

# Inhaltsverzeichnis

|          |                                                       |           |
|----------|-------------------------------------------------------|-----------|
| <b>I</b> | <b>Mikrocontrollergrundlagen</b>                      | <b>1</b>  |
| <b>1</b> | <b>Einleitung</b>                                     | <b>3</b>  |
| 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         |
| <b>2</b> | <b>Hallo, Welt!</b>                                   | <b>9</b>  |
| 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        |
| <b>3</b> | <b>Der Mikroprozessor</b>                             | <b>23</b> |
| 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         |
| <b>4</b>  | <b>Der Mikrocontroller .....</b>          | <b>73</b>  |
| 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        |
| <b>II</b> | <b>Peripheriemodule .....</b>             | <b>127</b> |
| <b>5</b>  | <b>Digitale Ein-/Ausgabe .....</b>        | <b>129</b> |
| 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        |
| <b>6</b> | <b>Interrupts und Exceptions .....</b>               | <b>171</b> |
| 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        |
| <b>7</b> | <b>Externe Komponenten digital anschließen .....</b> | <b>195</b> |
| 7.1      | Display ansteuern .....                              | 196        |
| 7.2      | Konfiguration im ESP-IDF .....                       | 199        |
| 7.3      | I <sup>2</sup> 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 <sup>2</sup> S .....                               | 219        |
| 7.6.3    | CAN .....                                            | 219        |
| 7.6.4    | Funkschnittstellen .....                             | 220        |
| <b>8</b> | <b>Analoge Werte verarbeiten .....</b>               | <b>221</b> |
| 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        |
| <b>III</b> | <b>Embedded System</b>                | <b>251</b> |
| <b>9</b>   | <b>Embedded Betriebssystem .....</b>  | <b>253</b> |
| 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        |
| <b>10</b>  | <b>Internet der Dinge .....</b>       | <b>285</b> |
| 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        | <b>Schlusswort .....</b>                | <b>317</b> |
| <br>      |                                         |            |
| <b>IV</b> | <b>Anhang .....</b>                     | <b>319</b> |
| <br>      |                                         |            |
| <b>A</b>  | <b>Webseite zum Buch .....</b>          | <b>321</b> |
| A.1       | Material zum ESP32-C3 und ESP-IDF ..... | 321        |
| A.2       | Beispiele des Buchs .....               | 321        |
| A.3       | Übungsbeispiele .....                   | 322        |
| A.4       | Errata .....                            | 322        |
| <br>      |                                         |            |
|           | <b>Literaturverzeichnis .....</b>       | <b>323</b> |
| <br>      |                                         |            |
|           | <b>Index .....</b>                      | <b>329</b> |