

1	Einleitung	1
1.1	Was finden Sie in diesem Buch?	1
1.2	Für wen ist dieses Buch geschrieben?	3
1.3	Welche Kenntnisse setzt das Buch voraus?	4
1.4	Warum beschreibt das Buch keinen Arduino?	4
1.5	Zusatzmaterialien	4
1.6	Disclaimer/Haftungsausschluss	4
1.7	Dank	5
	Literatur	5
2	Einführung in die Programmiersprache C	7
2.1	Die Sprache C: Hintergrund und Aufbau	7
2.2	Bezeichner, Schlüsselworte und Symbole in C	10
2.2.1	Bezeichner	10
2.2.2	Schlüsselworte	10
2.2.3	Symbole	11
2.2.4	Anweisungen	11
2.3	Kommentare	12
2.3.1	Einzeiliger Kommentar	12
2.3.2	Mehrzeiliger Kommentar	12
2.3.3	Doxygen-Kommentare	12
2.4	Typen, Variablen und Konstanten	13
2.4.1	Fundamentale Datentypen	15
2.4.2	Deklaration von Variablen	17
2.4.3	Konstanten	18
2.5	Operatoren	20
2.5.1	Arithmetische Operatoren	20
2.5.2	Logische Operatoren	21
2.5.3	Bitoperatoren	21
2.5.4	Operatoren für Speicherzugriffe	21

2.5.5	Weitere Operatoren	22
2.5.6	Assoziativität und Priorität von Operatoren.....	22
2.5.7	Typumwandlung.....	23
2.6	Kontrollstrukturen	25
2.6.1	Verzweigung (Auswahl).....	25
2.6.2	Fallstricke.....	27
2.6.3	Mehrfachverzweigung	27
2.7	Schleifen.....	29
2.7.1	Kopfgesteuerte Schleifen	29
2.7.2	Fußgesteuerte Schleifen.....	30
2.7.3	Zählschleifen	30
2.7.4	Sprünge	31
2.8	Funktionen	32
2.8.1	int main()	32
2.8.2	Definition und Deklaration.....	33
2.8.3	Sichtbarkeit und Lebensdauer von Variablen in Funktionen ...	35
2.8.4	Header	36
2.8.5	Die Schlüsselworte extern, volatile und static	37
2.9	Komplexe Datentypen	40
2.9.1	Arrays, Felder und Zeichenketten	40
2.9.2	Struktur.....	44
2.9.3	Unions	47
2.9.4	Aufzählungstypen	49
2.9.5	Pointer	50
2.10	Aufbau eines Embedded-C-Programms.....	54
2.11	Arbeiten mit dem Präcompiler.....	56
2.11.1	#define und Arbeiten mit Makros.....	56
2.11.2	#pragma	58
2.11.3	Zusammenfassung der Präcompiler-Befehle	59
2.12	Übersetzen und Binden	59
	Literatur.....	61
3	Programmierung von AVR Mikrocontrollern	63
3.1	Architektur der AVR-Familie.....	64
3.2	Gehäuse und Anschlussbelegungen.....	67
3.3	Versorgung, Takt und Reset-Logik.....	67
3.3.1	Versorgung	67
3.3.2	Takt.....	67
3.3.3	Reset-Logik	70
3.3.4	Speicher	70
3.4	Umgang mit Registern	72
3.5	Digitaler Input/Output	75

