





**Klaus Dembowski** hat Nachrichtentechnik studiert und ist an der Technischen Universität Hamburg-Harburg tätig. Seine Schwerpunkte liegen in den Bereichen Mikrocontrollerentwicklung, Hard- und Software für Mikrosysteme sowie Energy Harvesting. Bei der Vermittlung aktueller Inhalte aus den Bereichen der Elektronik sowie der Informations- und Netzwerktechnik kann er auf eine langjährige Erfahrung als Autor und Dozent zurückgreifen. Die mittlerweile über 40 erschienenen Buchtitel zeichnen sich ebenso wie die regelmäßig erscheinenden Zeitschriftveröffentlichungen, Seminare und Vorträge durch eine verständliche und praxisorientierte Darstellung auch komplexer Sachverhalte aus.

**Klaus Dembowski**

# **Mikrocontroller – Der Leitfaden für Maker**

**Schaltungstechnik und Programmierung von  
Raspberry, Arduino & Co.**



**dpunkt.verlag**

Klaus Dembowski

Lektorat: Dr. Michael Barabas

Copy-Editing: Friederike Daenecke, Zülpich

Herstellung: Frank Heidt

Umschlaggestaltung: Helmut Kraus, [www.exclam.de](http://www.exclam.de)

Druck und Bindung: M.P. Media-Print Informationstechnologie GmbH, 33100 Paderborn

Bibliografische Information der Deutschen Nationalbibliothek

Die Deutsche Nationalbibliothek verzeichnet diese Publikation in der Deutschen Nationalbibliografie; detaillierte bibliografische Daten sind im Internet über <http://dnb.d-nb.de> abrufbar.

ISBN 978-3-86490-150-8

1. Auflage 2014

Copyright © 2014 dpunkt.verlag GmbH

Wiebinger Weg 17

69123 Heidelberg

Die vorliegende Publikation ist urheberrechtlich geschützt. Alle Rechte vorbehalten. Die Verwendung der Texte und Abbildungen, auch auszugsweise, ist ohne die schriftliche Zustimmung des Verlags urheberrechtswidrig und daher strafbar. Dies gilt insbesondere für die Vervielfältigung, Übersetzung oder die Verwendung in elektronischen Systemen.

Es wird darauf hingewiesen, dass die im Buch verwendeten Soft- und Hardware-Bezeichnungen sowie Markennamen und Produktbezeichnungen der jeweiligen Firmen im Allgemeinen warenzeichen-, marken- oder patentrechtlichem Schutz unterliegen.

Alle Angaben und Programme in diesem Buch wurden mit größter Sorgfalt kontrolliert. Weder Autor noch Verlag können jedoch für Schäden haftbar gemacht werden, die in Zusammenhang mit der Verwendung dieses Buches stehen.

5 4 3 2 1 0

---

## Vorwort

Praktische Bücher über Mikrocontroller behandeln üblicherweise einen ganz bestimmten Typ, der dementsprechend programmiert und eingesetzt wird. Lehrbücher über Mikrocontroller konzentrieren sich fast ausschließlich auf theoretische Gesichtspunkte, gehören nicht selten »zur trockenen Materie« und lassen einen aktuellen Praxisbezug oft vermissen. Mit diesem Buch wird versucht Theorie und Praxis anschaulich zu verbinden, wobei verschiedenste aktuelle Mikrocontroller und Boards zum Einsatz kommen, die sowohl erläutert als auch eingesetzt werden.

Das erste Buch, das ich geschrieben habe, hat den Titel *Intel-8096-Microcontroller-Familie – Ein Handbuch für Programmierer und Systementwickler* aus dem Jahre 1989. Der Intel 8096 war der erste 16-Bit-Microcontroller und wurde insbesondere für Embedded Systems wie beispielsweise bei Motorsteuerungen häufig eingesetzt. Fast 25 Jahre oder auch ca. 50 Bücher später, die sich vorwiegend mit PC- und Netzwerktechnik beschäftigt haben, also wieder ein Mikrocontrollerbuch.

Die Grundfunktionalität eines Mikrocontrollers hat sich in der Zwischenzeit zwar kaum verändert, allerdings ist diese Thematik nun nicht mehr allein den Programmierern und Systementwicklern vorbehalten, was insbesondere der Arduino- und der Raspberry-Pi-Plattform zu verdanken ist, die es mit einem fast spielerischen Ansatz erlauben, dass jedermann kostengünstig Projekte verwirklichen kann, die einen Mikrocontroller oder auch einen Single-Board-Computer einsetzen. Wer bereits erste Erfahrungen mit diesen oder ähnlichen Systemen gesammelt hat und weiter in die Elektronik und Programmierung einsteigen möchte, der kann mit diesem Buch auf einen verlässlichen Ratgeber und Leitfaden zurückgreifen.

