

Inhaltsverzeichnis

I	Mikrocontrollergrundlagen	1
1	Einleitung	3
1.1	Ziel des Buchs	3
1.2	Struktur des Buches	4
1.3	Zielpublikum	5
1.4	Gebrauchsanweisung	6
1.4.1	Konventionen	6
2	Hallo, Welt!	9
2.1	Wahl der Programmiersprache	10
2.2	Benötigte Komponenten für die Applikationsentwicklung	12
2.2.1	Development Board	13
2.2.2	Software für die Entwicklung	16
2.3	Die erste Applikation	19
3	Der Mikroprozessor	23
3.1	Prozessorarchitektur	23
3.1.1	Eine kleine Aufgabe	24
3.1.2	Die Registerbank	27
3.1.3	Die Arithmetic Logic Unit (ALU)	30
3.1.4	Datenspeicher	32
3.1.5	Befehlsspeicher	35
3.1.6	Steuerwerk	36
3.1.7	Weitere Einheiten	37
3.1.8	Der Prozessor	38
3.1.9	Pipeline	44
3.2	Instruction Set Architecture	48
3.2.1	RISC-V	49
3.2.2	sum_up_n in Assembler	56
3.2.3	sum_up_n-Maschinensprache	57
3.3	Performance	58
3.3.1	Control and Status Registers	59
3.3.2	Funktionsaufruf	63

	3.3.3 Optimierung des Codes	68
	3.3.4 Änderung des Verfahrens	70
4	Der Mikrocontroller	73
4.1	Aufbau eines Mikrocontrollers	73
	4.1.1 Test des Zufallszahlengenerators	76
	4.1.2 Das Bussystem	78
	4.1.3 ESP32-C3 Memory Map	81
4.2	Speicher	82
	4.2.1 Speichertechnologien	82
	4.2.2 Speicherzugriffe in Software	88
	4.2.3 Cache	98
	4.2.4 Linker	107
4.3	Peripheriemodule	109
	4.3.1 Peripheriezugriff	110
	4.3.2 Durchführung des Zufallszahlentests	112
	4.3.3 Informationen der Hersteller	114
	4.3.4 Speicherlayout der Peripherie	116
	4.3.5 Bits als Schalter	117
4.4	Bitmaskierung	118
	4.4.1 Klassische Aussagenlogik	119
	4.4.2 Bitweise Operatoren in C	120
	4.4.3 Bitmaskierung	122
4.5	Zusammenfassung	125
II Peripheriemodule		127
5	Digitale Ein-/Ausgabe	129
5.1	Peripherie	129
5.2	Projekt Pulsoximeter	130
5.3	Elektrotechnische Grundlagen	132
	5.3.1 Strom und Spannung	132
	5.3.2 Widerstand und Ohm'sches Gesetz	134
	5.3.3 Halbleiter und Diode	135
	5.3.4 Schaltungsaufbau »LED an Batterie«	138
5.4	LED schalten	139
	5.4.1 Transistor	139
	5.4.2 Logische Funktionen mit CMOS	142
	5.4.3 GPIO-Modul	144
	5.4.4 Schaltungsaufbau ESP32-C3 mit LEDs	146
	5.4.5 Pin-Multiplexing	149
	5.4.6 Set-/Reset-Register	152

5.4.7	Bitfeld und Union in C	152
5.4.8	Gesamtes Modul kapseln	154
5.4.9	API des Herstellers	156
5.4.10	Oszilloskop als Hilfsmittel	157
5.4.11	Kondensator	159
5.4.12	Leistung, Arbeit, Batterielebensdauer	160
5.5	Taster anschließen	163
5.5.1	GPIO Eingangssignalfad	164
6	Interrupts und Exceptions	171
6.1	Exceptions und Interrupts	172
6.1.1	RISC-V-Ausnahmebehandlung	174
6.1.2	Aktivierung des Interrupts	178
6.1.3	Exception Handler	180
6.2	Schichtenarchitektur und Callback	184
6.2.1	Schichtenarchitektur	185
6.2.2	Callbacks	186
6.3	Interrupt bei Tastendruck	189
6.4	Sourcecodeverwaltung	191
6.4.1	Module in Unterverzeichnissen	191
6.4.2	Komponentenmodell des ESP-IDF	191
6.4.3	Versionsverwaltung	192
7	Externe Komponenten digital anschließen	195
7.1	Display ansteuern	196
7.2	Konfiguration im ESP-IDF	199
7.3	I ² C-Protokoll	200
7.3.1	SMBus	205
7.4	SPI-Schnittstelle	206
7.4.1	Bit-Banging	208
7.4.2	DMA: Direct Memory Access	209
7.4.3	Dateispeicherung auf SD-Karten	209
7.5	WS2812B	211
7.6	Weitere Kommunikationsschnittstellen	214
7.6.1	Serielle Schnittstelle, RS-232	214
7.6.2	I ² S	219
7.6.3	CAN	219
7.6.4	Funkschnittstellen	220
8	Analoge Werte verarbeiten	221
8.1	Die Welt ist analog	221
8.1.1	Abtastung (Sampling)	222
8.1.2	Analog-Digital-Wandlung	224

8.1.3	Messen am Spannungsteiler	225
8.2	Werte filtern	228
8.2.1	Filterimplementierung	230
8.3	Den Herzschlag erkennen	235
8.3.1	Diskrete Fourier-Transformation	237
8.4	Die Zeit messen	240
8.4.1	Taktgeber	240
8.5	Das Timer-Modul	242
8.5.1	Timer des ESP32-C3	243
8.5.2	Systemzeit und Kalenderzeit	244
8.5.3	Zeitsynchronisierung	244
8.5.4	Pulsweitenmodulation (PWM)	246
8.5.5	Weitere Komponenten	248
8.6	Zusammenfassung	248

III Embedded System 251

9	Embedded Betriebssystem	253
9.1	Embedded Applikationsmodell	253
9.2	Multitasking	255
9.3	Echtzeitbetriebssystem	257
9.3.1	FreeRTOS	258
9.4	Nebenläufigkeit	265
9.4.1	Semaphor	266
9.4.2	Kritische Region	267
9.4.3	Deadlock	269
9.4.4	Producer/Consumer	270
9.4.5	Message-Queue	271
9.4.6	Mutex und Signalisierung	275
9.4.7	Prioritätenbasiertes Scheduling	276
9.5	Systemkontext	279
9.6	Gerätetreiber	281
9.6.1	POSIX-Standard	282
10	Internet der Dinge	285
10.1	Internet	285
10.1.1	Wi-Fi-Konfiguration	288
10.1.2	Berkeley Sockets	290
10.1.3	UDP	290
10.1.4	TCP	292
10.1.5	Datenformate	294
10.1.6	Header	298

10.2	Cloud-Zugriff	303
	10.2.1 REST und CoAP	303
	10.2.2 MQTT-Protokoll	304
	10.2.3 Webserver	306
10.3	Bluetooth	307
	10.3.1 NimBLE Stack	309
	10.3.2 Generic Access Profile (GAP)	309
	10.3.3 GATT-Profil und ATT-Protokoll	310
10.4	Power-Management	314
	10.4.1 Sleep Modes	315
	10.4.2 Power-Management-Algorithmus	316
11	Schlusswort	317

IV Anhang 319

A	Webseite zum Buch	321
A.1	Material zum ESP32-C3 und ESP-IDF	321
A.2	Beispiele des Buchs	321
A.3	Übungsbeispiele	322
A.4	Errata	322
	Literaturverzeichnis	323
	Index	329