

**A.1 Griechisches Alphabet**

**Tab. A.1** Das griechische Alphabet

<i>A</i>	$\alpha$	Alpha	<i>I</i>	$\iota$	Iota	<i>P</i>	$\rho$	Rho
<i>B</i>	$\beta$	Beta	<i>K</i>	$\kappa$	Kappa	$\Sigma$	$\sigma$	Sigma
$\Gamma$	$\gamma$	Gamma	$\Lambda$	$\lambda$	Lambda	<i>T</i>	$\tau$	Tau
$\Delta$	$\delta$	Delta	<i>M</i>	$\mu$	My	$\Upsilon$	$\upsilon$	Ypsilon
<i>E</i>	$\epsilon$	Epsilon	<i>N</i>	$\nu$	Ny	$\Phi$	$\phi$	Phi
<i>Z</i>	$\zeta$	Zeta	$\Xi$	$\xi$	Xi	<i>X</i>	$\chi$	Chi
<i>H</i>	$\eta$	Eta	<i>O</i>	$o$	Omikron	$\Psi$	$\psi$	Psi
$\Theta$	$\theta$	Theta	$\Pi$	$\pi$	Pi	$\Omega$	$\omega$	Omega

**A.2 SI-Präfixe**

**Tab. A.2** SI-Präfixe

Exa-	<i>E</i>	$10^{18}$	Dezi-	<i>d</i>	$10^{-1}$
Peta-	<i>P</i>	$10^{15}$	Zenti-	<i>c</i>	$10^{-2}$
Tetra-	<i>T</i>	$10^{12}$	Milli-	<i>m</i>	$10^{-3}$
Giga-	<i>G</i>	$10^9$	Mikro-	$\mu$	$10^{-6}$
Mega-	<i>M</i>	$10^6$	Nano-	<i>n</i>	$10^{-9}$
Kilo-	<i>k</i>	$10^3$	Pico-	<i>p</i>	$10^{-12}$
Hekto-	<i>h</i>	$10^2$	Femto-	<i>f</i>	$10^{-15}$
Deka-	<i>da</i>	10	Atto-	<i>a</i>	$10^{-18}$

### A.3 Formelzeichen

**Tab. A.3** Formelzeichen

Formelzeichen	Bedeutung [SI-Einheit] (Naturkonstante/Anmerkung)
$A$	Verstärkung [1]
$\underline{A}$	Komplexe Verstärkung der Schaltung [1]
$A_0$	Verstärkung [1]
$A_{0DC}$	Gleichspannungsverstärkung [1]
$B$	Gleichstromverstärkung [1] ( $B = \frac{I_C}{I_B}$ )
$\beta$	Kleinsignal-Stromverstärkung [1]
$c_0$	Lichtgeschwindigkeit im Vakuum [ $\frac{m}{s}$ ] ( $= 2,99792458 \cdot 10^8 \frac{m}{s}$ )
$C$	Kapazität [F] ( $1 F = 1 \frac{As}{V}$ )
$e$	Elementarladung [C] ( $1 C = 1 A s$ ) ( $= 1,602176565 \cdot 10^{-19} C$ )
$f$	Frequenz in [Hz] ( $1 Hz = \frac{1}{s}$ )
$f_1$	Erste Knickfrequenz des Operationsverstärkers [Hz] ( $1 Hz = \frac{1}{s}$ )
$f_3 \text{ dB}$	Grenzfrequenz [Hz] ( $1 Hz = \frac{1}{s}$ )
$f_T$	Transitfrequenz [Hz] ( $1 Hz = \frac{1}{s}$ )
$F$	Rauschfaktor [1]
$h$	Planck'sches Wirkungsquantum [J s] ( $1 J s = 1 V A s^2$ ) ( $= 6,62606957 \cdot 10^{-34} J s$ )
$I$	DC-Stromstärke [A]
$i$	AC-Stromstärke [A]
$i_{Si}$	AC-Signalstrom [A]
$i_o$	Ausgangsstrom [A]
$I_{Nexc}$	Excess-Stromrauschen [A]
$i_{Nexc}$	Excess-Stromrauschdichte [ $\frac{A}{\sqrt{Hz}}$ ]
$I_{NFet}$	Feldeffekttransistor-Verstärker Stromrauschen [A]
$i_{NFet}$	Feldeffekttransistor-Verstärker Stromrauschdichte [ $\frac{A}{\sqrt{Hz}}$ ]

