2 Das Chassis . . . . .	17
2.3 Die 19 Zoll Teilbaugruppe . . . . .	20
2.4 Abschließende Bemerkungen . . . . .	23
<b>Kapitel 3 • Bridges</b> . . . . .	<b>24</b>
3.1 Die USB-Isolator-Bridge . . . . .	24
3.2 I <sup>2</sup> C-Level-Shifter-Bridge . . . . .	28
3.3 Die I <sup>2</sup> C Schaltstufen-Bridge . . . . .	30
3.4 Beispiele für die Verwendung der Bridges . . . . .	34
<b>Kapitel 4 • Signalketten mit RF Bricks</b> . . . . .	<b>36</b>
4.1 Die Antenne . . . . .	36
4.1.1 Was die Antenne nicht empfängt, kann kein Verstärker aus dem Rauschen holen	37
4.1.2 Eine Antenne gehört nach draußen . . . . .	37
4.1.3 Ein Blitz- und Überspannungsschutz ist unbedingt notwendig. . . . .	37
4.1.4 Eine Antenne besitzt frequenzabhängige Eigenschaften . . . . .	38
4.1.5 Die symmetrische Speiseleitung vermeidet Gleichtaktstörungen . . . . .	38
4.1.6 Signalkosmetik. . . . .	39
4.2 Der Bandfilter-Brick . . . . .	39
4.2.1 Exkurs: Die Arbeit mit dem NanoVNA . . . . .	41
4.2.1.1 Installation der NanoVNA-Software auf dem Host . . . . .	44
4.2.1.2 Kalibrierung des Nano-VNAs . . . . .	45
4.2.2 Filterdaten selbst berechnen . . . . .	47
4.2.3 Aufbau eines Beispielfilters . . . . .	55
4.2.3.1 Wickeln der Ringkernspule nach Tabelle . . . . .	56
4.2.3.2 Messen der Induktivität, Anpassen der Windungszahl. . . . .	56
4.2.3.3 Den ersten Resonanzkreis aufbauen, Resonanzstelle nachmessen . . . . .	57
4.2.3.4 Den zweiten Resonanzkreis aufbauen, Resonanzstelle nachmessen . . . . .	59
4.2.3.5 Den Parallelkreis aufbauen (nicht angezapft) und abgleichen. . . . .	61

4.2.3.6 Den angezapften Parallelkreis aufbauen und abgleichen . . . . .	63
4.2.3.7 Die Polstelle kompensieren . . . . .	64
4.3 Der Vorverstärker-Brick . . . . .	68
4.4 Der PLL-Brick . . . . .	71
4.5 Der Lima-Demodulator-Brick. . . . .	75
4.6 Der integrierte Doppel-Demodulator . . . . .	78
4.7 Die Direktmischer-Signalkette . . . . .	80
4.8 Der Multiband-Direktmischer mit umschaltbaren Bandfiltern . . . . .	83
4.9 Der 45 MHz Schmalband-Brick . . . . .	89
4.9.1 Die Doppelsuperhet-Signalkette . . . . .	91
<b>Kapitel 5 • Bricks für HF-Messungen . . . . .</b>	<b>92</b>
5.1 Messsignale - Eine Spektrallinie. . . . .	92
5.2 Messsignale - Zwei Spektrallinien . . . . .	93
5.2.1 Der verzerrungsarme Generator-Brick. . . . .	94
5.2.2 Der Wheatstone-Bridge Power Combiner . . . . .	96
5.3 Messsignale - Rauschen . . . . .	101
5.3.1 Bitte 5 Hz Bandbreite Rauschen am Stück aus der Mitte . . . . .	101
5.3.2 Das Noise Power Ratio (NPR) . . . . .	103
5.3.3 Der Notchfilter-Brick . . . . .	103
5.3.4 Alternativen zur NPR-Messung mit dem Notchfilter . . . . .	113
5.3.5 Welche Informationen liefern die verschiedenen Ansätze? . . . . .	113