3.5.1	Grundsätzlicher Aufbau	75
3.5.2	Programmierung.	78
3.6	Interrupts	81
3.6.1	Einstieg in den Umgang mit Interrupts	82
3.6.2	Interrupt-Programmierung am Beispiel des Pin Change Interrupt	82
3.6.3	Die externen Interrupts INTx	86
3.7	Timer	87
3.7.1	Timer-Grundlagen	87
3.7.2	Programmierung der Timer/Counter	89
3.8	Analoge Schnittstelle	108
3.8.1	Analogmultiplexer	108
3.8.2	Analogkomparator	109
3.8.3	AD-Wandler (ADC).	110
3.8.4	Beispiel: Thermometer.	117
3.8.5	Beispiel: Effektivwertmessung an einer Sinusspannung	119
3.9	Power Management	120
3.10	Internes EEPROM	123
3.10.1	Deklaration einer Variablen im EEPROM	123
3.10.2	Lesen aus dem EEPROM.	123
3.10.3	Schreiben ins EEPROM.	124
3.11	Dynamische Speichernutzung	125
3.12	Verlagerung von Daten in den Programmspeicher.	127
	Literatur.	128
4	Software Framework	129
4.1	Sichten	130
4.2	Hardware-Abstraktion	131
4.3	Modularisierung und Zugriff auf Module	132
4.4	Zeitsteuerung	134
	Literatur.	138
5	Speicherkonzepte und Algorithmen	139
5.1	Wichtige Speicherkonzepte	139
5.1.1	Warteschlangen und Ringpuffer (FIFO).	140
5.1.2	Warteschlange mit dynamischen Datenstrukturen.	143
5.1.3	Mehrere Warteschlangen in einem Programm.	145
5.1.4	Mehrere Warteschlangen mit unterschiedlichen Typen	147
5.2	Zustandsautomaten (Statemachine)	149
5.2.1	Allgemeine Betrachtung.	149
5.2.2	Beschreibung von Zustandsautomaten.	151
5.2.3	Umsetzung von Zustandsautomaten auf Mikrocontrollern	154
	Literatur.	157

6	Theoretische Überlegungen zu IoT Netzwerken	159
6.1	Das ISO/OSI Schichtenmodell	160
6.1.1	Schicht 1: Physikalische Bitübertragung	162
6.1.2	Schicht 2: Sicherungsschicht	173
6.1.3	Schicht 3: Vermittlungsschicht	183
6.1.4	Schicht 4: Transportschicht	186
6.1.5	Anwendungsprotokolle für IoT Netzwerke	188
6.2	Anforderungen an IoT Netzwerke	190
	Literatur	193
7	Asynchrone serielle Schnittstellen	195
7.1	Universal Asynchronous Receiver/Transmitter (UART)	195
7.1.1	Hardwareanbindung in der AVR-Familie	197
7.1.2	UART-Register beim ATmega 88	198
7.1.3	Initialisieren der UART Schnittstelle beim ATmega88	200
7.1.4	Empfangen von Daten	201
7.1.5	Senden von Daten	203
7.1.6	Implementierung von <code>uartWriteBuffer()</code>	203
7.1.7	UART-Multiprozessor-Modus	204
7.2	Anbindung der seriellen Schnittstelle an USB	211
7.3	Ein einfaches serielles Protokoll	211
7.3.1	Herstellung von Codetransparenz durch Bytestuffing	216
	Literatur	218
8	Serial Peripheral Interface (SPI)	219
8.1	Aufbau und Funktionsweise	219
8.2	Konfiguration der SPI-Schnittstelle	221
8.3	SPI-Schnittstelle im Slavebetrieb	225
8.4	SPI-Schnittstelle in einem Sensornetzwerk	228
8.5	3-wire-SPI-Kommunikation	233
8.6	SPI-Master über USART	235
	Literatur	239
9	Die I²C/TWI-Schnittstelle	241
9.1	I ² C-Bus-Konfiguration	243
9.2	Bus-Erweiterung	245
9.2.1	I ² C-Repeater	246
9.2.2	I ² C-Hub	246
9.2.3	I ² C-Multiplexer	246
9.2.4	I ² C-Switch	247
9.3	TWI in der AVR-Familie	247
9.3.1	TWI-Register beim ATmega 88	248
9.3.2	Initialisieren der TWI-Schnittstelle	249