Die ersten Kapitel sind durchaus für Anfänger geeignet. Der Schwierigkeitsgrad wird im Verlauf des Buches zunehmend höher, was der Tatsache geschuldet

ist, dass die Funktionen der Einheiten, wie für das Energy Harvesting oder auch für Funksysteme notwendig sind, eben komplexer sind. Wer sich jedoch von Kapitel zu Kapitel »hocharbeitet«, wird zunehmend auch die komplizierteren Zusammenhänge erschließen können. Der Profi wird hingegen meist selektiv direkt die für ihn interessanten Teile anvisieren, weil sich das Buch vom Aufbau her auch als Nachschlagewerk eignet.

*Klaus Dembowski*

Februar 2014

# Inhaltsverzeichnis

<b>1</b>	<b>Mikrocontrollergrundlagen</b>	<b>1</b>
1.1	Architekturen	1
1.2	Complex und Reduced Instruction Set Computer	4
1.3	Start mit Mikrocontrollern der Firma Intel	6
1.3.1	Low Power	8
1.4	Spannungsversorgung, Oszillator und Reset	10
1.5	Arbeitsspeicher	11
1.6	Interrupt-Logik	14
1.7	Watchdog	17
1.8	Brown Out Detection	19
1.9	JTAG-Interface	19
1.10	DMA-Logik	20
1.11	Adressierung	22
1.12	Programmierung	23
<b>2</b>	<b>Mikrocontrollerfamilien beurteilen und auswählen</b>	<b>27</b>
2.1	8051-Mikrocontroller	28
2.1.1	Architektur	31
2.2	Microchip-Mikrocontroller – PIC	34
2.2.1	Architektur und Ausstattungsmerkmale	36
	Oszillatoren	39
	Reset-Konfiguration	40
	ICSP-Interface	41
	Programmspeicher	43

2.2.2	Konfigurationsdaten . . . . .	44
	Taktgeneratoreinstellung . . . . .	44
	Power Up Timer . . . . .	44
	Brown Out Detect . . . . .	44
	Watchdog Timer . . . . .	45
	CCP2Mux . . . . .	45
	Stack Overflow Reset . . . . .	45
	Low Voltage Programming . . . . .	46
	Code Protection . . . . .	46
	Schreiben der Konfigurationsdaten . . . . .	46
2.2.3	PIC-Mikrocontrollerfamilien . . . . .	47
2.2.4	NanoWatt-Technologie . . . . .	50
2.2.5	Entwicklungsumgebung . . . . .	51
2.3	Atmel-Mikrocontroller . . . . .	54
2.3.1	Architektur . . . . .	56
2.3.2	AVR-Controller-Familien im Überblick . . . . .	58
2.3.3	Power-Save-Betriebsarten . . . . .	60
2.3.4	Entwicklungsumgebung . . . . .	62
2.4	MSP430-Mikrocontroller . . . . .	64
2.4.1	Architektur . . . . .	64
2.4.2	MSP430-Controllerfamilien . . . . .	67
2.4.3	Low Power Modes . . . . .	71
2.4.4	Entwicklungsumgebung und Programmierung . . . . .	72
2.5	ARM-Prozessoren und -Mikrocontroller . . . . .	77
2.5.1	ARM-Architektur und -Typen . . . . .	78
2.5.2	Cortex-Cores . . . . .	81
2.5.3	EFM32-Gecko . . . . .	84
	Peripheral Reflex System . . . . .	87
	Advanced Energy Monitoring . . . . .	88
	Energy Aware Profiler . . . . .	92
	Betriebsarten – Energy Modes . . . . .	93
	Entwicklungsplattform . . . . .	95
<b>3</b>	<b>Single-Board-Systeme einsetzen</b>	<b>101</b>
3.1	Raspberry Pi . . . . .	102
3.1.1	Inbetriebnahme . . . . .	104
3.1.2	Netzwerkverbindung herstellen . . . . .	109
	Manuelle Konfigurierung . . . . .	110
	SSH- und FTP-Verbindungen . . . . .	112



