

---

# Inhaltsverzeichnis

|  |           |
|--|-----------|
| <b>Liste der verwendeten Symbole .....</b>             | <b>1</b>  |
| <b>1 Grundlagen der Halbleiterphysik .....</b>         | <b>7</b>  |
| 1.1 Grundlegende Begriffe.....                         | 7         |
| 1.1.1 Das Bändermodell .....                           | 7         |
| 1.1.2 Silizium als Halbleiter .....                    | 9         |
| 1.1.3 Das thermodynamische Gleichgewicht .....         | 11        |
| 1.1.4 Dotierte Halbleiter .....                        | 13        |
| 1.2 Grundgleichungen der Halbleiterphysik .....        | 18        |
| 1.2.1 Berechnung der Ladungsträgerdichten .....        | 18        |
| 1.2.2 Bestimmung der Lage des Ferminiveaus .....       | 25        |
| 1.3 Ladungsträgertransport, Strom .....                | 28        |
| 1.3.1 Elektronen- und Löcherstrom .....                | 28        |
| 1.3.2 Driftstrom .....                                 | 28        |
| 1.3.3 Diffusionsstrom .....                            | 30        |
| 1.3.4 Bänderdiagramm bei Stromfluss .....              | 31        |
| 1.4 Ausgleichsvorgänge im Halbleiter .....             | 33        |
| 1.4.1 Starke und schwache Injektion .....              | 33        |
| 1.4.2 Die Kontinuitätsgleichung .....                  | 35        |
| 1.4.3 Temporäre Störung des Gleichgewichts .....       | 36        |
| 1.4.4 Lokale Störung des Gleichgewichts .....          | 39        |
| <b>2 Diode.....</b>                                    | <b>45</b> |
| 2.1 Aufbau und Wirkungsweise der Diode .....           | 45        |
| 2.1.1 Diode im thermodynamischen Gleichgewicht .....   | 45        |
| 2.1.2 Diode bei Anlegen einer äußeren Spannung .....   | 49        |
| 2.2 Ableitung der Diodengleichung .....                | 50        |
| 2.2.1 Diode mit langen Abmessungen .....               | 50        |
| 2.2.2 Diode mit kurzen Abmessungen .....               | 55        |
| 2.2.3 Abweichung von der idealen Diodenkennlinie ..... | 55        |
| 2.2.4 Kapazitätsverhalten des pn-Übergangs .....       | 56        |

|          |  |            |
|----------|--|------------|
| 2.3      | Modellierung der Diode .....                             | 63         |
| 2.3.1    | Großsignalersatzschaltung der Diode .....                | 63         |
| 2.3.2    | Schaltverhalten der Diode .....                          | 63         |
| 2.3.3    | Kleinsignalersatzschaltung der Diode .....               | 66         |
| 2.3.4    | Durchbruchverhalten der Diode .....                      | 68         |
| 2.4      | Bänderdiagrammdarstellung der Diode .....                | 69         |
| 2.4.1    | Regeln zur Konstruktion von Bänderdiagrammen .....       | 69         |
| 2.4.2    | Bänderdiagramm der Diode .....                           | 70         |
| 2.5      | Metall-Halbleiter-Übergänge .....                        | 71         |
| 2.5.1    | Elektronenaffinität und Austrittsarbeit .....            | 72         |
| 2.5.2    | Metall-Halbleiter-Übergang mit n-Halbleiter .....        | 73         |
| 2.5.3    | Metall-Halbleiter-Übergang mit p-Halbleiter .....        | 78         |
| <b>3</b> | <b>Bipolartransistor .....</b>                           | <b>81</b>  |
| 3.1      | Aufbau und Wirkungsweise des Bipolartransistors .....    | 81         |
| 3.1.1    | npn- und pnp-Transistor .....                            | 81         |
| 3.1.2    | Funktion des Bipolartransistors .....                    | 82         |
| 3.2      | Ableitung der Transistorgleichungen .....                | 85         |
| 3.2.1    | Transistor im normalen Verstärkerbetrieb .....           | 85         |
| 3.2.2    | Transistor im inversen Verstärkerbetrieb .....           | 90         |
| 3.2.3    | Transistor im Sättigungsbetrieb .....                    | 91         |
| 3.2.4    | Ausgangskennlinienfeld des Transistors .....             | 92         |
| 3.2.5    | Basisweitenmodulation (Early-Effekt) .....               | 93         |
| 3.3      | Modellierung des Bipolartransistors .....                | 95         |
| 3.3.1    | Großsignalersatzschaltbild des Bipolartransistors .....  | 95         |
| 3.3.2    | Schaltverhalten des Bipolartransistors .....             | 99         |
| 3.3.3    | Kleinsignalersatzschaltbild des Bipolartransistors ..... | 101        |
| 3.3.4    | Frequenzverhalten des Transistors .....                  | 105        |
| 3.3.5    | Durchbruchverhalten des Bipolartransistors .....         | 107        |
| 3.4      | Bänderdiagrammdarstellung des Bipolartransistors .....   | 108        |
| <b>4</b> | <b>Feldeffekttransistor .....</b>                        | <b>111</b> |
| 4.1      | Aufbau und Wirkungsweise des Feldeffekttransistors ..... | 111        |
| 4.1.1    | n-Kanal MOS-Feldeffekttransistor .....                   | 111        |
| 4.1.2    | p-Kanal MOS-Feldeffekttransistor .....                   | 113        |
| 4.1.3    | Transistortypen und Schaltsymbole .....                  | 113        |
| 4.2      | Ableitung der Transistorgleichungen .....                | 115        |
| 4.2.1    | Stromgleichung .....                                     | 115        |
| 4.2.2    | Ausgangskennlinienfeld .....                             | 118        |
| 4.2.3    | Übertragungskennlinie .....                              | 121        |
| 4.2.4    | Kanallängenmodulation .....                              | 121        |
| 4.3      | Modellierung des MOSFET .....                            | 123        |
| 4.3.1    | Großsignalersatzschaltbild des MOSFET .....              | 123        |
| 4.3.2    | Schaltverhalten des MOSFET .....                         | 125        |
| 4.3.3    | Kleinsignalersatzschaltbild des MOSFET .....             | 129        |

