

# Inhaltsverzeichnis

|          |                                                            |           |
|----------|------------------------------------------------------------|-----------|
| <b>1</b> | <b>Die Produktentwicklung – der Engineering Prozess</b>    | <b>1</b>  |
| 1.1      | Der Produktlebenslauf                                      | 2         |
| 1.1.1    | Phase 1: Einflussgrößen Markt, Umwelt und Unternehmen      | 4         |
| 1.1.1.1  | Einflussgröße Markt                                        | 4         |
| 1.1.1.2  | Einflussgröße Umwelt                                       | 4         |
| 1.1.1.3  | Einflussgröße Unternehmen                                  | 5         |
| 1.1.1.4  | Die Frage nach der Art der Entwicklung                     | 7         |
| 1.1.2    | Phase 2: Die Aufgabenstellung – das Pflichtenheft          | 7         |
| 1.1.3    | Phase 3: Entwicklung und Konstruktion                      | 8         |
| 1.1.4    | Phase 4: Herstellung und Test                              | 10        |
| 1.1.5    | Phase 5: Beratung und Vertrieb                             | 11        |
| 1.1.6    | Phase 6: Nutzung                                           | 12        |
| 1.1.7    | Phase 7: Allgemeine Entsorgung                             | 12        |
| 1.1.8    | Kosten und Preis                                           | 13        |
| 1.1.9    | Produktverfolgung und -überwachung                         | 14        |
| 1.1.10   | Resümee                                                    | 14        |
| 1.1.11   | Anforderungen und Ziele für einen neuen Produktzyklus      | 15        |
| 1.2      | Bestandteile elektronischer Geräte                         | 16        |
| 1.3      | Allgemeine Vorgehensweise beim Entwickeln und Konstruieren | 20        |
| 1.4      | Die drei Grundregeln des Design                            | 24        |
| 1.4.1    | Grundregel 1: Eindeutig                                    | 24        |
| 1.4.2    | Grundregel 2: Einfach                                      | 25        |
| 1.4.3    | Grundregel 3: Sicher und Zuverlässig                       | 26        |
| 1.5      | Design Guidelines                                          | 27        |
| 1.6      | Potenzielle Gegensätzlichkeiten der Design Guidelines      | 42        |
|          | Literatur                                                  | 43        |
| <b>2</b> | <b>Gerätemodell und Geräteaufbau</b>                       | <b>45</b> |
| 2.1      | Systembeschreibungen                                       | 47        |
| 2.1.1    | Technische Systeme                                         | 47        |
| 2.1.2    | Die Sicht der Systemtheorie                                | 48        |

|         |                                                                   |    |
|---------|-------------------------------------------------------------------|----|
| 2.1.3   | Das Problem komplexer Systeme . . . . .                           | 50 |
| 2.2     | Funktionelle Gerätebeschreibung . . . . .                         | 51 |
| 2.2.1   | Funktionsarten eines Systems . . . . .                            | 51 |
| 2.2.2   | Allgemeines Funktionsmodell . . . . .                             | 52 |
| 2.2.2.1 | Ein- und Ausgangsgrößen . . . . .                                 | 52 |
| 2.2.2.2 | Gerätegrundfunktionen . . . . .                                   | 54 |
| 2.2.3   | Funktionsmodell des Informationsflusses . . . . .                 | 56 |
| 2.2.4   | Systeme aus Sicht der physikalischen Realisierung . . . . .       | 57 |
| 2.2.4.1 | Funktionsorientierter Geräteaufbau . . . . .                      | 57 |
| 2.2.4.2 | Montageorientierter Geräteaufbau . . . . .                        | 58 |
| 2.3     | Konstruktiver Geräteaufbau . . . . .                              | 59 |
| 2.3.1   | Bauelemente für die inneren Stützfunktionen . . . . .             | 60 |
| 2.3.2   | Prinzipien des Geräteaufbau mit Stäben und Platten . . . . .      | 62 |
| 2.3.2.1 | Rahmenkonstruktion . . . . .                                      | 62 |
| 2.3.2.2 | Chassiskonstruktion . . . . .                                     | 63 |
| 2.3.2.3 | Schalenkonstruktion . . . . .                                     | 64 |
| 2.3.2.4 | Profil-Montage Konstruktion . . . . .                             | 64 |
| 2.3.3   | Bauelemente für die äußeren Stützfunktionen . . . . .             | 64 |
| 2.3.4   | Bauelemente für die Schutzfunktionen . . . . .                    | 65 |
| 2.4     | Bauweisen – Aufbaustrategien von Geräten . . . . .                | 66 |
| 2.4.1   | Kompaktbauweise . . . . .                                         | 66 |
| 2.4.2   | Baugruppen- und Modulbauweise . . . . .                           | 67 |
| 2.4.3   | Baukastenprinzip . . . . .                                        | 67 |
| 2.4.4   | Plattformstrategie . . . . .                                      | 68 |
| 2.4.5   | Geräteklassifikationen nach den Einsatzgebieten . . . . .         | 69 |
| 2.4.5.1 | Geräte für den Indoorbereich . . . . .                            | 69 |
| 2.4.5.2 | Geräte für den Outdoorbereich . . . . .                           | 69 |
| 2.4.5.3 | Schnittstelle zur Umgebung . . . . .                              | 69 |
| 2.5     | Das 19-Zoll-Aufbausystem . . . . .                                | 70 |
| 2.5.1   | Das 4-Ebenen-Konzept . . . . .                                    | 70 |
| 2.5.2   | Ebene 1: Komponenten . . . . .                                    | 71 |
| 2.5.3   | Ebene 2: Baugruppen . . . . .                                     | 72 |
| 2.5.4   | Ebene 3: Frontplatte, Baugruppenträger, Rückverdrahtung . . . . . | 73 |
| 2.5.5   | Ebene 4: Schränke, Gestelle, Gehäuse, Aufnahmen . . . . .         | 74 |
| 2.6     | Metrisches Aufbausystem . . . . .                                 | 76 |
| 2.7     | Geräteschutz . . . . .                                            | 77 |
| 2.7.1   | Schutzarten (Schutzgrade) nach dem IP-Code . . . . .              | 78 |
| 2.7.2   | Schutzklassen . . . . .                                           | 80 |
| 2.7.3   | Netzformen . . . . .                                              | 82 |
| 2.7.4   | Schutz gegen Netzstörungen . . . . .                              | 84 |
| 2.7.4.1 | Netzfilter . . . . .                                              | 84 |
| 2.7.4.2 | Überspannungsschutz . . . . .                                     | 85 |