9.3.3	TWI-Kommunikation.....	251
9.3.4	Der Mikrocontroller ATmega als TWI-Master.....	251
9.3.5	Der Mikrocontroller ATmega als TWI-Slave.....	257
	Literatur.....	261
10	CAN Bus	263
10.1	CAN-Grundlagen kompakt	264
10.2	CAN-Timing	266
10.3	Nutzung von CAN mit Prozessoren der AVR-Familie.....	267
10.3.1	CAN-Controller MCP2515	268
10.3.2	AT90CANxx	274
10.3.3	Implementierung mit der CAN-Bibliothek des Roboterclub Aachen.....	278
10.4	CAN-Transportprotokoll	281
10.5	CANopen in der Industriesteuerungstechnik.....	284
	Literatur.....	285
11	Der Modbus	287
11.1	TIA/EIA-485 als Bitübertragungsschicht für MODBUS.....	288
11.2	MODBUS-Kommunikation	290
11.2.1	Remote-Terminal-Unit-Übertragung	290
11.2.2	ASCII-Übertragung	293
	Literatur.....	296
12	Eindrahtbussysteme	297
12.1	1-Wire®-BUS	298
12.1.1	Netzwerktopologie	298
12.1.2	Initialisierung des Busses.....	300
12.1.3	1-wire-Bitübertragung	301
12.1.4	Kommunikationssitzung.....	303
12.1.5	Softwareaufbau der 1-wire-Buskommunikation	307
12.1.6	Ansteuerung eines 1-wire-Temperatursensors vom Typ DS18B20	309
12.2	UNI/O®-Bus	312
12.2.1	Netzwerktopologie	312
12.2.2	Bitcodierung.....	313
12.2.3	UNI/O-Pulsrahmen	313
12.2.4	Kommunikationssitzung.....	313
12.2.5	Softwareaufbau einer UNI/O-Buskommunikation.....	315
12.2.6	Ansteuerung eines 1XXYYZ-EEPROM	319
12.3	LIN-Bus	326
	Literatur.....	331

13	Drahtlose Netzwerke	333
13.1	Grundlagen der Funkschnittstellen	334
13.1.1	Multiplexverfahren	334
13.1.2	Sensorknoten	335
13.2	Funkübertragung im 433 MHz und 868 MHz ISM-Band	337
13.2.1	Aufbau des RFM12B	337
13.2.2	Beschaltung des RFM12-Funkmoduls	338
13.2.3	Die SPI-Kommunikation	339
13.2.4	Der Befehlssatz	340
13.2.5	Das Statusregister	345
13.2.6	Initialisierung des Transceivers	346
13.2.7	Daten senden	348
13.2.8	Lesen der empfangenen Daten	350
13.3	Funkprotokolle im 2,4-GHz-ISM-Band	351
13.3.1	Bluetooth	351
13.3.2	ZigBee	357
13.4	Bluetooth® Kommunikation mit dem serial profile	361
13.4.1	Betriebsmodi	362
13.4.2	Befehlssatz	362
13.4.3	Initialisierung des Funkmoduls	363
	Literatur	365
14	Sensortechnik Systemtechnische Überlegungen	367
14.1	Abtastung	368
14.2	Quantisierung	371
14.3	Digitale Filterung	373
14.3.1	Finite-Impulse-Response-Filter (FIR)	373
14.3.2	Infinite-Impulse-Response-Filter (IIR)	376
14.3.3	Filterung am Beispiel eines FIR-Filters	377
14.4	I/O-Steuerlogik	378
14.5	Abstraktion der I/O-Pins	379
14.6	Ganzzahlarithmetik	380
14.6.1	Mikrocontrollerinterne Zahlenformate	380
14.6.2	Vorzeichenlose Ganzzahltypen	382
14.6.3	Vorzeichenbehaftete Ganzzahltypen	383
14.6.4	Erkennung und Verhinderung eines Überlaufs	384
	Literatur	385
15	Umweltsensoren	387
15.1	MPL3115 digitaler Luftdrucksensor	387
15.1.1	Funktionsweise	388
15.1.2	Aufbau des MPL3115	390
15.1.3	Serielle Kommunikation	397

