

# Inhaltsverzeichnis

## Vorwort

<b>1 EINFÜHRUNG.....</b>	<b>15</b>
1.1 Micro Energy Harvesting.....	18
1.2 Human Power .....	20
<b>2 ENERGY HARVESTER .....</b>	<b>23</b>
2.1 Quellen und Systemaufbau .....	23
2.1.1 Elektronik und Funktechnik .....	25
2.2 Solarzellen .....	27
2.2.1 Photovoltaischer Effekt .....	27
2.2.2 Charakterisierung .....	29
2.3 Thermogeneratoren .....	29
2.3.1 Peltier-Elemente .....	30
2.3.2 Halbleiter-Thermogeneratoren .....	31
2.3.3 Micropelt TEGs und Module .....	32
2.3.4 Generelle Prinzipien .....	34
2.4 Elektrodynamische Wandler .....	34
2.4.1 Drahtlose Schalter .....	35
2.5 Piezo-Wandler.....	36
2.5.1 Piezo-Effekt.....	36
2.5.2 Piezo-Elemente und -Module .....	39
2.5.3 Piezo-Schaltungen.....	40
2.6 Energie aus HF-Strahlung .....	41
2.6.1 RF Energy Harvesting.....	42
2.6.2 Powercast-Technologie .....	43

<b>3 ENERGIESPEICHER UND KONVERTER.....</b>	<b>47</b>
3.1 Brennstoffzellen .....	47
3.2 Batterien .....	48
3.2.1 Aufbau und Funktion.....	49
3.2.2 Typen im Überblick.....	49
3.3 Akkumulatoren.....	51
3.3.1 Daten von Akkumulatoren im Überblick.....	51
3.3.2 Bleiakкумулятор .....	52
3.3.3 Nickel-Cadmium-Akkumulator.....	53
3.3.4 Nickel-Metall-Hydrid-Akkumulator.....	54
3.3.5 Lithium-Ionen-Akkumulator .....	55
3.3.6 Lithium- Polymer-Akkumulator .....	56
3.4 Ladeschaltungen und -regler .....	56
3.4.1 Laderate .....	56
3.4.2 Ladeschaltung für NiMH-Akkumulatoren.....	56
3.4.3 Integrierte Ladeschaltkreise.....	57
3.4.4 Shunt Controller LTC4071 .....	58
3.5 Kondensatoren.....	60
3.5.1 Aufbau und Funktion.....	60
Kapazität und elektrische Ladung .....	61
Ladevorgänge .....	61
3.5.2 Zusammenschalten von Kondensatoren .....	63
3.5.3 Doppelschichtkondensatoren – Super Caps.....	63
3.6 Spannungswandler und Konverterschaltungen .....	65
3.6.1 Linearregler .....	65
3.6.2 Low Drop Out-Regler.....	66
3.6.3 Ladungspumpen – Charge Pumps .....	67
3.6.4 Aufwärtswandler – Boost Converter .....	68
3.6.5 Ultra Low Boost Converter .....	70
3.6.6 Abwärtswandler – Buck Converter .....	73
3.7 Energy Harvesting Module – Energiesammler .....	74
3.7.1 EH300-Module .....	74
Funktionsbeschreibung.....	75
3.7.2 EnerChip-Module .....	77
Power Management-Logik .....	77