|                     |                                                                              |           |
|---------------------|------------------------------------------------------------------------------|-----------|
| 2.8                 | CE-Kennzeichnung und GS-Zeichen . . . . .                                    | 89        |
| 2.8.1               | CE-Kennzeichnung . . . . .                                                   | 89        |
| 2.8.1.1             | CE-Kennzeichnungspflicht . . . . .                                           | 89        |
| 2.8.1.2             | Verantwortung für die CE-Kennzeichnung . . . . .                             | 91        |
| 2.8.1.3             | CE-Logo und die Konformitätserklärung . . . . .                              | 91        |
| 2.8.1.4             | Verfahrensablauf . . . . .                                                   | 92        |
| 2.8.2               | GS-Zeichen . . . . .                                                         | 93        |
| 2.8.2.1             | Eigenschaften und Merkmale des GS-Zeichens,<br>Prüfstellen . . . . .         | 93        |
| 2.8.2.2             | Verfahrensablauf zur Erlangung des GS-Zeichens . . . . .                     | 93        |
| 2.8.3               | Unterschiede zwischen CE-Kennzeichnung und GS-Zeichen . . . . .              | 94        |
| Literatur . . . . . |                                                                              | 94        |
| <b>3</b>            | <b>Design elektronischer Baugruppen . . . . .</b>                            | <b>97</b> |
| 3.1                 | Bestandteile der Baugruppen – Übersicht . . . . .                            | 100       |
| 3.1.1               | Bauelemente . . . . .                                                        | 100       |
| 3.1.2               | Verbindungssubstrat . . . . .                                                | 102       |
| 3.1.3               | Funktionselemente für die Elektromagnetische Verträglichkeit . . . . .       | 103       |
| 3.1.4               | Funktionselemente zur Elektronik Kühlung . . . . .                           | 104       |
| 3.1.5               | Mechanische Funktionselemente . . . . .                                      | 104       |
| 3.1.6               | Aufbau- und Verbindungstechnik (AVT) . . . . .                               | 105       |
| 3.1.7               | Baugruppenschutz . . . . .                                                   | 107       |
| 3.1.8               | Normen und Standards . . . . .                                               | 108       |
| 3.1.9               | Kosten . . . . .                                                             | 108       |
| 3.1.10              | Produktklassifikation . . . . .                                              | 109       |
| 3.2                 | Through Hole Technology – THT (Durchstecktechnik) . . . . .                  | 109       |
| 3.2.1               | Das Prinzip . . . . .                                                        | 109       |
| 3.2.2               | Through Hole Devices – THDs (Durchsteckbauelemente) . . . . .                | 110       |
| 3.2.3               | Montage von Durchsteckbauelementen (THDs) . . . . .                          | 113       |
| 3.2.4               | Mechanische Befestigung von Bauelementen . . . . .                           | 116       |
| 3.3                 | Surface Mount Technology – SMT (Oberflächenmontage) . . . . .                | 117       |
| 3.3.1               | Das Prinzip . . . . .                                                        | 117       |
| 3.3.2               | Surface Mount Devices – SMDs<br>(Oberflächenmontierte Bauelemente) . . . . . | 118       |
| 3.3.3               | Montage oberflächenmontierter Bauelemente (SMDs) . . . . .                   | 123       |
| 3.3.3.1             | SMD-Montage mit Lotpastendepots<br>und Reflowlötung . . . . .                | 123       |
| 3.3.3.2             | SMD-Montage mit Klebepunkten und Wellenlötung . . . . .                      | 128       |
| 3.3.4               | Unterschiede zwischen THT und SMT . . . . .                                  | 130       |
| 3.4                 | Einpresstechnik . . . . .                                                    | 131       |
| 3.5                 | Pin-in-Paste-Technologie (PiP-Technologie) . . . . .                         | 132       |
| 3.5.1               | Das Prinzip: Pin-in-Paste . . . . .                                          | 132       |

|         |                                                                                     |     |
|---------|-------------------------------------------------------------------------------------|-----|
| 3.5.2   | Die einzelnen Technologieanforderungen . . . . .                                    | 133 |
| 3.5.2.1 | Anforderungen an THR-Komponenten . . . . .                                          | 133 |
| 3.5.2.2 | Das Lotvolumen . . . . .                                                            | 134 |
| 3.5.3   | Das modifizierte Prinzip: Pin-in-Paste in Kombination<br>mit Lot-Preforms . . . . . | 138 |
| 3.6     | Flyover®-Konzept . . . . .                                                          | 140 |
| 3.6.1   | Prinzip und Eigenschaften . . . . .                                                 | 140 |
| 3.6.2   | Serie: Firefly™ Micro Flyover System™ . . . . .                                     | 142 |
| 3.7     | Direct Chip Attach (DCA) – Übersicht . . . . .                                      | 144 |
| 3.8     | Chip and Wire Technologien (C & W) . . . . .                                        | 146 |
| 3.8.1   | Das Prinzip . . . . .                                                               | 146 |
| 3.8.2   | Die-Bonding . . . . .                                                               | 148 |
| 3.8.2.1 | Bestimmende Eigenschaften der Die-Bonding<br>Verbindungen . . . . .                 | 148 |
| 3.8.2.2 | Lotverbindungen . . . . .                                                           | 149 |
| 3.8.2.3 | Transient Liquid Phase Bonding (TLPB) . . . . .                                     | 150 |
| 3.8.2.4 | Eutektisches Bonden . . . . .                                                       | 151 |
| 3.8.2.5 | Kleben . . . . .                                                                    | 152 |
| 3.8.2.6 | Silbersintern . . . . .                                                             | 154 |
| 3.8.2.7 | NanoWired Verbindungen . . . . .                                                    | 163 |
| 3.8.2.8 | Anglasen . . . . .                                                                  | 164 |
| 3.8.3   | Thermosonicbonden (TS-Bonden) . . . . .                                             | 164 |
| 3.8.4   | Ultraschallbonden (US-Bonden) . . . . .                                             | 167 |
| 3.8.5   | Thermokompressionsbonden (TC-Bonden) . . . . .                                      | 169 |
| 3.8.6   | SB <sup>2</sup> -WB Laser Soldered Wire Bonding . . . . .                           | 170 |
| 3.8.7   | Verkapselungen auf Board-Ebene . . . . .                                            | 171 |
| 3.8.8   | Stromtragfähigkeit von Bonddrähten . . . . .                                        | 174 |
| 3.9     | Flipchip-Technologien (FC) . . . . .                                                | 175 |
| 3.9.1   | Prinzip . . . . .                                                                   | 175 |
| 3.9.2   | Bump-Klassifizierung . . . . .                                                      | 178 |
| 3.9.3   | Die Unterbumpmetallisierung . . . . .                                               | 179 |
| 3.9.4   | Bumping-Technologien . . . . .                                                      | 180 |
| 3.9.4.1 | Aufdampfen von Hochtemperaturloten<br>C4-Technologie . . . . .                      | 180 |
| 3.9.4.2 | Elektrochemische Metallabscheidung von Loten<br>und Nichtlotwerkstoffen . . . . .   | 181 |
| 3.9.4.3 | Stromlose Metallabscheidung<br>nach dem ENIG-Verfahren . . . . .                    | 184 |
| 3.9.4.4 | Strukturierter Druck von Lotpasten . . . . .                                        | 185 |
| 3.9.4.5 | Maskenloses Lotbump-Verfahren . . . . .                                             | 186 |
| 3.9.4.6 | C4NP-Technologie (Controlled Collapse Chip<br>Connection New Process) . . . . .     | 187 |

