

# **Elektronisches Rauschen**

Von Dr. rer. nat. Alfons Blum  
Professor an der Universität des Saarlandes



**B.G. Teubner Stuttgart 1996**

# Inhaltsverzeichnis

|  |           |
|--|-----------|
| <b>1 Einführung</b>  | <b>1</b>  |
| <b>2 Einige Grundbegriffe der Stochastik</b>   | <b>5</b>  |
| 2.1 Wahrscheinlichkeit und Zufallsvariablen . . . . .  | 5         |
| 2.2 Stochastische Prozesse . . . . .   | 15        |
| 2.3 Spezielle Wahrscheinlichkeitsverteilungen . . . . .  | 19        |
| <b>3 Spektralanalyse stochastischer Prozesse</b>   | <b>29</b> |
| 3.1 Spektrale Leistungsdichte . . . . .  | 29        |
| 3.2 Schmalbandrauschen und stochastische Phasoren . . . . .                                      | 35        |
| <b>4 Schrot-Rauschen</b>   | <b>41</b> |
| 4.1 Campbell-Theorem, Carson-Theorem, Schottky-Theorem . . . . .                                 | 41        |
| 4.2 Erweiterung des Carson-Theorems, Varianz-Theorem und Stromverteilungs-<br>rauschen . . . . . | 46        |
| 4.3 Schrotrauschen als quasi-periodischer Vorgang . . . . .                                      | 48        |
| <b>5 Thermisches Rauschen und Diffusionsrauschen</b>   | <b>51</b> |
| 5.1 Gleichverteilungssatz . . . . .  | 51        |
| 5.2 Nyquist-Theorem (Johnson-Theorem) . . . . .  | 52        |
| 5.3 Diffusionsrauschen . . . . .   | 60        |
| <b>6 Weitere Rauscherscheinungen</b>   | <b>67</b> |
| 6.1 Generations-Rekombinations-Rauschen . . . . .  | 67        |
| 6.2 $1/f$ - Rauschen . . . . .   | 74        |

|           |   |            |
|-----------|---|------------|
| 6.3       | Rauschen bei optischen Frequenzen . . . . .   | 78         |
| <b>7</b>  | <b>Rauschen in bipolaren Halbleiterbauelementen</b>                                       | <b>81</b>  |
| 7.1       | Gemeinsame Grundlagen . . . . .   | 81         |
| 7.2       | Rauschen des Diodenstroms bei Dioden mit pn-Übergang . . . . .                            | 94         |
| 7.3       | Rauschen bei Bipolartransistoren . . . . .  | 98         |
| <b>8</b>  | <b>Rauschen in unipolaren Bauelementen</b>  | <b>107</b> |
| 8.1       | Gemeinsame Grundlagen zur Beschreibung des Rauschens bei Feldeffekttransistoren . . . . . | 107        |
| 8.2       | Rauschen in MOS-Feldeffekttransistoren . . . . .  | 113        |
| 8.3       | Rauschen in Sperrschicht-Feldeffekttransistoren . . . . .                                 | 119        |
| 8.4       | Rauschen in Kurzkanal-Feldeffekttransistoren . . . . .                                    | 126        |
| 8.5       | Rauschen in Schottky-Dioden . . . . .   | 134        |
| <b>9</b>  | <b>Rauschanalyse und Rauschkenngrößen</b>   | <b>139</b> |
| 9.1       | Theorie rauschender Drei- und Vierpole, Korrelationsmatrizen . . . . .                    | 139        |
| 9.2       | Definitionen der Leistungsverstärkung und ihr Zusammenhang . . . . .                      | 145        |
| 9.3       | Rauschtemperatur, Rauschzahl und Rauschmaß . . . . .                                      | 148        |
| 9.4       | Die Rauschkenngrößen $F_{min}$ , $R_n$ , $g_{Opt}$ und $b_{G_{opt}}$ . . . . .            | 157        |
| 9.5       | Die charakteristische Rauschmatrix und ihr Zusammenhang mit dem Rauschmaß $M$ . . . . .   | 163        |
| 9.6       | Schaltungs-Rauschkenngrößen bei nicht-thermisch rauschender Signalquelle . . . . .        | 175        |
| <b>10</b> | <b>Rauscheigenschaften von Verstärkern</b>  | <b>177</b> |
| 10.1      | Rauschkenngrößen der NF-Grundsaltungen mit Bipolartransistor . . . . .                    | 177        |
| 10.2      | Rauschkenngrößen von Verstärkern mit Feldeffekttransistoren . . . . .                     | 183        |
| 10.3      | Rauschkenngrößen gegengekoppelter Verstärker . . . . .                                    | 185        |
| 10.4      | Rauschkenngrößen von Schaltungen mit Operationsverstärkern . . . . .                      | 190        |
| 10.5      | Rauschkenngrößen für Verstärker in Systemen zur Impulsregeneration . . . . .              | 194        |

|   |            |
|---|------------|
| <b>11 Numerische Berechnung der Rauscheigenschaften von Verstärkern</b>   | <b>201</b> |
| 11.1 Tellegen-Theorem und adjungiertes Netzwerk . . . . .   | 201        |
| 11.2 Einzelbeiträge der Rauschquellen zur Rauschzahl und zur Ausgangsrauschspannung . . . . .                     | 206        |
| 11.3 Numerische Berechnung der Korrelationsmatrix, der äquivalenten Rauschkenngrößen und der Rauschzahl . . . . . | 217        |
| <b>12 Rauschen in nichtlinearen Schaltkreisen</b>   | <b>231</b> |
| 12.1 Oszillator-Rauschen . . . . .  | 231        |
| 12.2 Rauschen in Mischern . . . . .   | 247        |
| <b>13 Rauschmeßtechnik</b>  | <b>261</b> |
| 13.1 Rauschquellen . . . . .  | 261        |
| 13.2 Rauschleistungsmessung . . . . .   | 264        |
| 13.3 Messung der Rauschkenngrößen linearer Schaltkreise . . . . .   | 267        |
| 13.4 Messung des Phasenrauschens von Oszillatoren . . . . .   | 273        |
| <b>Anhang</b>   | <b>283</b> |
| A Varianz bei Diffusion und Diffusionskonstante . . . . .   | 283        |
| B Die Greensche Funktion . . . . .  | 284        |
| C Rauschen in Kurzkanal-Feldeffekttransistoren . . . . .  | 286        |
| D Tabelle der Transformationsmatrizen $[T]^{(u,v)}$ für formale Rauschquellen . . .                               | 292        |
| E Tellegen-Theorem . . . . .  | 293        |
| F Mit Sura berechnete Schaltungsgrößen . . . . .  | 294        |
| G Autokorrelationsfunktion von $y(t)$ . . . . .   | 296        |
| H Periodische Lösung der Differentialgleichung (12.28) . . . . .  | 298        |
| I Autokorrelationsfunktion der Ableitung eines stationären stochastischen Prozesses . . . . .                     | 301        |
| J Zusammenhang zwischen $R_{e_r}(\Theta)$ und $R_{e_c}(\Theta)$ sowie $R_{e_s}(\Theta)$ . . . . .                 | 302        |
| <b>Literaturverzeichnis</b>   | <b>305</b> |
| <b>Stichwortverzeichnis</b>   | <b>314</b> |