---

3.1.3	Software und Programmierung .....	114
3.2	Beaglebone Black .....	119
3.3	mbed-Plattform .....	122
3.4	Gadgeteer .....	125
3.5	Arduino .....	126
3.5.1	Boards .....	126
3.5.2	Shields .....	130
3.5.3	Start und Entwicklungsumgebung .....	131
<b>4</b>	<b>Anwenderprogrammierbare Ein- und Ausgabeeinheiten</b>	<b>135</b>
4.1	GPIO .....	135
4.2	UART, USART und serielle Schnittstelle .....	137
4.3	I2C-Bus .....	140
4.4	Serial Peripheral Interface – SPI .....	143
4.5	A/D-Wandler .....	146
4.6	D/A-Wandler .....	150
4.7	PWM-Output .....	151
<b>5</b>	<b>Spannungsversorgungen planen und aufbauen</b>	<b>153</b>
5.1	Netzteile .....	153
5.2	Batterien .....	156
5.3	Akkumulatoren .....	159
5.3.1	Bleiakkumulator .....	159
5.3.2	Nickel-Cadmium-Akkumulator .....	160
5.3.3	Nickel-Metall-Hydrid-Akkumulator .....	161
Ladeschaltung .....	162	
5.3.4	Lithium-Ionen-Akkumulator .....	162
5.3.5	Lithium-Polymer-Akkumulator .....	164
Ladeschaltung .....	164	
5.4	Energy Harvesting .....	165
5.4.1	Solarzellen .....	169
Funktionsprinzip .....	169	
Elektrisches Verhalten .....	170	
Standard Test Conditions .....	172	
Typen .....	174	

5.4.2	Piezoelemente .....	177
	Aufbau und Typen .....	178
	Wandlerschaltung mit selbst gebautem Balkenschwinger .	179
5.4.3	Elektrodynamische Wandler .....	184
5.4.4	Thermogeneratoren .....	186
5.5	Energiespeicher und Energiemanagement .....	190
5.5.1	Kondensatoren .....	190
5.5.2	Solid State Batteries .....	194
	Thin-Film Batteries .....	194
	Ladeschaltung .....	195
	EnerChips .....	197
	EnerChips mit Power-Management-Logik .....	198
	Energy-Harvesting-Module und Energy Processor .....	200
<b>6</b>	<b>Die Funkpraxis</b> .....	<b>207</b>
6.1	ISM-Bänder .....	208
6.2	Nahfunksysteme in der Übersicht .....	210
6.3	Modulationsverfahren .....	213
6.4	WLAN .....	215
6.5	Sensorknoten im WLAN .....	217
6.5.1	Inbetriebnahme .....	219
6.5.2	Systemaufbau .....	220
6.5.3	Konfigurierung .....	221
6.5.4	Erweiterungsschaltungen .....	223
6.5.5	Sensoren am SPI .....	226
6.5.6	Steuerung mit Mikrocontroller .....	227
6.6	Bluetooth .....	229
6.6.1	Topologien und Implementierungen .....	230
6.6.2	Entwicklungssystem .....	233
6.7	Bluetooth Low Energy .....	235
6.7.1	Chips und Schaltung .....	237
6.7.2	Software und Programmierung .....	243
6.8	ZigBee .....	245
6.8.1	Topologien .....	247
6.8.2	ZigBee Green Power .....	249
6.9	ANT/ANT+ .....	250
6.10	Low-Power-Funklösungen – Low Power RF .....	251

6.10.1	Module	252
6.10.2	Transceiver	254
6.10.3	Datenrate und Reichweite	257
6.10.4	Einfache Kommunikation aufbauen	258
6.10.5	SimplicTI-Protokoll	260
6.10.6	Software	261
6.11	EnOcean-Funktechnik	263
6.11.1	Dolphin System Architecture	266
6.11.2	Starter und Programmer Kit	272
6.11.3	Entwicklung und Programmierung	277
<b>7</b>	<b>Mess- und Steuerschaltungen für den Raspberry Pi</b>	<b>291</b>
7.1	GPIO-Port	291
7.2	A/D- und D/A-Wandlerplatine für SPI	293
7.2.1	Python und grafische Oberfläche	303
7.3	Erweiterungen mit I <sup>2</sup> C-Bus-Schaltungen	315
7.3.1	Temperaturmessung	322
7.3.2	LCD-Ansteuerung	325
7.3.3	A/D- und D/A-Messung	326
7.3.4	Echtzeituhr stellen und lesen	331
<b>8</b>	<b>Solarzellentester selbst gebaut</b>	<b>339</b>
8.1	Verfahren für die Charakterisierung von Solarzellen	339
8.2	Schaltungsaufbau	342
8.2.1	Spannungsversorgung	342
8.2.2	Widerstandsmatrix und Peripherie	344
8.2.3	Relais und Treiber	347
8.2.4	Lichtsensor zur Messung der Beleuchtungsstärke	348
8.3	Programmablauf und Bedienung	350
8.4	Implementierung der Software	351
8.4.1	LCD- und Menüsteuerung	353
8.4.2	Messen der Beleuchtungsstärke	355
8.4.3	Maximum-Power-Point-Messung	360
8.4.4	Leerlaufspannung und Kurzschlussstrom messen	362
8.4.5	Ausgabe der Messergebnisse	364
	<b>Index</b>	<b>377</b>