|          |                                                                                 |     |
|----------|---------------------------------------------------------------------------------|-----|
| 3.9.4.7  | Simultaner Transfer von Preform Lotkugeln . . . . .                             | 188 |
| 3.9.4.8  | Laser Solder Ball Jetting-SB <sup>2</sup> . . . . .                             | 189 |
| 3.9.4.9  | Strukturierter Druck leitfähiger Polymere . . . . .                             | 190 |
| 3.9.4.10 | Technologien für CNT- und CNF-Bumps . . . . .                                   | 190 |
| 3.9.4.11 | CNF-Lot-Kompositbump . . . . .                                                  | 193 |
| 3.9.4.12 | Stud Bump Bonding . . . . .                                                     | 193 |
| 3.9.5    | Kontaktierung mittels Lötverfahren . . . . .                                    | 194 |
| 3.9.5.1  | Das Prinzip . . . . .                                                           | 194 |
| 3.9.5.2  | Underfilling . . . . .                                                          | 195 |
| 3.9.6    | Kontaktierung mit anisotrop leitfähigen Klebern/Filmen<br>(ACA, ACF) . . . . .  | 198 |
| 3.9.6.1  | Prinzip . . . . .                                                               | 198 |
| 3.9.6.2  | ACA-Verfahren . . . . .                                                         | 198 |
| 3.9.6.3  | Leitfähige Partikel . . . . .                                                   | 199 |
| 3.9.6.4  | Klebermatrix . . . . .                                                          | 201 |
| 3.9.7    | Kontaktierung mit isotrop leitfähigen Klebern (ICA) . . . . .                   | 201 |
| 3.9.7.1  | Prinzip . . . . .                                                               | 201 |
| 3.9.7.2  | ICA-Verfahren . . . . .                                                         | 202 |
| 3.9.7.3  | Leitfähige Partikel . . . . .                                                   | 205 |
| 3.9.8    | Kontaktierung mit nicht leitfähigen Klebern (NCA) . . . . .                     | 206 |
| 3.9.8.1  | Prinzip . . . . .                                                               | 206 |
| 3.9.8.2  | NCA-Verfahren . . . . .                                                         | 206 |
| 3.9.8.3  | Bumps und Bumpmaterialien . . . . .                                             | 207 |
| 3.9.8.4  | NCA-Materialien . . . . .                                                       | 207 |
| 3.9.9    | Kontaktierung mittels NanoWired Verbindungstechnologien . . . . .               | 208 |
| 3.10     | Tape Automated Bonding (TAB) . . . . .                                          | 209 |
| 3.11     | Embedded Component Technologies (ECT) . . . . .                                 | 211 |
| 3.11.1   | Prinzip . . . . .                                                               | 211 |
| 3.11.2   | Eingebettete Komponenten und Strukturen . . . . .                               | 212 |
| 3.11.2.1 | Diskrete elektrische Bauelemente . . . . .                                      | 212 |
| 3.11.2.2 | Elektrische Bauelemente auf Basis<br>von Schichtmaterialien . . . . .           | 213 |
| 3.11.2.3 | Nichtelektrische Komponenten . . . . .                                          | 213 |
| 3.11.2.4 | Physikalische Wirkstrukturen – Sensoren<br>und Aktoren . . . . .                | 214 |
| 3.11.3   | Herstellung von Kavitäten für die Einbettung<br>diskreter Bauelemente . . . . . | 214 |
| 3.12     | Baugruppenschutz . . . . .                                                      | 214 |
| 3.12.1   | Einflussfaktor Feuchte . . . . .                                                | 216 |
| 3.12.2   | Feuchtebedingte Ausfälle . . . . .                                              | 218 |
| 3.12.3   | Schutzlacke . . . . .                                                           | 218 |
| 3.12.3.1 | Einteilung der Lacksysteme . . . . .                                            | 219 |

|                     |                                                                                     |            |
|---------------------|-------------------------------------------------------------------------------------|------------|
|                     | 3.12.3.2 Schichtdicken . . . . .                                                    | 220        |
|                     | 3.12.3.3 Auftragsverfahren von Schutzlacken . . . . .                               | 221        |
| 3.12.4              | Vergussmassen . . . . .                                                             | 222        |
|                     | 3.12.4.1 Vergussmassen und Anwendungsprinzipien . . . . .                           | 222        |
|                     | 3.12.4.2 Vergussmassen-Materialien . . . . .                                        | 222        |
|                     | 3.12.4.3 Umspritzen von Baugruppen . . . . .                                        | 224        |
| 3.12.5              | Parylene . . . . .                                                                  | 228        |
|                     | 3.12.5.1 Parylenvarianten . . . . .                                                 | 228        |
|                     | 3.12.5.2 Beschichtungsprozesse . . . . .                                            | 229        |
|                     | 3.12.5.3 Eigenschaften . . . . .                                                    | 230        |
| 3.12.6              | Fluorpolymere . . . . .                                                             | 232        |
| Literatur . . . . . |                                                                                     | 233        |
| <b>4</b>            | <b>Verbindungssubstrate . . . . .</b>                                               | <b>239</b> |
| 4.1                 | Allgemeine Betrachtungen . . . . .                                                  | 241        |
| 4.2                 | Funktionen der Verbindungssubstrate . . . . .                                       | 241        |
| 4.3                 | Starre Leiterplatten (Rigid Printed Circuits – RPC) . . . . .                       | 245        |
|                     | 4.3.1 Ein- und zweilagige Leiterplatten . . . . .                                   | 245        |
|                     | 4.3.2 Multilayer . . . . .                                                          | 247        |
|                     | 4.3.3 HDI-Leiterplatten (High Density Interconnection) . . . . .                    | 248        |
|                     | 4.3.4 Basismaterialien für starre Leiterplatten . . . . .                           | 250        |
|                     | 4.3.4.1 Eigenschaften der Basismaterialien . . . . .                                | 250        |
|                     | 4.3.4.2 Bestandteile der Basismaterialien . . . . .                                 | 251        |
|                     | 4.3.4.3 Einteilung der Basismaterialien . . . . .                                   | 253        |
|                     | 4.3.5 Oberflächenfinish von Pads und Kontaktstellen . . . . .                       | 254        |
|                     | 4.3.6 Konstruktiv-technologische Lagenaufbauten . . . . .                           | 257        |
|                     | 4.3.7 Elektrische Lagenzuordnung und Leitertopologien . . . . .                     | 257        |
|                     | 4.3.8 Stromtragfähigkeit . . . . .                                                  | 259        |
| 4.4                 | Flexible, starrflexible und semiflexible Leiterplatten . . . . .                    | 261        |
|                     | 4.4.1 Flexible Leiterplatten . . . . .                                              | 261        |
|                     | 4.4.1.1 Anwendungen und Eigenschaften . . . . .                                     | 261        |
|                     | 4.4.1.2 Konstruktiv-technologischer Aufbau . . . . .                                | 262        |
|                     | 4.4.1.3 Materialien . . . . .                                                       | 263        |
|                     | 4.4.2 Ultradünne flexible Leiterplatten . . . . .                                   | 264        |
|                     | 4.4.3 Starrflexible Leiterplatten . . . . .                                         | 266        |
|                     | 4.4.3.1 Anwendungen und Eigenschaften . . . . .                                     | 266        |
|                     | 4.4.3.2 Systembetrachtung von Starrflex-Systemen . . . . .                          | 266        |
|                     | 4.4.3.3 Konstruktiv-technologischer Aufbau<br>von Starrflex-Leiterplatten . . . . . | 268        |
|                     | 4.4.3.4 Designregeln für Flex- und Starrflex-Leiterplatten . . . . .                | 270        |
|                     | 4.4.4 Semiflexible Leiterplatten . . . . .                                          | 271        |
|                     | 4.4.4.1 Konstruktiv-technologischer Aufbau . . . . .                                | 271        |

