

# Inhaltsverzeichnis

<b>1</b>	<b>Rauschen in elektronischen Schaltungen</b>	<b>1</b>
1.1	Rauscharten	1
1.2	Rauschmechanismen	2
1.2.1	Thermisches Rauschen	2
1.2.2	Schrotrauschen	6
1.2.3	Stromrauschen	7
1.3	Fehler bei linearer und quadratischer Addition durch Vernachlässigung	12
1.3.1	Vernachlässigung kleiner Rauschgrößen	12
1.3.2	Korrelation	13
<b>2</b>	<b>Methoden und Werkzeuge zur Rauschberechnung</b>	<b>15</b>
2.1	Quellenverschiebung	15
2.2	Bodeverfahren	20
2.3	Resonanz und Resonanzüberhöhung im Bode-Diagramm	27
<b>3</b>	<b>Verstärkerrauschen</b>	<b>33</b>
3.1	Die äquivalente Eingangsrauschspannungsquelle	33
3.2	Messung von Rauschspannung $u_N$ und Rauschstrom $i_N$	35
3.3	Parameter zur Beurteilung des Rauscheinflusses	35
3.3.1	Rauschfaktor $F$	35
3.3.2	Rauschmaß (Noise Figure) $NF$	35
3.3.3	Signal-Rausch-Abstand	36
3.4	Der optimale Quellenwiderstand	36
3.5	Dimensionierungsvorgang	38
<b>4</b>	<b>Rauschbegrenzung durch Filter</b>	<b>41</b>
4.1	Rauschbandbreite	41
4.2	Gesamtrauschen bei Serienschaltung mehrerer unabhängiger gleicher Tiefpässe	42

4.3	Die Rauschbandbreite bei Butterworth-Filtern . . . . .	44
4.4	Berechnung der Ausgangsrauschspannung im gesamten Frequenzbereich . . . . .	45
4.5	Berechnung der äquivalenten Eingangsrauschspannung in einem definierten Frequenzbereich . . . . .	46
4.6	Berechnung des Rauschens bei steigenden und fallenden Kennlinien der Frequenzabhängigkeit . . . . .	48
<b>5</b>	<b>Berechnung der äquivalenten Eingangsrauschquellen . . . . .</b>	<b>51</b>
5.1	Die äquivalente Eingangsrauschspannungsquelle . . . . .	51
5.1.1	Rauschen in der Schaltung mit Parallelwiderstand . . . . .	51
5.1.2	Rauschen in der Schaltung mit Parallel- und Serienwiderstand . . . . .	53
5.2	Die äquivalente Eingangsrauschstromquelle . . . . .	55
5.3	Kapazitive und induktive Sensoren . . . . .	59
5.3.1	Kapazitive Sensoren . . . . .	59
5.3.2	Induktive Sensoren . . . . .	62
5.3.3	Zusammenfassung . . . . .	65
5.3.4	Schaltung mit drei verschiedenen Bauteilen . . . . .	68
<b>6</b>	<b>Operationsverstärker . . . . .</b>	<b>71</b>
6.1	Idealer Operationsverstärker . . . . .	71
6.1.1	Invertierende Schaltung . . . . .	71
6.1.2	Nichtinvertierende Schaltung . . . . .	74
6.1.3	Spannungsfolger . . . . .	75
6.2	Rauschbetrachtungen bei realen Operationsverstärkern . . . . .	76
6.2.1	Verschiebung einer Rauschquelle am Ausgang des OP's . . . . .	77
6.2.2	Schaltung mit Ausgangswiderstand $R_o$ . . . . .	81
6.2.3	Schaltung mit verändertem Ausgang . . . . .	83
<b>7</b>	<b>Rauschmechanismen in Transistoren . . . . .</b>	<b>89</b>
7.1	Transistorrauschen bei mittleren Frequenzen (1 kHz ... 1 MHz) . . . . .	89
7.2	Transistorrauschen bei tiefen Frequenzen . . . . .	95
7.3	Transistorrauschen bei höheren Frequenzen . . . . .	97
7.4	Transistorrauschen im gesamten Frequenzbereich . . . . .	99
7.5	Rauschen bei Feldeffekttransistoren . . . . .	101
7.6	Vergleich Bipolar- und Feldeffekttransistor . . . . .	105
7.7	Einsatz verschiedener aktiver Bauteile . . . . .	107
<b>8</b>	<b>Grundsaltungen der Elektronik . . . . .</b>	<b>109</b>
8.1	Rauschen der Arbeitspunkteinstellung . . . . .	109
8.2	Emitterschaltung . . . . .	113
8.2.1	Bestimmung des Gleichstrom-Arbeitspunktes $I_C$ . . . . .	113
8.2.2	Berechnung der Kleinsignalparameter . . . . .	116
8.2.3	Rauschen der Emitterschaltung . . . . .	118
8.3	Sourceschaltung . . . . .	123