|          |   |            |
|----------|---|------------|
| 4.3.4    | Durchbruchverhalten .....                               | 131        |
| 4.4      | Bänderdiagrammdarstellung des MOSFET .....              | 132        |
| 4.4.1    | Bänderdiagramm der MOS-Struktur .....                   | 132        |
| 4.4.2    | Bänderdiagramm des MOSFET .....                         | 135        |
| 4.4.3    | Wirkungsweise des Transistors im Bänderdiagramm....     | 136        |
| 4.4.4    | Substratsteuereffekt .....                              | 137        |
| 4.4.5    | Kurzkanaleffekt .....                                   | 137        |
| <b>5</b> | <b>Optoelektronische Bauelemente .....</b>              | <b>139</b> |
| 5.1      | Grundlegende Begriffe.....                              | 139        |
| 5.1.1    | Kenngrößen optischer Strahlung .....                    | 139        |
| 5.1.2    | Ladungsträgergeneration und Fotoeffekt .....            | 142        |
| 5.1.3    | Direkte und indirekte Halbleiter .....                  | 144        |
| 5.2      | Fotowiderstand .....                                    | 148        |
| 5.2.1    | Aufbau und Funktionsweise .....                         | 148        |
| 5.2.2    | Stromgleichung .....                                    | 149        |
| 5.2.3    | Kenngrößen .....  | 150        |
| 5.3      | Fotodiode .....   | 152        |
| 5.3.1    | Aufbau und Funktion .....                               | 152        |
| 5.3.2    | Stromgleichung .....                                    | 153        |
| 5.3.3    | Kenngrößen .....  | 154        |
| 5.3.4    | Betriebsarten der Fotodiode .....                       | 155        |
| 5.4      | Solarzelle .....  | 156        |
| 5.4.1    | Funktion und Beschaltung .....                          | 156        |
| 5.4.2    | Kenngrößen .....  | 157        |
| 5.5      | Fototransistor .....                                    | 159        |
| 5.6      | Lumineszenzdiode .....                                  | 160        |
| 5.6.1    | Aufbau und Funktionsweise .....                         | 160        |
| 5.6.2    | Kenngrößen .....  | 161        |
| <b>6</b> | <b>Der Transistor als Verstärker .....</b>              | <b>165</b> |
| 6.1      | Grundlegende Begriffe und Konzepte.....                 | 165        |
| 6.1.1    | Übertragungskennlinie und Verstärkung .....             | 165        |
| 6.1.2    | Arbeitspunkt und Betriebsarten .....                    | 167        |
| 6.1.3    | Gleichstromersatzschaltung .....                        | 169        |
| 6.2      | Arbeitspunkteinstellung mit 4-Widerstandsnetzwerk ..... | 170        |
| 6.2.1    | Arbeitspunkteinstellung beim Bipolartransistor .....    | 170        |
| 6.2.2    | Arbeitspunkteinstellung beim MOSFET .....               | 173        |
| 6.3      | Arbeitspunkteinstellung mit Stromspiegeln .....         | 176        |
| 6.3.1    | Stromspiegel .....                                      | 176        |
| 6.3.2    | Dimensionierung des Stromspiegels .....                 | 180        |
| 6.4      | Wechselstromanalyse von Verstärkern .....               | 181        |
| 6.4.1    | Kleinsignalersatzschaltung .....                        | 181        |
| 6.4.2    | Verstärkerschaltungen mit Bipolartransistor .....       | 183        |
| 6.4.3    | Verstärkerschaltungen mit MOSFET .....                  | 188        |