|     |         |                                                                                 |     |
|-----|---------|---------------------------------------------------------------------------------|-----|
|     | 4.4.4.2 | Designregeln für Semiflexible Leiterplatten . . . . .                           | 272 |
| 4.5 |         | Embedded Component Technologies (ECT) . . . . .                                 | 274 |
|     | 4.5.1   | Prinzip . . . . .                                                               | 274 |
|     | 4.5.2   | Diskrete elektrische Bauelemente . . . . .                                      | 275 |
|     |         | 4.5.2.1 Aktive Bauelemente . . . . .                                            | 275 |
|     |         | 4.5.2.2 Passive Bauelemente . . . . .                                           | 275 |
|     |         | 4.5.2.3 Montageprinzipien . . . . .                                             | 276 |
|     | 4.5.3   | Elektrische Bauelemente auf Basis von Schichtmaterialien . .                    | 280 |
|     | 4.5.4   | Nichtelektrische Komponenten . . . . .                                          | 282 |
|     | 4.5.5   | Physikalische Wirkstrukturen – Sensoren und Aktoren . . . .                     | 283 |
|     |         | 4.5.5.1 Thermopneumatische Mikromembranpumpe . . . .                            | 283 |
|     | 4.5.6   | Herstellung von Kavitäten für diskrete Bauelemente . . . . .                    | 285 |
|     | 4.5.7   | Veränderungen in der Prozesskette . . . . .                                     | 286 |
| 4.6 |         | Hochstrom- und Power-Leiterplatten . . . . .                                    | 286 |
|     | 4.6.1   | Dickkupfer-Technologie . . . . .                                                | 288 |
|     | 4.6.2   | Iceberg-Technologie . . . . .                                                   | 288 |
|     | 4.6.3   | HSMtec-Technologie . . . . .                                                    | 288 |
|     | 4.6.4   | JUMA.shape-Technologie . . . . .                                                | 292 |
|     | 4.6.5   | IMS-Leiterplatten . . . . .                                                     | 294 |
|     | 4.6.6   | Stromtragfähigkeit bei Hochstrom-Leiterplatten . . . . .                        | 297 |
| 4.7 |         | Molded Interconnect Devices . . . . .                                           | 303 |
|     | 4.7.1   | Prinzip . . . . .                                                               | 303 |
|     | 4.7.2   | Laserdirektstrukturierung (LDS) . . . . .                                       | 305 |
|     | 4.7.3   | Aerosol-Jet-Verfahren . . . . .                                                 | 309 |
|     |         | 4.7.3.1 Prinzip und Materialien . . . . .                                       | 309 |
|     |         | 4.7.3.2 Pneumatische Aerosol-Erzeugung . . . . .                                | 309 |
|     |         | 4.7.3.3 Ultrasonic Aerosol-Erzeugung . . . . .                                  | 310 |
|     |         | 4.7.3.4 Aerosol-on-Demand (AoD) Jet-Druckkopf . . . . .                         | 310 |
|     |         | 4.7.3.5 Druckprozess . . . . .                                                  | 311 |
|     |         | 4.7.3.6 Nachbehandlungen und Strukturgrößen . . . . .                           | 311 |
|     | 4.7.4   | Heißprägeverfahren . . . . .                                                    | 312 |
|     | 4.7.5   | 2K-MID-Technologie . . . . .                                                    | 312 |
| 4.8 |         | Elektro-optische Leiterplatten . . . . .                                        | 313 |
|     | 4.8.1   | Prinzip . . . . .                                                               | 313 |
|     | 4.8.2   | Inlaytechnologie und Koppelkonzepte . . . . .                                   | 315 |
|     | 4.8.3   | Integrierte Lichtwellenleiter auf Basis von Polymeren . . . . .                 | 316 |
|     | 4.8.4   | Integrierte Lichtwellenleiter auf Basis<br>von modifiziertem Dünnglas . . . . . | 317 |
| 4.9 |         | CAD-Leiterplatten- und Baugruppentwurf . . . . .                                | 319 |
|     | 4.9.1   | Herausforderungen . . . . .                                                     | 319 |
|     | 4.9.2   | Logischer Entwurf . . . . .                                                     | 322 |
|     | 4.9.3   | Physikalischer Entwurf . . . . .                                                | 323 |

|          |                                                                            |            |
|----------|----------------------------------------------------------------------------|------------|
| 4.9.3.1  | Partitionierung . . . . .                                                  | 323        |
| 4.9.3.2  | Bauteil-Platzierung . . . . .                                              | 323        |
| 4.9.3.3  | Routing . . . . .                                                          | 328        |
| 4.9.4    | Postprocessing . . . . .                                                   | 330        |
|          | Literatur . . . . .                                                        | 332        |
| <b>5</b> | <b>Verbindungstechnik . . . . .</b>                                        | <b>335</b> |
| 5.1      | Einführung . . . . .                                                       | 337        |
| 5.2      | Kabel und Leitungen . . . . .                                              | 340        |
| 5.2.1    | Begriffe und Funktionen . . . . .                                          | 340        |
| 5.2.2    | Aufbau von Kabeln . . . . .                                                | 341        |
| 5.2.2.1  | Adern von Kabeln und Leitungen . . . . .                                   | 341        |
| 5.2.2.2  | Komponenten von Kabeln und Leitungen . . . . .                             | 341        |
| 5.2.3    | Elektrische Leiter . . . . .                                               | 342        |
| 5.2.3.1  | Werkstoffe von Leitern . . . . .                                           | 342        |
| 5.2.3.2  | Bauformen von Einzelleitern . . . . .                                      | 343        |
| 5.2.3.3  | Drahtdurchmesser und Drahtquerschnitte . . . . .                           | 348        |
| 5.2.3.4  | Leiterklassen . . . . .                                                    | 349        |
| 5.2.4    | Elektrische Isolierstoffe . . . . .                                        | 350        |
| 5.2.5    | Klassifizierung von Kabeln und Leitungen nach Bauformen . . . . .          | 351        |
| 5.2.5.1  | Flachbandkabel . . . . .                                                   | 352        |
| 5.2.5.2  | Koaxialkabel . . . . .                                                     | 352        |
| 5.2.5.3  | Rundkabel . . . . .                                                        | 353        |
| 5.2.5.4  | Twisted-Pair-Kabel . . . . .                                               | 353        |
| 5.2.6    | Kabelkennzeichnung . . . . .                                               | 355        |
| 5.2.6.1  | Farbkennzeichnung der Adern in Kabeln<br>und Leitungen . . . . .           | 355        |
| 5.2.6.2  | Kabelkennzeichnungen mit Typkurzzeichen . . . . .                          | 356        |
| 5.2.7    | Beanspruchungen von Kabeln und Leitungen . . . . .                         | 360        |
| 5.2.8    | Strombelastbarkeit . . . . .                                               | 365        |
| 5.2.9    | Lichtwellenleiter . . . . .                                                | 370        |
| 5.2.9.1  | Lichtausbreitung in Stufenindex-Fasern infolge<br>Totalreflexion . . . . . | 370        |
| 5.2.9.2  | Lichtausbreitung in Gradientenindexfasern . . . . .                        | 371        |
| 5.2.9.3  | Moden und LWL-Fasertypen . . . . .                                         | 372        |
| 5.2.9.4  | Dämpfung in Lichtwellenleitern . . . . .                                   | 373        |
| 5.2.9.5  | Dispersionen in Lichtwellenleitern . . . . .                               | 374        |
| 5.2.9.6  | Kategorien und Normen von Lichtwellenleitern . . . . .                     | 376        |
| 5.2.9.7  | Kennzeichnung von Lichtwellenleitern<br>mit Typkurzzeichen . . . . .       | 377        |
| 5.3      | Verdrahtungstechnologie . . . . .                                          | 380        |
| 5.3.1    | Frei- oder Zweckverdrahtung . . . . .                                      | 381        |