15.1.4	Power-Modi	397
15.1.5	Mess- und Lesemodi	398
15.1.6	Initialisierung des MPL3115-Sensors	399
15.2	Luftfeuchtigkeit SI7021	399
15.2.1	Aufbau des SI7021	400
15.2.2	Serielle Kommunikation	402
15.2.3	Berechnung der Temperatur und der relativen Luftfeuchtigkeit	406
15.2.4	Testbarkeit	408
15.3	Temperaturmessung mit dem TMP75	409
15.3.1	Sensorkonfigurierung	410
15.3.2	Serielle Schnittstelle	411
15.3.3	Temperaturmessung	413
15.3.4	Thermostatfunktion	414
15.4	Feinstaubsensor SDS011	418
15.4.1	Messprinzip	419
15.4.2	Ansteuerung und serielle Kommunikation	420
	Literatur	424
16	Beschleunigungssensoren	427
16.1	Beschleunigungssensor ADXL312	428
16.1.1	Vernetzung des ADXL312	429
16.1.2	Messdatenerfassung	431
16.1.3	Offset-Ermittlung	437
16.1.4	Interruptmodus	437
16.1.5	ADXL312 als Neigungssensor	439
16.2	MMA6525	443
16.2.1	Sensoraufbau	443
16.2.2	Registerblock	444
16.2.3	SPI-Kommunikation	445
	Literatur	453
17	Drehratensensoren	455
17.1	Gyroskop	456
17.1.1	Beschaltung des L3GD20	457
17.1.2	Kommunikationsschnittstellen	457
17.1.3	Arbeitsmodi	461
	Literatur	471
18	Magnetfeldsensoren	473
18.1	HMC5883-Magnetfeldsensor	475
18.1.1	Aufbau des HMC5883	475
18.1.2	HMC5883 Messwerte lesen	481
18.1.3	Kalibrierung des Sensors	482

18.1.4	HMC5883 als elektronischer Kompass	484
18.1.5	Winkelberechnung mit dem CORDIC-Algorithmus	485
	Literatur	487
19	Näherungssensoren	489
19.1	Ultraschall-Näherungssensoren	489
19.1.1	Messprinzip	490
19.1.2	SRF08 – Ultraschall-Messmodul	492
19.2	SI114x – optischer Näherungssensor	497
19.2.1	SI114x – Arbeitsmodi	497
19.2.2	SI114x – Aufbau	500
19.2.3	Serielle Kommunikation	504
19.2.4	Messungen mit dem SI114x	505
19.2.5	Interrupts	510
19.2.6	SI114x – Netzwerkidentifikation	511
	Literatur	511
20	Digital-Analog- und Analog-Digital-Wandler	513
20.1	MCP48XX SPI-angesteuerte Digital-Analog-Wandler	513
20.1.1	Die SPI-Schnittstelle	515
20.1.2	Das Eingangsregister	515
20.1.3	Der D/A-Wandler	516
20.1.4	Der analoge Ausgangsverstärker	516
20.1.5	Synchrone Ansteuerung zweier D/A-Wandler	517
20.1.6	Softwarebeispiel	520
20.2	PCF8591 I ² C-angesteuerter D/A- und A/D-Wandler	522
20.2.1	I ² C-Kommunikation	523
20.2.2	Der D/A-Wandler	524
20.2.3	Der A/D-Wandler	526
20.2.4	Das Control-Register	529
20.2.5	Der Oszillator	529
20.3	Strommessung mit dem LMP92064	530
20.3.1	LMP92064 Aufbau	531
20.3.2	Serielle Kommunikation	532
20.3.3	Messen mit dem LMP92064	533
	Literatur	536
21	Serielle EEPROMs	539
21.1	Parallele Festwertspeicher	541
21.2	Serielle EEPROM-Speicher	542
21.2.1	M24C64 – I ² C-angesteuerter EEPROM	542
21.2.2	25LC256 – SPI-angesteuerte EEPROMs	551
	Literatur	559