5.3.6 Der Rauschgenerator-Brick . . . . .	113
5.3.3 Der Breitband-Verstärker-Brick mit MMICs. . . . .	120
5.3.4 Die Impedanzmessbrücke . . . . .	123
<b>Kapitel 6 • Nützliche Zusatzgeräte . . . . .</b>	<b>126</b>
6.1 Das Antennenanpassgerät ATU-100 . . . . .	126
6.1.1 Die Firmware des ATU-100 verändern . . . . .	129
6.2 Der X-Phase QRM Eliminator . . . . .	131
6.2.1 Die Störung kompensieren. . . . .	131
6.2.2 Verpolungsschutz und Absicherung . . . . .	133
6.2.3 Mechanische Konstruktion und Zusammenbau . . . . .	134
6.2.4 Den X-Phase QRM-Eliminator betreiben . . . . .	136

<b>Kapitel 7 • Kabel und Kabel</b> . . . . .	<b>137</b>
<b>Kapitel 8 • Soundkarten und Soundkarten</b> . . . . .	<b>139</b>
8.2.1 Die interne Soundkarte . . . . .	139
8.2.2 USB-Stick mit 24 Bit-Soundkarte (CM6533) . . . . .	140
8.2.3 Asus Xonar U7 MKII . . . . .	141
8.2.4 Behringer U-PHORIA UMC404HD . . . . .	144
8.2.5 Fazit . . . . .	146
<b>Kapitel 9 • Vorgefertigte PC Host Software</b> . . . . .	<b>147</b>
9.1 SoapySDR . . . . .	147
9.1.1 Das SoapyAudio-Modul tweaken . . . . .	150
9.1.2 SoapyAudio an das neue rtaudio7 anpassen. . . . .	159
9.2 GQRX. . . . .	161
9.2.1 Integrierte Abstimmung mit gqrx-hamlib. . . . .	167
9.2.2 GQRX selbst übersetzen . . . . .	170
9.2.3 Zusätzliche Funktionalität in GQRX einbauen . . . . .	177
9.2.4 gqrx-hamlib tweaken. . . . .	179
9.2.5 Die Bandbreite von Pulseaudio heraufsetzen . . . . .	183
9.3 CubicSDR . . . . .	186
9.4 SDRPP . . . . .	192
9.5 Zusammenfassung. . . . .	194
<b>Kapitel 10 • GnuRadio</b> . . . . .	<b>195</b>
10.1 Die SDR-Hardware mit GnuRadio steuern . . . . .	195
10.1.1 Den Python Block erstellen. . . . .	196
10.2 Die ersten GUI-Elemente einbauen . . . . .	204
10.2.1 FrequencySink und Waterfall Sink . . . . .	204
10.2.2 Die Frequenzanzeige mit Messages steuern . . . . .	207
10.2.3 Den Frequenzselektor einsetzen . . . . .	210
10.3 SSB-Demodulation. . . . .	211
10.3.1 Das Weaver-Schema . . . . .	212
10.3.2 Einstellbare Verstärkungen vorsehen. . . . .	217
10.3.3 Verbessertes Weaver-Schema. . . . .	219
10.3.4 Das Messaging optimieren . . . . .	220

10.3.5 Die Filterbandbreite einstellbar machen . . . . .	222
10.4 Weitere Hardware-Optionen über den Arduino ansteuern . . . . .	223
10.4.1 Das TS850-CAT-Interface im Arduino erweitern . . . . .	223
10.4.2 Den seriellen Ansteuerblock erweitern . . . . .	225
10.5 Nochmals: Das Messaging optimieren . . . . .	226
10.6 Die GUI aufräumen . . . . .	227
10.7 Zusammenfassung und Ausblick . . . . .	228
<b>Kapitel 11 • SDR mit FPGAs . . . . .</b>	<b>230</b>
11.1 VHDL . . . . .	230
11.2 FPGA und IDE auswählen . . . . .	231