|         |                                                                     |     |
|---------|---------------------------------------------------------------------|-----|
| 5.3.2   | Bündelverdrahtung . . . . .                                         | 382 |
| 5.3.3   | Kabelbäume (Formkabel) . . . . .                                    | 384 |
| 5.3.4   | Einzelleitungen . . . . .                                           | 385 |
| 5.3.5   | Kanalverdrahtung . . . . .                                          | 386 |
| 5.3.6   | Flachbandkabel . . . . .                                            | 386 |
| 5.3.7   | Sammelschienen . . . . .                                            | 388 |
| 5.4     | Kontaktiertechnologien für elektrische Kontakte . . . . .           | 391 |
| 5.4.1   | Einführung und Klassifikationen . . . . .                           | 391 |
| 5.4.1.1 | Schlussart . . . . .                                                | 391 |
| 5.4.1.2 | Lösbarkeit . . . . .                                                | 392 |
| 5.4.1.3 | Verwendung von Zusatzelementen<br>oder Zusatzstoffen . . . . .      | 393 |
| 5.4.1.4 | Löt- und lötfreie Verbindungen . . . . .                            | 393 |
| 5.4.2   | Lötverbindungen . . . . .                                           | 393 |
| 5.4.2.1 | Entfernen von störenden Oberflächenschichten . . . . .              | 394 |
| 5.4.2.2 | Oberflächenbenetzung . . . . .                                      | 394 |
| 5.4.2.3 | Diffusion und Legierungsbildung . . . . .                           | 395 |
| 5.4.2.4 | Lote – Das Phasendiagramm . . . . .                                 | 396 |
| 5.4.2.5 | Lote . . . . .                                                      | 396 |
| 5.4.2.6 | Lotpasten . . . . .                                                 | 398 |
| 5.4.2.7 | Flussmittel . . . . .                                               | 398 |
| 5.4.2.8 | Lötverfahren . . . . .                                              | 399 |
| 5.4.2.9 | Lötstellen und Lötfehler . . . . .                                  | 403 |
| 5.4.3   | Wickelverbindung (Wire-Wrap-Verbindung) . . . . .                   | 405 |
| 5.4.3.1 | Prinzip . . . . .                                                   | 405 |
| 5.4.3.2 | Wickelstifte und Wickeldrähte . . . . .                             | 406 |
| 5.4.3.3 | Designregeln . . . . .                                              | 406 |
| 5.4.4   | Einpresstechnik . . . . .                                           | 408 |
| 5.4.4.1 | Prozesse des Einpressens . . . . .                                  | 409 |
| 5.4.4.2 | Einpressstifte und Designparameter . . . . .                        | 409 |
| 5.4.4.3 | Flexible Einpresstechnik: Der BIZON-Kontakt<br>(Beispiel) . . . . . | 411 |
| 5.4.4.4 | Massive Einpresstechnik: REDCUBE PRESS-FIT<br>(Beispiel) . . . . .  | 412 |
| 5.4.4.5 | Layoutrichtlinien für das Baugruppendesign . . . . .                | 414 |
| 5.4.5   | Schneidklemmverbindung . . . . .                                    | 416 |
| 5.4.5.1 | Prinzip . . . . .                                                   | 416 |
| 5.4.5.2 | ID-Klemmen . . . . .                                                | 418 |
| 5.4.5.3 | Leiter . . . . .                                                    | 418 |
| 5.4.5.4 | Ausfallmechanismen . . . . .                                        | 420 |
| 5.4.6   | Crimpverbindung . . . . .                                           | 420 |
| 5.4.6.1 | Prinzip . . . . .                                                   | 420 |

|          |                                                                      |            |
|----------|----------------------------------------------------------------------|------------|
| 5.4.6.2  | Leiter . . . . .                                                     | 421        |
| 5.4.6.3  | Crimpschlüsselemente . . . . .                                       | 421        |
| 5.4.6.4  | Crimpkraft und Verformung . . . . .                                  | 424        |
| 5.4.6.5  | Fehlerursachen . . . . .                                             | 425        |
| 5.4.7    | Federklemmverbindung . . . . .                                       | 426        |
| 5.4.7.1  | Prinzip . . . . .                                                    | 426        |
| 5.4.7.2  | Design der Federn . . . . .                                          | 427        |
| 5.4.7.3  | Modul Federklemmverbindung . . . . .                                 | 427        |
| 5.4.7.4  | Kontaktkraft . . . . .                                               | 429        |
| 5.4.7.5  | Ausfallverhalten . . . . .                                           | 430        |
| 5.4.8    | Schraubverbindung, Schraubanschlusstechnik . . . . .                 | 431        |
| 5.4.8.1  | Prinzip . . . . .                                                    | 431        |
| 5.4.8.2  | Standardschraubverbindungen . . . . .                                | 432        |
| 5.4.8.3  | Schraubverbindungen mit Axialschrauben . . . . .                     | 434        |
| 5.4.9    | Durchdringverbindung – Piercing . . . . .                            | 435        |
| 5.4.9.1  | Prinzip . . . . .                                                    | 435        |
| 5.4.9.2  | Leiter . . . . .                                                     | 436        |
| 5.4.9.3  | Durchdringelemente . . . . .                                         | 436        |
| 5.4.9.4  | Piercing-Verbindung mit axialen Kontaktstiften . . . . .             | 436        |
| 5.4.10   | Klammerverbindung . . . . .                                          | 437        |
| 5.4.10.1 | Prinzip . . . . .                                                    | 437        |
| 5.4.10.2 | Leiter . . . . .                                                     | 437        |
| 5.4.10.3 | Stifte . . . . .                                                     | 438        |
| 5.4.10.4 | Klammern und Klammerverbindung . . . . .                             | 438        |
| 5.4.11   | NanoWired Verbindungstechnologien . . . . .                          | 439        |
| 5.4.11.1 | Prinzip . . . . .                                                    | 439        |
| 5.4.11.2 | NanoWiring . . . . .                                                 | 440        |
| 5.4.11.3 | KlettWelding . . . . .                                               | 441        |
| 5.4.11.4 | KlettWelding-Tape . . . . .                                          | 443        |
| 5.4.11.5 | KlettSintering . . . . .                                             | 443        |
| 5.4.11.6 | KlettGlueing . . . . .                                               | 445        |
| 5.4.11.7 | Klett-Extensions . . . . .                                           | 446        |
| 5.4.11.8 | Zusammenfassung: Prozessparameter,<br>Anwendungen, Fazit . . . . .   | 447        |
| 5.4.12   | Kontaktiertechnologien: Bonden, Kleben, Sintern . . . . .            | 448        |
|          | Literatur . . . . .                                                  | 448        |
| <b>6</b> | <b>Gerätedesign und Elektromagnetische Verträglichkeit . . . . .</b> | <b>453</b> |
| 6.1      | Einführung . . . . .                                                 | 455        |
| 6.2      | Störquellen . . . . .                                                | 456        |
| 6.3      | Kopplungsmechanismen . . . . .                                       | 459        |
| 6.3.1    | Kopplungswiderstand . . . . .                                        | 459        |