|          |   |            |
|----------|---|------------|
| 6.4.4    | Verstärkerschaltungen mit Stromspegel .....             | 192        |
| 6.4.5    | Mehrstufige Verstärker .....                            | 194        |
| <b>7</b> | <b>Transistorgrundschaltungen</b> .....                 | <b>199</b> |
| 7.1      | Emitterschaltung, Sourceschaltung .....                 | 199        |
| 7.1.1    | Wechselstromersatzschaltbild der Emitterschaltung ....  | 199        |
| 7.1.2    | Spannungsverstärkung der Emitterschaltung .....         | 201        |
| 7.1.3    | Eingangswiderstand der Emitterschaltung .....           | 203        |
| 7.1.4    | Ausgangswiderstand der Emitterschaltung .....           | 204        |
| 7.2      | Kollektorschaltung, Drainschaltung .....                | 207        |
| 7.2.1    | Wechselstromersatzschaltbild der Kollektorschaltung ... | 207        |
| 7.2.2    | Spannungsverstärkung der Kollektorschaltung .....       | 208        |
| 7.2.3    | Eingangswiderstand der Kollektorschaltung .....         | 209        |
| 7.2.4    | Ausgangswiderstand der Kollektorschaltung .....         | 210        |
| 7.3      | Basisschaltung, Gateschaltung .....                     | 211        |
| 7.3.1    | Spannungsverstärkung der Basisschaltung .....           | 213        |
| 7.3.2    | Eingangswiderstand der Basisschaltung .....             | 215        |
| 7.3.3    | Ausgangswiderstand der Basisschaltung .....             | 216        |
| 7.4      | Push-Pull Ausgangsstufe .....                           | 217        |
| <b>8</b> | <b>Operationsverstärker</b> .....                       | <b>221</b> |
| 8.1      | Der einstufige Differenzverstärker .....                | 221        |
| 8.1.1    | Funktion des Differenzverstärkers .....                 | 221        |
| 8.1.2    | Gleichstromanalyse des Differenzverstärkers .....       | 222        |
| 8.1.3    | Kleinsignalanalyse des Differenzverstärkers .....       | 222        |
| 8.2      | Mehrstufige Differenzverstärker .....                   | 228        |
| 8.2.1    | CMOS Differenzeingangsstufe .....                       | 228        |
| 8.2.2    | Verbesserte Differenzeingangsstufe .....                | 232        |
| 8.2.3    | Mehrstufiger Differenzverstärker .....                  | 234        |
| 8.2.4    | Vom Differenzverstärker zum Operationsverstärker ...    | 237        |
| 8.3      | Schaltungen mit idealen Operationsverstärkern .....     | 239        |
| 8.3.1    | Invertierender Verstärker .....                         | 239        |
| 8.3.2    | Nichtinvertierender Verstärker .....                    | 241        |
| 8.3.3    | Addierer .....  | 243        |
| 8.3.4    | Subtrahierer .....                                      | 243        |
| 8.3.5    | Filterschaltungen .....                                 | 244        |
| <b>9</b> | <b>Frequenzverhalten analoger Schaltungen</b> .....     | <b>247</b> |
| 9.1      | Grundlegende Begriffe .....                             | 247        |
| 9.1.1    | Amplituden- und Phasengang .....                        | 247        |
| 9.1.2    | Die komplexe Übertragungsfunktion .....                 | 252        |
| 9.1.3    | Verhalten im Zeitbereich .....                          | 256        |
| 9.2      | Übertragungsfunktionen von Verstärkerschaltungen .....  | 259        |
| 9.2.1    | Komplexe Übertragungsfunktion und Grenzfrequenz ...     | 259        |
| 9.2.2    | Berechnung der Grenzfrequenzen .....                    | 261        |