---

<b>4 MIKROCONTROLLER.....</b>	<b>79</b>
4.1 Einführung .....	79
4.2 Architekturen .....	82
4.2.1 Von-Neumann- und Harvard-Architektur .....	82
4.3 CISC und RISC .....	85
4.4 Adressierungsarten.....	86
4.5 Mikrocontroller-Ausstattungsmerkmale .....	87
4.5.1 A/D-Converter.....	90
Sukzessive Approximation: Wägeverfahren, Annäherungsverfahren .....	90
Flash Converter – Parallel-Wandler .....	91
Slope Wandler – Rampen-Verfahren, Ratiometrische Umsetzung .....	91
Sigma Delta – Charge Balance.....	92
4.5.2 D/A-Converter.....	94
4.5.3 PWM-Output.....	94
4.5.4 UART, USART .....	95
4.5.5 I <sup>2</sup> C-Bus .....	96
4.5.6 Serial Peripheral Interface – SPI .....	99
4.5.7 JTAG-Interface .....	101
4.5.8 Interrupt-Logik.....	101
4.5.9 DMA-Logik.....	104
4.5.10 Watchdog .....	105
4.5.11 Brown Out Detection .....	106
4.6 Microchip-Mikrocontroller .....	106
4.6.1 Architektur und Merkmale .....	108
Oszillatoren .....	110
Reset.....	112
ICSP-Interface.....	112
4.6.2 Programmspeicher.....	113
4.6.3 Konfigurationsdaten .....	115
Schreiben der Konfigurationsdaten .....	117
4.6.4 PIC-Mikrocontrollerfamilien.....	117
4.6.5 NanoWatt-Technologie .....	119
4.6.6 Entwicklungsumgebung .....	120
4.7 Atmel Mikrocontroller .....	123
4.7.1 Architektur .....	124
4.7.2 Controller-Familien im Überblick .....	126
4.7.3 Power Save-Betriebsarten .....	127
4.7.4 Entwicklungsumgebung .....	128

4.8 MSP430-Mikrocontroller .....	130
4.8.1 Architektur.....	131
4.8.2 MSP430-Controllerfamilien .....	133
4.8.3 Low Power Modes.....	136
4.8.4 Entwicklungsumgebung und Programmierung .....	137
4.9 8051-Mikrocontroller .....	140
4.9.1 Architektur.....	142
4.10 ARM-Mikrocontroller .....	145
4.10.1 ARM-Architektur und -Typen.....	145
4.10.2 Cortex-Cores.....	147
4.10.3 Cortex-M3 .....	148
4.10.4 EFM32-Gecko .....	149
Peripheral Reflex System .....	151
Advanced Energy Monitoring .....	152
Energy Aware Profiler.....	155
Betriebsarten – Energy Modes .....	156
Entwicklungsumgebung .....	157
<b>5 TRANSPONDERSYSTEME – RFID .....</b>	<b>163</b>
5.1 Induktive Energieübertragung.....	163
5.2 Near Field Communication und RFID .....	165
5.3 Transponder und Frequenzbereiche .....	165
5.4 Elektrische Grundlagen .....	167
5.5 Modulationsverfahren .....	170
5.6 Codierungen .....	171
5.7 Antikollision.....	172
5.8 Praktische Umsetzungen .....	173
5.8.1 Sensortransponder mit 125 kHz.....	174
5.8.2 Leseelektronik .....	178
5.8.3 Transponder mit 13,56 MHz .....	180

<b>6 FUNKÜBERTRAGUNG .....</b>	<b>185</b>
6.1. Funktechnologien im Überblick.....	185
6.2 Reichweiten .....	187
6.3 Zugriffsverfahren .....	187
6.4 Codierungen und Modulation .....	188
6.4.1 Frequency Hopping Spread Spectrum – FHSS .....	189
6.4.2 Direct Sequence Spread Spectrum – DSSS.....	190
6.4.3 Orthogonal Frequency Diversion Multiplex – OFDM .....	191
6.4.4 Multiple Input Multiple Output – MIMO.....	192
6.5 IEEE 802.11 .....	193
6.5.1 IEEE-802.11-Versionen .....	193
6.5.2 WLAN-Topologien .....	194
Roaming.....	195
6.5.3 Wireless Sensor Nodes.....	196
6.6 Bluetooth.....	199
6.6.1 Piconet und Scatternet.....	200
6.6.2 Standards – IEEE 802.15.1.....	201
6.6.3 Leistungsklassen und Protocol Stack .....	202
6.6.4 Profiles .....	203
6.6.5 Verbindungsaufbau und Sicherheitsmechanismen.....	205
6.6.6 Bluetooth-Anwendungen.....	205
6.6.7 Bluetooth Low Energy .....	207
6.7 ZigBee.....	208
6.7.1 IEEE 802.15.4 und ZigBee.....	209
6.7.2 Das ZigBee-Netzwerk .....	210
6.7.3 Schaltungsentwicklung.....	211
6.8 Aufbau von Sensor Nodes.....	212
6.8.1 Stromverbrauch .....	213
6.8.2 Sensoren .....	214
Temperatur und Feuchtigkeit – SHT75.....	215
Luftdruck – SCP1000.....	215
Helligkeit – ISL29003.....	216
6.8.3 Energiegewinnung und Spannungsversorgung .....	217
6.9 EnOcean-Funktechnik.....	218
6.9.1 Receiver.....	219
6.9.2 Sensor Transmitter .....	220
6.9.3 Transceiver.....	222
6.9.4 Dolphin-Architektur .....	223
Drahtlose Sensorapplikationen mit Energiemanagement.....	225