|         |                                                                                              |     |
|---------|----------------------------------------------------------------------------------------------|-----|
| 6.3.2   | Signalverteilungen . . . . .                                                                 | 460 |
| 6.3.3   | Systematik der Kopplungsarten . . . . .                                                      | 463 |
| 6.3.4   | Galvanische Kopplung (Impedanzkopplung) . . . . .                                            | 463 |
| 6.3.4.1 | Wirkprinzip . . . . .                                                                        | 463 |
| 6.3.4.2 | Gleichstromwiderstand . . . . .                                                              | 464 |
| 6.3.4.3 | Skineffekt . . . . .                                                                         | 465 |
| 6.3.4.4 | Leitungsinduktivität . . . . .                                                               | 467 |
| 6.3.4.5 | Leiteranordnungen und ihre Induktivitäten . . . . .                                          | 468 |
| 6.3.4.6 | Leitungsführung des Bezugsleiters zur Reduktion<br>der galvanischen Koppelimpedanz . . . . . | 472 |
| 6.3.5   | Kapazitive Kopplung . . . . .                                                                | 474 |
| 6.3.5.1 | Wirkprinzip . . . . .                                                                        | 474 |
| 6.3.5.2 | Leiteranordnungen und ihre Kapazitäten . . . . .                                             | 475 |
| 6.3.5.3 | Dreileiteranordnung . . . . .                                                                | 476 |
| 6.3.5.4 | Schirmwirkung bei kapazitiver Kopplung . . . . .                                             | 478 |
| 6.3.5.5 | Maßnahmen zur Reduzierung der kapazitiven<br>Kopplungen . . . . .                            | 480 |
| 6.3.6   | Induktive Kopplung . . . . .                                                                 | 480 |
| 6.3.6.1 | Wirkprinzip . . . . .                                                                        | 480 |
| 6.3.6.2 | Magnetisches Feld und magnetischer Fluss . . . . .                                           | 481 |
| 6.3.6.3 | Gegeninduktivität von zwei Doppelleitungen . . . . .                                         | 482 |
| 6.3.6.4 | Störspannung einer Doppelleitung in einer<br>Leiterschleife . . . . .                        | 483 |
| 6.3.6.5 | Schirmung zur Verringerung der magnetischen<br>Störeinkopplung . . . . .                     | 484 |
| 6.3.6.6 | Schirmung zur Verringerung der magnetischen<br>Abstrahlung . . . . .                         | 485 |
| 6.3.6.7 | Maßnahmen zur Reduzierung der induktiven<br>Kopplungen . . . . .                             | 486 |
| 6.3.7   | Wellenleiterkopplung . . . . .                                                               | 487 |
| 6.3.7.1 | Wirkprinzip . . . . .                                                                        | 487 |
| 6.3.7.2 | Impedanz . . . . .                                                                           | 488 |
| 6.3.7.3 | Impedanzen typischer Anordnungen . . . . .                                                   | 489 |
| 6.3.7.4 | Reflexionsfaktor . . . . .                                                                   | 490 |
| 6.3.7.5 | Störüberkopplung . . . . .                                                                   | 491 |
| 6.3.7.6 | Maßnahmen zur Reduzierung<br>der Wellenleiterkopplung . . . . .                              | 492 |
| 6.3.8   | Strahlungskopplung . . . . .                                                                 | 493 |
| 6.3.8.1 | Wirkprinzip . . . . .                                                                        | 493 |
| 6.3.8.2 | Feldwellenwiderstand . . . . .                                                               | 493 |
| 6.3.8.3 | Strahlungswiderstand und Strahlungsleistung . . . . .                                        | 495 |
| 6.3.8.4 | Leiterschleifen-Rahmenantennen . . . . .                                                     | 495 |

|     |         |                                                                              |     |
|-----|---------|------------------------------------------------------------------------------|-----|
|     | 6.3.8.5 | Leitungen-Stabantennen . . . . .                                             | 497 |
|     | 6.3.8.6 | Emissionsgrenzwerte für hochfrequente<br>elektromagnetische Felder . . . . . | 498 |
|     | 6.3.8.7 | Maßnahmen zur Reduzierung<br>der Strahlungskopplungen . . . . .              | 498 |
| 6.4 |         | Referenz- und Massesysteme (Grounding) . . . . .                             | 499 |
|     | 6.4.1   | Überblick und Definitionen . . . . .                                         | 499 |
|     | 6.4.2   | Erdung aus Sicherheitsgründen . . . . .                                      | 500 |
|     | 6.4.3   | Masse- und Referenzsysteme für Signale (Signal Grounds) . . . . .            | 500 |
|     | 6.4.3.1 | Single-Point Massesysteme . . . . .                                          | 501 |
|     | 6.4.3.2 | Multi-Point Massesysteme . . . . .                                           | 503 |
|     | 6.4.3.3 | Hybridmassen . . . . .                                                       | 504 |
|     | 6.4.4   | Impedanz der Massefläche . . . . .                                           | 505 |
|     | 6.4.5   | Gehäuse- und Systemmassen . . . . .                                          | 506 |
|     | 6.4.6   | Masseschleifen und deren Verhinderung . . . . .                              | 508 |
| 6.5 |         | Schirmung von elektromagnetischen Feldern . . . . .                          | 512 |
|     | 6.5.1   | Frequenzspektrum, Schirmfaktor, Schirmdämpfung und Pegel . . . . .           | 513 |
|     | 6.5.2   | Schirmung von Gleichfeldern . . . . .                                        | 515 |
|     | 6.5.2.1 | Elektrostatische Felder . . . . .                                            | 515 |
|     | 6.5.2.2 | Magnetostatische Felder . . . . .                                            | 516 |
|     | 6.5.3   | Schirmung niederfrequenter Wechselfelder . . . . .                           | 518 |
|     | 6.5.4   | Schirmung elektromagnetischer Wellen . . . . .                               | 520 |
|     | 6.5.4.1 | Impedanzkonzept . . . . .                                                    | 520 |
|     | 6.5.4.2 | Reflexionsdämpfung . . . . .                                                 | 521 |
|     | 6.5.4.3 | Absorptionsdämpfung . . . . .                                                | 523 |
|     | 6.5.4.4 | Korrektur für multiple Reflexionen . . . . .                                 | 524 |
|     | 6.5.4.5 | Erweitertes Impedanzkonzept . . . . .                                        | 524 |
|     | 6.5.4.6 | Die Erdung und Potenzialausgleich von Schirmen . . . . .                     | 525 |
|     | 6.5.5   | Öffnungen in Schirmen . . . . .                                              | 525 |
|     | 6.5.5.1 | Einfluss der Öffnungen . . . . .                                             | 525 |
|     | 6.5.5.2 | Induzierte Schirmströme . . . . .                                            | 526 |
|     | 6.5.5.3 | Einzelne Öffnungen . . . . .                                                 | 526 |
|     | 6.5.5.4 | Unterteilung von Öffnungen . . . . .                                         | 527 |
|     | 6.5.5.5 | Tiefe Öffnungen – dicke Schirme und Kamine . . . . .                         | 528 |
|     | 6.5.5.6 | Multiple Öffnungen . . . . .                                                 | 530 |
|     | 6.5.6   | EMV-Dichtungen und Verbindungsstellen . . . . .                              | 532 |
|     | 6.5.6.1 | Aufgaben und Anforderungen . . . . .                                         | 532 |
|     | 6.5.6.2 | Dichtungstypen und Dichtungswerkstoffe . . . . .                             | 533 |
|     | 6.5.6.3 | Verbindungsstellen . . . . .                                                 | 538 |
|     | 6.5.6.4 | Korrosionsbeständigkeit . . . . .                                            | 542 |
| 6.6 |         | Geschirmte Kabel und Leitungen . . . . .                                     | 544 |
|     | 6.6.1   | Grundlegende Betrachtungen . . . . .                                         | 544 |