|        |   |     |
|--------|---|-----|
| 9.3    | Grenzfrequenz von Verstärkergrundschaltungen .....            | 266 |
| 9.3.1  | Emitterschaltung .....  | 267 |
| 9.3.2  | Miller-Effekt? .....  | 269 |
| 9.3.3  | Emitterschaltung mit Gegenkopplungswiderstand .....           | 270 |
| 9.3.4  | Kollektorschaltung .....                                      | 272 |
| 9.3.5  | Basisschaltung .....  | 275 |
| 9.4    | Methoden zur Abschätzung der Grenzfrequenzen .....            | 277 |
| 9.4.1  | Kurzschluss-Zeitkonstanten-Methode .....                      | 277 |
| 9.4.2  | Leerlauf-Zeitkonstanten-Methode .....                         | 279 |
| 10     | <b>Rückkopplung in Verstärkern</b> .....                      | 283 |
| 10.1   | Grundlegende Begriffe .....                                   | 283 |
| 10.1.1 | Prinzip der Gegenkopplung .....                               | 283 |
| 10.1.2 | Rückkopplung und Verzerrungen .....                           | 284 |
| 10.1.3 | Rückkopplung und Frequenzgang .....                           | 285 |
| 10.1.4 | Rückkopplungsarten .....                                      | 286 |
| 10.2   | Serien-Parallel-Rückkopplung (Spannungsverstärker) .....      | 288 |
| 10.2.1 | Spannungsverstärker mit idealer Rückkopplung .....            | 288 |
| 10.2.2 | Spannungsverstärker mit realer Rückkopplung .....             | 291 |
| 10.3   | Parallel-Parallel-Rückkopplung (Transimpedanzverstärker) .... | 297 |
| 10.3.1 | Transimpedanzverstärker mit idealer Rückkopplung ....         | 297 |
| 10.3.2 | Transimpedanzverstärker mit realer Rückkopplung ....          | 299 |
| 10.4   | Parallel-Serien-Rückkopplung (Stromverstärker) .....          | 304 |
| 10.4.1 | Stromverstärker mit idealer Rückkopplung .....                | 304 |
| 10.4.2 | Stromverstärker mit realer Rückkopplung .....                 | 305 |
| 10.5   | Serien-Serien-Rückkopplung (Transadmittanzverstärker) .....   | 307 |
| 10.5.1 | Transadmittanzverstärker mit idealer Rückkopplung ...         | 307 |
| 10.5.2 | Transadmittanzverstärker mit realer Rückkopplung ....         | 308 |
| 10.6   | Rückkopplung und Oszillatoren .....                           | 310 |
| 10.6.1 | Übertragungsfunktion der rückgekoppelten Anordnung .          | 310 |
| 10.6.2 | Schwingbedingung .....  | 314 |
| 10.6.3 | Schleifenverstärkung der rückgekoppelten Anordnung ..         | 315 |
| 10.7   | Stabilität und Kompensation von Verstärkerschaltungen .....   | 317 |
| 10.7.1 | Bode-Diagramm des Operationsverstärkers .....                 | 318 |
| 10.7.2 | Stabilitätskriterium .....                                    | 320 |
| 10.7.3 | Kompensation durch Polverschiebung .....                      | 322 |
| 10.7.4 | Kompensation durch Polaufsplittung .....                      | 325 |
| 11     | <b>Logikschaltungen</b> .....                                 | 329 |
| 11.1   | Grundlegende Begriffe .....                                   | 329 |
| 11.1.1 | Dioden-Transistor-Logik (DTL) .....                           | 331 |
| 11.1.2 | Transistor-Transistor-Logik (TTL) .....                       | 332 |
| 11.2   | MOS-Logikschaltungen .....                                    | 333 |
| 11.2.1 | n-MOS-Inverterschaltungen .....                               | 334 |
| 11.2.2 | CMOS-Komplementärinverter .....                               | 334 |