6.10 Low Power RF-Designtechniken .....	227
6.10.1 Modulationsverfahren.....	228
6.10.2 Reichweite und Datenrate.....	229
6.10.3 Transceiver CC1101 .....	230
FEC Interleaving .....	231
Whitening .....	232
Empfangssignalstärke – RSSI .....	232
Paketrahmen .....	233
Wake-On-Radio.....	233
Sende- und Empfangsvorgang.....	234
Sendevorgang bei fester Paketlänge .....	236
Empfangsvorgang bei fester Paketlänge.....	236
Einstellen des Transceivers und Empfehlungen .....	236
6.10.4 Antennen-Design.....	239
6.10.5 SimpliciTI.....	242
SimpliciTI Frame.....	242
Application Programming Interface .....	243

## **7 APPLIKATIONEN UND ANWENDUNGEN .....245**

7.1 Thermogeneratorapplikation für die Anlagenüberwachung.....	245
7.1.1 Thermogenerator .....	246
7.1.2 Wärmeleitung .....	247
Aluminiumbasis.....	248
Thermogenerator .....	249
Platine.....	249
Kühlkörper.....	250
Aluminiumblock.....	250
Betriebstemperatur und Gesamtwärmewiderstand .....	251
7.1.3 Spannungsversorgung.....	252
7.1.4 Transmittersystem .....	254
7.1.5 Sensoren .....	256
Temperatursensor – TMP102 .....	257
Beschleunigungssensor – ADXL345.....	258
7.1.6 Die Software.....	259
7.1.7 Das System im Einsatz .....	263
7.2 Vibrationsenergieversorgter Sensorknoten .....	265
7.2.1 Mechanischer Balkenschwinger .....	267
7.2.2 Aufbau des Energiewandlers .....	269
7.2.3 Spannungswandler und Energiespeicher .....	272
7.2.4 Mikrocontroller mit integriertem Transceiver .....	276
Basisstation.....	279
7.2.5 Ermittlung der gespeicherten Energie .....	279

---

7.2.6 Sensoren .....	281
Temperatur – TMP112 .....	282
Luftdruck – BMP085 .....	282
Feuchtigkeit – SHT21 .....	283
7.2.7 Software-Entwicklung.....	284
Sensorknoten .....	284
Basisstation .....	288
7.2.8 Einsatz und Energieverbrauch.....	290
7.3 Drahtloses EKG-Messsystem .....	293
7.3.1 Elektrokardiographie.....	294
7.3.2 EKG-Erfassung .....	296
Elektroden und Ableitkabel.....	296
7.3.3 Störeinflüsse .....	297
Hochfrequenzstörungen .....	298
50-Hz-Störungen .....	298
Niederfrequenzstörungen .....	299
DC-Störungen .....	299
7.3.4 EKG-Messverstärker .....	299
Vorverstärker – Differenzverstärker.....	300
Hochpassfilter .....	302
Tiefpassfilter .....	303
Nachverstärker .....	304
Bandsperre.....	305
7.3.5 Energieversorgung .....	306
7.3.6 Mikrocontroller und Software .....	310
Timer .....	311
Entwicklungsumgebung .....	312
Programmablauf.....	314
<b>ANHANG.....</b>	<b>317</b>
Gehäusetypen mit ihren Abmessungen.....	317
Der Umgang mit Dezibel .....	318
<b>Literaturverzeichnis.....</b>	<b>321</b>
<b>Stichwortverzeichnis.....</b>	<b>323</b>