|          |                                                                               |            |
|----------|-------------------------------------------------------------------------------|------------|
| 6.6.2    | Experimentaldaten von Schirmvarianten . . . . .                               | 546        |
| 6.6.3    | Leitungsschirmung bei niedrigen Frequenzen . . . . .                          | 548        |
| 6.6.4    | Leitungsschirmung bei höheren Frequenzen . . . . .                            | 550        |
| 6.6.5    | Leitungsschirmung bei niedrigen und hohen Frequenzen<br>(Breitband) . . . . . | 552        |
| 6.6.6    | Kabelschirmung . . . . .                                                      | 553        |
| 6.6.7    | Schirmanbindungen . . . . .                                                   | 557        |
| 6.6.8    | Schirmung von Leiterzügen auf Verbindungssubstraten . . . . .                 | 558        |
| 6.7      | EMV-gerechter Baugruppentwurf . . . . .                                       | 560        |
| 6.7.1    | Partitionierung von Funktionseinheiten . . . . .                              | 560        |
| 6.7.2    | Bauelemente . . . . .                                                         | 561        |
| 6.7.3    | Leitungsnetze . . . . .                                                       | 562        |
| 6.7.4    | Versorgungsnetze . . . . .                                                    | 563        |
| 6.7.5    | Signalnetze . . . . .                                                         | 565        |
| 6.7.6    | Entkopplungskondensatoren und Pufferkondensatoren . . . . .                   | 576        |
|          | Literatur . . . . .                                                           | 583        |
| <b>7</b> | <b>Thermisches Design . . . . .</b>                                           | <b>587</b> |
| 7.1      | Einführung . . . . .                                                          | 588        |
| 7.2      | Energiebilanz . . . . .                                                       | 590        |
| 7.3      | Wärmeleitung . . . . .                                                        | 592        |
| 7.3.1    | Wärmeleitwiderstand $R_l$ . . . . .                                           | 595        |
| 7.3.2    | Wärmekapazität $C_{th}$ . . . . .                                             | 598        |
| 7.3.3    | Transienter Wärmewiderstand $Z_{th}$ und Zeitkonstante $\tau_{th}$ . . . . .  | 599        |
| 7.3.4    | Thermischer Kontaktwiderstand $R_{tk}$ . . . . .                              | 600        |
| 7.3.5    | Thermischer Aufspreizwiderstand $R_{sp}$ . . . . .                            | 602        |
| 7.4      | Konvektiver Wärmeübergang . . . . .                                           | 604        |
| 7.4.1    | Konvektiver Wärmewiderstand $R_k$ . . . . .                                   | 604        |
| 7.4.2    | Einteilungen der Strömungen . . . . .                                         | 607        |
| 7.4.3    | Anordnungen bei erzwungener Konvektion . . . . .                              | 608        |
| 7.4.4    | Anordnungen bei freier Konvektion . . . . .                                   | 611        |
| 7.4.5    | Überlagerung von erzwungener und freier Konvektion . . . . .                  | 613        |
| 7.5      | Wärmestrahlung . . . . .                                                      | 614        |
| 7.5.1    | Strahlungsaustausch und Wärmewiderstand der Strahlung $R_s$ . . . . .         | 616        |
| 7.5.2    | Praktische Fälle . . . . .                                                    | 617        |
| 7.6      | Thermisch-elektrische Analogien und Netzwerkberechnungen . . . . .            | 619        |
| 7.6.1    | Hauptgruppen thermischer Prozesse . . . . .                                   | 619        |
| 7.6.2    | Netzwerkanalysemethoden . . . . .                                             | 621        |
| 7.7      | Bauelemente der Wärmeableitung . . . . .                                      | 622        |
| 7.7.1    | Kühlkörper . . . . .                                                          | 622        |
| 7.7.2    | Thermische Interface Materialien (TIM) . . . . .                              | 627        |
| 7.7.2.1  | Wärmeleitpasten (Thermal Grease) . . . . .                                    | 628        |