22	Serielle Flash-Speicher	561
22.1	AT45DB161 serieller Flashspeicher	564
22.1.1	SPI-Kommunikation.	565
22.1.2	SRAM-Zwischenspeicher	566
22.1.3	Flash-Hauptspeicher.	567
22.1.4	Lesen	568
22.1.5	Speichern	570
22.1.6	Löschen	573
22.1.7	Speicherschutz	573
22.1.8	Testbarkeit	574
22.2	SST25WF0808 serieller Flashspeicher	575
22.2.1	SPI-Kommunikation.	576
22.2.2	Statusregister	577
22.2.3	Lese-Funktionen.	578
22.2.4	Lösch-Funktionen	579
22.2.5	Schreib-Funktionen	580
22.2.6	2-Leitung-serielle-Schnittstelle	581
	Literatur.	581
23	Bausteine für die Audiotechnik	583
23.1	SI4840 Radio-IC	584
23.1.1	Bausteinbeschreibung	585
23.1.2	Auswahl des Frequenzbandes und Frequenzabstimmung	586
23.1.3	Initialisieren des Bausteins.	588
23.1.4	Kommunikation mit dem Baustein	588
23.1.5	Sendersuche mit dem SI4840.	593
23.2	LM48100Q Verstärker-Baustein	597
	Literatur.	602
24	Vernetzbare integrierte Schaltkreise	603
24.1	PCF8574 – Port-Expander	603
24.1.1	Endstufe eines I/O-Pins	604
24.1.2	Ausgang-Port-Modus	605
24.1.3	Eingang-Port-Modus	607
24.1.4	Interrupt-Modus	608
24.1.5	PCA9534	608
24.2	MCP41X1 digitale Regelwiderstände	609
24.2.1	Power-On-/Brown-Out-Reset-Schaltung	610
24.2.2	Elektrischer Widerstand	611
24.2.3	Potentiometer-Register.	611
24.2.4	Ansteuerfunktionen des Bausteins MCP4151	614
24.2.5	SPI-Kommunikation.	614
24.2.6	Softwarebeispiel.	616

24.3	MAX31629 – Real Time Clock (RTC)	618
24.3.1	Zeitmessung	618
24.3.2	Alarmzeit	621
24.3.3	Temperaturmessung	622
24.3.4	Thermostat mit Alarmfunktion	623
24.3.5	I ² C-Kommunikation	625
	Literatur	627
25	Anzeigen	629
25.1	Einführung	630
25.1.1	Displaylayout	630
25.1.2	Emissive und nicht emmissive Anzeigen	630
25.1.3	Bildaufbau	634
25.1.4	Display Ansteuerung	635
25.2	Punktmatrix-LCD-Display mit paralleler Ansteuerung	635
25.2.1	Struktur eines Displays mit einem KS0070B-Controller	635
25.2.2	Befehlssatz	637
25.2.3	4-Bit-Kommunikation	639
25.2.4	Generierung eines neuen Zeichens	640
25.2.5	Ausführen der Display-Befehle ohne blockierendes Warten	642
25.3	Serielle Ansteuerung eines parallelen LC-Displays	645
25.3.1	Display-Ansteuerung über I ² C	646
25.3.2	Software-Beispiel: Übertragung eines Datenbytes	646
25.4	DOGS102-6 – Graphisches Display mit serieller Ansteuerung	649
25.4.1	Struktur des graphischen Displays DOGS 102–6	650
25.4.2	SPI-Kommunikation	651
25.4.3	Befehlssatz	653
25.4.4	Generierung eines Zeichens	657
	Literatur	659
26	Beispielprojekte	661
26.1	Datenlogger	661
26.1.1	Aufbau der Modellrakete	661
26.1.2	Beschreibung des Projekts	663
26.1.3	Beschreibung der Software	665
26.1.4	Auswertung	667
26.2	Smart Home mit CAN	668
26.2.1	Aufbau	669
	Literatur	673
	Stichwortverzeichnis	675