|           |   |            |
|-----------|---|------------|
| 11.2.3    | Entwurf von CMOS-Gattern                                    | 341        |
| 11.2.4    | Dimensionierung von CMOS-Gattern                            | 342        |
| 11.2.5    | C <sup>2</sup> MOS Logik                                    | 345        |
| 11.2.6    | Domino-Logik  | 348        |
| 11.2.7    | NORA-Logik  | 349        |
| <b>12</b> | <b>Herstellung integrierter Schaltungen in CMOS-Technik</b> | <b>351</b> |
| 12.1      | Einführung  | 351        |
| 12.1.1    | Die CMOS-Technologie  | 352        |
| 12.1.2    | Grundsätzlicher Prozessablauf                               | 353        |
| 12.2      | Schichttechnik  | 354        |
| 12.2.1    | Gasphasenabscheidung  | 355        |
| 12.2.2    | Epitaxie  | 355        |
| 12.2.3    | Thermische Oxidation  | 356        |
| 12.2.4    | Kathodenzerstäubung   | 357        |
| 12.2.5    | Ionenimplantation   | 357        |
| 12.2.6    | Schleuderbeschichtung                                       | 358        |
| 12.3      | Ätztechnik  | 358        |
| 12.3.1    | Nassätzen   | 359        |
| 12.3.2    | Physikalisches Trockenätzen                                 | 359        |
| 12.3.3    | Chemisches Trockenätzen                                     | 360        |
| 12.3.4    | Chemisch physikalisches Trockenätzen                        | 360        |
| 12.3.5    | Chemisch mechanisches Polieren                              | 360        |
| 12.4      | Lithografie   | 361        |
| 12.4.1    | Prinzip der Fotolithografie                                 | 361        |
| 12.4.2    | Kenngrößen der Fotolithografie                              | 361        |
| 12.5      | Der CMOS-Prozess  | 361        |
| 12.5.1    | Prozessablauf   | 361        |
| 12.6      | Layout von CMOS-Schaltungen                                 | 369        |
| 12.6.1    | Herstellungsebenen und Masken                               | 369        |
| 12.6.2    | CMOS-Inverter   | 370        |
| 12.6.3    | 2-fach NOR-Gatter   | 371        |
| 12.7      | Elektrische Eigenschaften der Entwurfsebenen                | 372        |
| 12.7.1    | Metallebene   | 372        |
| 12.7.2    | Kontakte und Vias   | 376        |
| 12.7.3    | Polysiliziumebene   | 377        |
| 12.7.4    | Implantationsebene  | 378        |
| 12.7.5    | Wannen  | 378        |
| 12.8      | Parasitäre Bauelemente                                      | 380        |
| 12.8.1    | Dickoxidtransistor  | 380        |
| 12.8.2    | Parasitärer Bipolartransistor                               | 380        |
| 12.8.3    | Parasitärer Thyristor                                       | 381        |
| 12.9      | ASIC  | 384        |
| 12.9.1    | Gate Arrays   | 384        |
| 12.9.2    | Standardzellen  | 384        |

|   |            |
|---|------------|
| 12.9.3 PLD .....  | 385        |
| <b>13 Rechnergestützter Schaltungsentwurf .....</b>                           | <b>387</b> |
| 13.1 Einführung .....   | 387        |
| 13.1.1 Entwurfsablauf .....   | 387        |
| 13.1.2 Simulationswerkzeuge für den Schaltungsentwurf .....                   | 389        |
| 13.1.3 Simulationsarten .....   | 389        |
| 13.2 Aufbau eines Schaltungssimulators .....                                  | 392        |
| 13.2.1 Schaltungseingabe und Netzliste .....                                  | 392        |
| 13.2.2 Modellgleichungen und Parameterübergabe .....                          | 393        |
| 13.3 Aufstellen der Netzwerkgleichungen bei der<br>Schaltungssimulation ..... | 395        |
| 13.3.1 Netzwerk mit Stromquellen .....  | 395        |
| 13.3.2 Netzwerk mit Spannungsquellen .....                                    | 399        |
| 13.3.3 Berücksichtigung gesteuerter Quellen .....                             | 401        |
| 13.3.4 Berücksichtigung nichtlinearer Bauelemente .....                       | 403        |
| 13.3.5 Berücksichtigung von Induktivitäten und Kapazitäten ..                 | 406        |
| <b>A Anhang .....</b>   | <b>411</b> |
| A.1 Äquivalente Zweipole .....  | 411        |
| A.1.1 Bestimmung von Ersatzspannungsquellen .....                             | 411        |
| A.1.2 Bestimmung von Ersatzstromquellen .....                                 | 412        |
| A.2 Ein- und Ausgangswiderstand von Verstärkern .....                         | 413        |
| A.2.1 Bestimmung des Eingangswiderstandes .....                               | 413        |
| A.2.2 Bestimmung des Ausgangswiderstandes .....                               | 413        |
| A.3 Vierpolparameter .....  | 414        |
| A.3.1 Darstellung von Vierpolen mit $g$ -Parametern .....                     | 414        |
| A.3.2 Darstellung von Vierpolen mit $h$ -Parametern .....                     | 415        |
| A.3.3 Darstellung von Vierpolen mit $y$ -Parametern .....                     | 415        |
| A.3.4 Darstellung von Vierpolen mit $z$ -Parametern .....                     | 416        |
| <b>Literatur .....</b>  | <b>417</b> |
| <b>Sachverzeichnis .....</b>  | <b>421</b> |