|       |         |                                                                      |     |
|-------|---------|----------------------------------------------------------------------|-----|
|       | 7.7.2.2 | Wärmeleitfolien (Wärmeleitpads, Thermal Tapes) .                     | 628 |
|       | 7.7.2.3 | Thermal Gap Filler . . . . .                                         | 628 |
|       | 7.7.2.4 | Phase Change Material (PCM,<br>Phasenwechselmaterialien) . . . . .   | 629 |
|       | 7.7.2.5 | Polymer Solder Hybrids . . . . .                                     | 629 |
|       | 7.7.2.6 | Isolierscheiben aus Glimmer, Polyimid<br>und Aluminiumoxid . . . . . | 630 |
|       | 7.7.2.7 | Graphitfolien . . . . .                                              | 630 |
| 7.7.3 |         | Aktive Baugruppen – Lüfter . . . . .                                 | 632 |
|       | 7.7.3.1 | Lüfteranordnungen . . . . .                                          | 632 |
|       | 7.7.3.2 | Lüftertypen . . . . .                                                | 632 |
|       | 7.7.3.3 | Lüfterauswahl . . . . .                                              | 634 |
|       | 7.7.3.4 | Analogiebetrachtung . . . . .                                        | 635 |
|       | 7.7.3.5 | Schutzgitter und Luftfilter . . . . .                                | 636 |
| 7.7.4 |         | Heatpipes – Bauelemente zur Wärmeleitung . . . . .                   | 637 |
|       | 7.7.4.1 | Prinzip der Heatpipe . . . . .                                       | 637 |
|       | 7.7.4.2 | Kapillarstruktur der Heatpipes . . . . .                             | 639 |
|       | 7.7.4.3 | Grenzen des Wärmetransfers in der Heatpipe . . . .                   | 640 |
|       | 7.7.4.4 | Montage von Heatpipes . . . . .                                      | 641 |
|       | 7.7.4.5 | Spezialisierte Ausführungsformen von Heatpipes .                     | 642 |
| 7.7.5 |         | Peltier-Elemente . . . . .                                           | 644 |
| 7.7.6 |         | Wärmeübertrager . . . . .                                            | 651 |
| 7.8   |         | Wärmeabfuhr von Bauelementen . . . . .                               | 654 |
|       | 7.8.1   | Faktoren für die Wärmeabfuhr von Bauelementen . . . . .              | 654 |
|       | 7.8.2   | Modellbildung und Simulation . . . . .                               | 656 |
| 7.9   |         | Wärmeabfuhr von Geräten . . . . .                                    | 661 |
|       | 7.9.1   | Allseitig geschlossene Geräte . . . . .                              | 661 |
|       | 7.9.2   | Offene Geräte mit Eigenkonvektion . . . . .                          | 666 |
|       | 7.9.3   | Offene Geräte mit Fremdkonvektion . . . . .                          | 668 |
|       |         | 7.9.3.1 Strömungsgeschwindigkeit und Volumenstrom . . .              | 668 |
|       |         | 7.9.3.2 Auswahl eines Lüfters bzw. von Lüftergruppen . . .           | 670 |
|       |         | 7.9.3.3 Angepasste Kühlung . . . . .                                 | 672 |
|       |         | Literatur . . . . .                                                  | 673 |
| 8     |         | <b>Zuverlässigkeit</b> . . . . .                                     | 675 |
|       | 8.1     | Einführung . . . . .                                                 | 676 |
|       | 8.2     | Kenngrößen der Zuverlässigkeit . . . . .                             | 677 |
|       |         | 8.2.1 Kenngrößen von Stichproben . . . . .                           | 677 |
|       |         | 8.2.2 Ausfallwahrscheinlichkeit (Verteilungsfunktion) $F(t)$ . . . . | 678 |
|       |         | 8.2.3 Überlebenswahrscheinlichkeit (Zuverlässigkeit) $R(t)$ . . . .  | 679 |
|       |         | 8.2.4 Ausfallwahrscheinlichkeitsdichte (Dichtefunktion) $f(t)$ . . . | 679 |
|       |         | 8.2.5 Ausfallrate $\lambda(t)$ . . . . .                             | 680 |

|          |                                                                       |     |
|----------|-----------------------------------------------------------------------|-----|
| 8.2.6    | Der Erwartungswert $E(T)$ . . . . .                                   | 682 |
| 8.2.7    | Die Kennwerte MTTF, MTBF, MTTFE, MTTR und A . . . .                   | 682 |
| 8.3      | Lebensdauerverteilungen . . . . .                                     | 685 |
| 8.3.1    | Die typischen Lebensdauerverteilungen . . . . .                       | 685 |
| 8.3.2    | Die Weibull-Verteilung . . . . .                                      | 686 |
| 8.3.3    | Die Exponentialverteilung . . . . .                                   | 688 |
| 8.3.4    | Die Normalverteilung . . . . .                                        | 691 |
| 8.3.5    | Die Logarithmische Normalverteilung . . . . .                         | 694 |
| 8.4      | Beanspruchungsfaktoren von Bauelementen . . . . .                     | 698 |
| 8.4.1    | Beanspruchungsmodelle nach IEC 61709 . . . . .                        | 699 |
| 8.4.2    | Military Handbook – MIL-HDBK-217F . . . . .                           | 701 |
| 8.4.3    | Siemens-Norm SN29500 . . . . .                                        | 702 |
| 8.5      | Derating Lastminderung . . . . .                                      | 708 |
| 8.6      | Systemstrukturen und Zuverlässigkeit . . . . .                        | 710 |
| 8.6.1    | Reihensysteme . . . . .                                               | 711 |
| 8.6.2    | Parallelsysteme . . . . .                                             | 713 |
| 8.6.3    | Redundanzen . . . . .                                                 | 716 |
| 8.6.4    | Gemischte Systeme . . . . .                                           | 720 |
| 8.7      | Ausfallverhalten . . . . .                                            | 722 |
| 8.7.1    | Beeinträchtigung bei Funktionsausfällen . . . . .                     | 722 |
| 8.7.2    | Änderungsgeschwindigkeit von Merkmalen<br>und Eigenschaften . . . . . | 723 |
| 8.7.3    | Ausfallquellen . . . . .                                              | 723 |
| 8.7.4    | Ausfallfolgen . . . . .                                               | 726 |
| 8.7.5    | Ausfallarten: Zufällige und systematische Ausfälle . . . . .          | 726 |
| 8.8      | Physikalische und chemische Ausfallmechanismen . . . . .              | 727 |
| 8.8.1    | Die Arrhenius Temperaturabhängigkeit . . . . .                        | 727 |
| 8.8.2    | Korrosion . . . . .                                                   | 730 |
| 8.8.3    | Plastische Verformung . . . . .                                       | 731 |
| 8.8.4    | Kriechen . . . . .                                                    | 732 |
| 8.8.5    | Materialermüdung durch Biege- und Torsionsspannungen . .              | 733 |
| 8.8.6    | Vibration und Schock . . . . .                                        | 734 |
| 8.8.6.1  | Vibration . . . . .                                                   | 734 |
| 8.8.6.2  | Schock . . . . .                                                      | 737 |
| 8.8.7    | Scherbeanspruchung . . . . .                                          | 738 |
| 8.8.8    | Diffusion . . . . .                                                   | 739 |
| 8.8.9    | Elektromigration . . . . .                                            | 740 |
| 8.8.10   | Schädigung von Dielektrika . . . . .                                  | 743 |
| 8.8.11   | Drift . . . . .                                                       | 743 |
| 8.8.12   | Ausfälle durch Feuchtigkeit . . . . .                                 | 744 |
| 8.8.13   | Elektrostatische Entladung . . . . .                                  | 745 |
| 8.8.13.1 | Ursachen und Ausfälle . . . . .                                       | 745 |

---

|                             |                                                              |            |
|-----------------------------|--------------------------------------------------------------|------------|
| 8.8.13.2                    | ESD-Schutz durch gerätetechnische Maßnahmen .                | 746        |
| 8.8.13.3                    | ESD-Schutz durch Handhabung, Nutzung<br>und Umwelt . . . . . | 748        |
| 8.8.14                      | Langzeitlagerfähigkeit . . . . .                             | 750        |
| Literatur                   | . . . . .                                                    | 751        |
| <b>Anhang</b>               | . . . . .                                                    | <b>753</b> |
| <b>Stichwortverzeichnis</b> | . . . . .                                                    | <b>763</b> |