

Elektronisches Rauschen

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



B.G. Teubner Stuttgart 1996

Inhaltsverzeichnis

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

6.3	Rauschen bei optischen Frequenzen	78
7	Rauschen in bipolaren Halbleiterbauelementen	81
7.1	Gemeinsame Grundlagen	81
7.2	Rauschen des Diodenstroms bei Dioden mit pn-Übergang	94
7.3	Rauschen bei Bipolartransistoren	98
8	Rauschen in unipolaren Bauelementen	107
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
9	Rauschanalyse und Rauschkenngrößen	139
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_{Gopt} und b_{Gopt}	157
9.5	Die charakteristische Rauschmatrix und ihr Zusammenhang mit dem Rauschmaß M	163
9.6	Schaltungs-Rauschkenngrößen bei nicht-thermisch rauschender Signalquelle	175
10	Rauscheigenschaften von Verstärkern	177
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

11 Numerische Berechnung der Rauscheigenschaften von Verstärkern	201
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
12 Rauschen in nichtlinearen Schaltkreisen	231
12.1 Oszillator-Rauschen	231
12.2 Rauschen in Mischern	247
13 Rauschmeßtechnik	261
13.1 Rauschquellen	261
13.2 Rauschleistungsmessung	264
13.3 Messung der Rauschkenngrößen linearer Schaltkreise	267
13.4 Messung des Phasenrauschens von Oszillatoren	273
Anhang	283
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
Literaturverzeichnis	305
Stichwortverzeichnis	314