8.3.1	Bestimmung des Gleichstrom-Arbeitspunktes $I_D$ . . . . .	123
8.3.2	Kleinsignalbetrachtung . . . . .	125
8.3.3	Rauschen der Sourceschaltung . . . . .	127
8.4	Kollektorschaltung . . . . .	127
8.4.1	Bestimmung des Arbeitspunktes . . . . .	127
8.4.2	Kleinsignalbetrachtung . . . . .	127
8.4.3	Rauschen der Kollektorschaltung . . . . .	129
8.5	Basisschaltung . . . . .	132
8.5.1	Kleinsignalbetrachtung . . . . .	132
8.5.2	Rauschen der Basisschaltung . . . . .	134
8.6	Kollektorschaltung mit Bootstrapeffekt . . . . .	135
8.6.1	Kleinsignalbetrachtung . . . . .	136
8.6.2	Rauschen der Kollektorschaltung mit Bootstrap . . . . .	140
8.6.3	Vergleich mit Operationsverstärkerschaltung – Signal . . . . .	142
8.6.4	Vergleich mit Operationsverstärkerschaltung – Rauschen . . . . .	143
8.7	Emitterschaltung mit Millereffekt . . . . .	144
8.7.1	Gleichstrom-Arbeitspunktes $I_C$ . . . . .	144
8.7.2	Spannungsverstärkung . . . . .	146
8.7.3	Eingangswiderstand . . . . .	147
8.7.4	Ausgangswiderstand . . . . .	147
8.7.5	Rauschen der Emitterschaltung mit Millereffekt . . . . .	148
8.8	Rauschen in Kaskadenschaltungen . . . . .	153
8.8.1	Emitter–Emitter-Schaltung . . . . .	153
8.8.2	Kaskode-Schaltung . . . . .	154
8.8.3	Kollektor–Emitter-Schaltung . . . . .	156
8.8.4	Kollektor–Basisschaltung (Differenzverstärker) . . . . .	158
8.8.5	Schaltungen mit Feldeffekttransistoren . . . . .	158
9	<b>Sonderschaltungen</b> . . . . .	159
9.1	Übertrager . . . . .	159
9.2	Parallel- und Serienschaltungen von elektronischen Bauteilen . . . . .	159
9.2.1	Widerstände . . . . .	159
9.2.2	Parallelschaltung von Transistoren . . . . .	160
9.2.3	Parallelschaltung von Feldeffekttransistoren . . . . .	164
9.2.4	Parallelschaltung von Operationsverstärkern . . . . .	164
9.3	Rauschen eines Transistors als Diode . . . . .	165
9.4	Stromquellen . . . . .	167
9.4.1	Transistorstromquelle . . . . .	167
9.4.2	Transistorstromquelle mit Operationsverstärker . . . . .	175
9.5	Stromspiegel–Schaltungen . . . . .	177
9.5.1	Einfache Stromspiegel–Schaltung . . . . .	177
9.5.2	Wilson-Stromspiegel . . . . .	179
9.5.3	Widlar-Stromspiegel . . . . .	183

9.5.4	Erweiterte Stromspiegelschaltungen . . . . .	185
9.6	Zusammenfassung der Ergebnisse der Stromquellen und Stromspiegelschaltungen . . . . .	188
10	<b>Beispiele</b> . . . . .	193
10.1	Kapazitiver Sensor-Verstärker . . . . .	193
10.1.1	Schaltung 1 . . . . .	193
10.1.2	Schaltung 2 . . . . .	200
10.2	Impedanzwandler . . . . .	207
10.3	Brückenschaltung . . . . .	210
10.3.1	Berechnung der Spannungsverstärkung . . . . .	210
10.3.2	Berechnung der Offset-Fehlervspannung am Ausgang . . . . .	212
10.3.3	Rauschen der Brückenschaltung . . . . .	215
Anhang A	<b>Allgemeines</b> . . . . .	223
A.1	Griechisches Alphabet . . . . .	223
A.2	SI-Präfixe . . . . .	223
A.3	Formelzeichen . . . . .	224
A.4	Schaltsymbole . . . . .	227
	<b>Literaturverzeichnis</b> . . . . .	231
	<b>Sachverzeichnis</b> . . . . .	233