11.3 Datenwandler auswählen . . . . .	232
11.4 Den Umgang mit Scilab lernen . . . . .	233
11.4.1 Scilab installieren . . . . .	234
11.5 Die FPGA-Toolchain installieren . . . . .	234
11.5.1 Die aktuelle Intel® Quartus Version installieren. . . . .	234
11.5.2 Das Hilfesystem starten . . . . .	238
11.5.3 Den Arrow Programmierer installieren . . . . .	239
11.6 Das FPGA zum Leben erwecken . . . . .	241
11.6.1 Den FPGA-Shield aufbauen. . . . .	241
11.6.2 Hello World – eine LED blinken lassen . . . . .	244
11.6.2.1 Das Projekt konfigurieren . . . . .	244
11.6.2.2 Ein Blockdiagramm aus Standardfunktionen zusammenstellen. . . . .	245
11.6.2.3 Die Timing Constraints definieren. . . . .	260
11.6.2.4 Das Design übersetzen . . . . .	261
11.6.2.5 Den Pin Planner verwenden . . . . .	262
11.6.2.6 Die Übersetzung fertig stellen . . . . .	264
11.6.2.7 Das Design temporär in den FPGA laden . . . . .	266
11.6.2.8 Das Design permanent in den FPGA laden. . . . .	267
<b>Kapitel 12 • Blocks für PC-unabhängige FPGA-Empfänger mit SSB/CW Filtern entwickeln . . . . .</b>	<b>269</b>
12.1 Der Delta-Sigma-DAC. . . . .	269
12.1.1 Prinzip. . . . .	269

12.1.2 Übersetzung in VHDL . . . . .	270
12.1.3 Den DAC-Block definieren . . . . .	271
12.2 Ein einfacher Sinusgenerator. . . . .	274
12.2.1 Realisierung – Cordic oder Wertetabelle? . . . . .	274
12.2.2 Übersetzung in VHDL-Code . . . . .	277
12.2.3 Den Sinusgenerator-Block erzeugen . . . . .	278
12.2.4 Den Sinusgenerator-Block mit dem DAC testen . . . . .	278
12.3 Der Differenzverstärker-Brick . . . . .	279
12.4 Der 24 Bit-ADC . . . . .	281
12.4.1 Den 24 Bit-ADC-Brick aufbauen . . . . .	281
12.4.2 Auslesen des ADCs mit VHDL . . . . .	283
12.5 Eine Signalkette für die SSB-Demodulation. . . . .	286
12.5.1 Die Quadratur-Abtastung . . . . .	288
12.5.2 Das erste FIR-Tiefpassfilter . . . . .	289
12.5.3 Der Weaver-Mixer . . . . .	296
12.5.4 Das zweite FIR-Tiefpassfilter. . . . .	299
12.5.5 Die Signalkette zusammenbauen . . . . .	299
12.6 Der GnuRadio-Flowgraph . . . . .	300
12.7 Optimierungen . . . . .	301
12.7.1 Der Anti-Aliasing-Filter . . . . .	302
12.7.2 Einen Spitzenwert-Detektor einfügen . . . . .	305
12.7.3 Die Schmalband-Signalkette an den Systemwiderstand anpassen. . . . .	306
12.7.4 Vierfaches Oversampling mit dem LTC2380 . . . . .	309
12.7.5 Zehnfaches Oversampling mit dem LTC2380 . . . . .	312
12.7.6 Die Wirkung des Oversamplings analysieren. . . . .	316
12.7.7 Die Weaver-Signalkette als Oversampling-Filter interpretieren . . . . .	318
<b>Kapitel 13 • Ausblick . . . . .</b>	<b>320</b>
<b>Kapitel 14 • Quellen . . . . .</b>	<b>321</b>
<b>Index . . . . .</b>	<b>323</b>