

Inhaltsverzeichnis

Vorwort	5
1 Einleitung	11
Kapitel 2 bis 13 von Dr. Johannes Adam	
2 Temperatur und Wärme	13
2.1 Physikalische Grundbegriffe	13
2.2 Arten der Wärmeübertragung	14
2.3 Elektrisches und thermisches Strömungsfeld	15
3 Von Watt zu Celsius	17
3.1 Wärmeübergangskoeffizient	17
3.1.1 Newton-Kühlung	18
3.1.2 Messung	18
3.1.3 Schätzung der Baugruppentemperatur	20
3.2 Wärmewiderstand	20
3.2.1 OHM-Analogie	21
3.2.2 Wärmewiderstand von Bauteilen	21
3.2.3 Wärmewiderstand von bewegter Luft	22
4 Wärmeabgabe durch Konvektion und Strahlung	25
4.1 Konvektion	25
4.1.1 Erzwungene Konvektion	25
4.1.2 Freie Konvektion	26
4.2 Korrelationen	28
4.2.1 Reynolds-Zahl	28
4.2.2 Nußelt-Zahl	29
4.2.3 Nußelt-Korrelationen für erzwungene Konvektion	29
4.2.4 Grashof-Zahl	30
4.2.5 Nußelt-Korrelationen für laminare freie Konvektion	30
4.3 Wärmestrahlung	31
4.4 Konvektion plus Strahlung	35
5 Wärmetransport durch Wärmeleitung	39
5.1 Wärmeleitung im Stab	39
5.2 Wärmewiderstand der Wärmeleitung	40
5.3 Spezifischer Wärmewiderstand	41
5.4 Widerstandschaltungen	41
5.5 Temperaturprofil	44
5.6 Randbedingungen	45
5.7 Thermischer Einfluss des Lötstopplacks	46
6 Die Leiterplatte als Kühlkörper	49
6.1 Konvektion und Wärmeleitung im Stab	49

6.2	Die orthotrope Leiterplatte I	50
6.3	Wärmespreizung eindimensional	52
6.3.1	Lineare Platte (x) mit Bauteilriegel	52
6.3.2	Zylindersymmetrische Platte (r) mit Coin	54
6.3.3	Zweidimensionale Platte (r, z) mit isothermen Rändern	56
6.3.4	Zweidimensionale Platte (r, z) auf Kühikörper	56
6.3.5	Wärmespreizwinkel	60
7	Die Leiterplatte als komplexer Wärmeübertrager	63
7.1	Beispiele verschiedener Leiterplatten-Layouts	63
7.1.1	Arduino	63
7.1.2	RS-ChipKit MAX32	66
7.1.3	EVB-USB580x_A	68
7.2	Orthotrope Wärmeleitfähigkeit II	70
7.2.1	RSChipKitMAX32 orthotrop	71
7.2.2	EVB-USB580x_A	72
8	Verbesserung der Baugruppenkühlung	73
8.1	IMS-Leiterplatten	73
8.2	Thermovias	73
8.2.1	Beispiel 1: EVB-USB580x_A	73
8.2.2	Beispiel 2: ISL8240MEVAL4Z	74
8.2.3	Ideale Thermovias	76
8.3	Beispiel IWR6843	79
9	Wärmewiderstände von Bauteilen	81
9.1	θ -Junction-Ambient	81
9.2	Messung von θ_{JA} nach dem Standard JE5D-51	82
9.3	θ und Ψ	82
10	Strombelastbarkeit von Leiterbahnen	85
10.1	Strom, Leistung und elektrischer Widerstand	85
10.2	Die Richtlinie IPC-2221	88
10.2.1	Charts aus IPC-2221 und ihre Benutzung	89
10.2.2	Ursprung und Kritik an der IPC-2221	90
10.3	Die Richtlinie IPC-2152	92
10.4	Charts aus numerischen Simulationen	93
10.4.1	IPC-ähnliche Leiterplatten	93
10.4.2	Multilayer	93
10.4.3	Flexfolie	95
10.4.4	Keramik	95
11	Strom- und Temperatursimulation mit Layout	97
11.1	Wärmespreizung um die Leiterbahn	97
11.2	Lageneinfluss	98
11.3	Eckenströmung	99
11.4	Hochstrom Cu-Profile	100
11.5	Stromtragfähigkeit von Vias	102

12 Temperatur und Zeit	105
12.1 Aufheizkurve	105
12.2 Abkühlkurve	107
12.3 Transiente Stromheizung in analytischer Näherung	107
12.3.1 Kurzschlussstrom und Auslösezeit	108
12.3.2 Schmelzzeit nach ONDERDONK	108
12.3.3 Nicht-adiabatische transiente Stromheizung	110
12.4 Transiente Stromheizung, numerische Simulation	111
12.5 Thermische Impedanz	112
12.5.1 Transienter Wärmewiderstand	112
12.5.2 Pulsfolge und Pulsweitermodulation	114
13 Kühlhardware	117
13.1 Gehäuse	117
13.1.1 Belüfteter Schrank	117
13.1.2 Geschlossener Schrank	118
13.1.3 19"-Schränke	119
13.1.4 Baugruppe im geschlossenen Kleingehäuse	121
13.2 Kühlkörper	122
13.2.1 Freie Konvektion, analytische Zusammenhänge	123
13.2.2 Erzwungene Konvektion	127
13.3 Lüfter	129
13.3.1 Kennlinie und Arbeitspunkt	129
13.3.2 Druckverlust	130
13.3.3 Empirische Lüftergesetze	132
13.3.4 Lüfterkurzschluss	133
13.3.5 Nabentotwasser	133
13.3.6 Absaugen oder Einblasen	134
Kapitel 14 bis 21 von Wolf-Dieter Schmidt	
14 Elektronik und Wärme	137
15 Materialeigenschaften	141
15.1 Metalle und Isolationsmaterialien	141
15.2 Leiterplattenmaterial	144
16 Bauteile	151
16.1 Wärmeabfuhr aus Bauteilen	151
16.2 Halbleiter	152
16.3 Bauteildaten und Temperatureinflüsse	160
16.4 Verlustleistungsangaben	161
17 Verbindungstechnik	165
17.1 Leitklebetechnik	165
17.2 Schweißtechnik	165
17.3 Einpresstechnik	166
17.4 Löttechnik	167

18 Schäden durch Wärmeeinwirkung 171
18.1 Leiterplattenmaterial 172
18.2 Lötstellen 176
18.3 Bauteile 179

19 Praxistipps zur einfachen Baugruppenanalyse 187

20 Leiterplatte – Schaltungsträger und Wärmeleiter 189
20.1 Funktion 189
20.2 Kostenaspekte 190
20.3 Durchkontaktierungen 191
20.4 Konstruktionen 195

21 Layout und Konstruktion – Hinweise und Erfahrungen 209
21.1 Wärmeableitung 209
21.2 Konstruktionsbeispiele 220
21.3 Spezialfälle 234

Schlusswort 237

Anhänge 239
Anhang A: Wärmeübertragung in großen Höhen 239
Anhang B: FOURIER-Gleichung und Wärmewiderstand aus der Feldgleichung 239
Anhang C: Spezifischer elektrischer Widerstand bei anderer Referenztemperatur. ... 241
Anhang D: Aufheizkurve und Abkühlkurve 242
Anhang E: ONDERDONK-Gleichung 242
Anhang F: Nicht-adiabatische transiente Stromheizung 243

Literaturverzeichnis 245

Stichwortverzeichnis 255