**Tab. A.3** (Fortsetzung)

Formelzeichen	Bedeutung [SI-Einheit] (Naturkonstante/Anmerkung)
$I_{NOP}$	OP-Verstärker Stromrauschen [A]
$i_{NOP}$	OP-Verstärker Stromrauschdichte [ $\frac{A}{\sqrt{Hz}}$ ]
$I_{NR}$	Widerstands-Stromrauschen [A]
$i_{NR}$	Widerstands-Stromrauschdichte [ $\frac{A}{\sqrt{Hz}}$ ]
$I_{Nsh}$	Schrot-Stromrauschen [A]
$i_{Nsh}$	Schrot-Stromrauschdichte [ $\frac{A}{\sqrt{Hz}}$ ]
$I_{NTr}$	Bipolar-Transistor-Verstärker Stromrauschen [A]
$i_{NTr}$	Bipolar-Transistor-Verstärker Stromrauschdichte [ $\frac{A}{\sqrt{Hz}}$ ]
$j$	$\sqrt{-1}$
$k$	Boltzmann-Konstante [ $\frac{J}{K}$ ] ( $1 \frac{J}{K} = 1 \frac{Ws}{K} = 1 \frac{VA \cdot s}{K}$ ) ( $= 1,3806504 \cdot 10^{-23} \frac{Ws}{K}$ )
$k_{fQuelle}$	forward Koppelfaktor $U_{Quelle}$ bzw. $I_{Quelle}$ zu $u_e$
$k_r$	Rückkoppelungsfaktor $U_a$ zu $u_e$
$L$	Induktivität [H] ( $1 H = 1 \frac{Wb}{A} = 1 \frac{Vs}{A}$ )
$NF$	Rauschmaß (eng. Noise Figure) [1]
$p$	$s = j\omega = j2\pi f$
$Q$	Güte [1]
$Q$	Ladung [C] ( $1 C = 1 A s$ )
$R$	Widerstand [ $\Omega$ ] ( $1 \Omega = 1 \frac{V}{A}$ )
$R_e$	Eingangswiderstand [ $\Omega$ ] ( $1 \Omega = 1 \frac{V}{A}$ )
$R_a$	Ausgangswiderstand [ $\Omega$ ] ( $1 \Omega = 1 \frac{V}{A}$ )
$R_{1opt}$	Optimaler Quellenwiderstand [ $\Omega$ ] ( $1 \Omega = 1 \frac{V}{A}$ )
$s$	$p = j\omega = j2\pi f$
$\frac{S}{N}$	Signal zu Rauschverhältnis [1]

**Tab. A.3** (Fortsetzung)

Formelzeichen	Bedeutung [SI-Einheit] (Naturkonstante/Anmerkung)
$SR$	Slewrates $[\frac{V}{\mu s}]$
$t$	Zeit [s]
$t_r$	Anstiegszeit, <u>R</u> ise- <u>T</u> ime [s]
$T$	Temperatur in [K] (1 K = 1 °C) (meist Raumtemperatur $T \approx 300$ K)
$T_0$	Absoluter Nullpunkt [K] (1 K = 1 °C) (0 K = -273,15 °C)
$U$	DC-Spannung [V]
$u$	AC-Spannung [V]
$u_{Si}$	AC-Signal-Spannung [V]
$u_o$	AC-Ausgangsspannung [V]
$U_{Nexc}$	Excess-Rauschspannung [V]
$u_{Nexc}$	Excess-Rauschspannungsdichte $[\frac{V}{\sqrt{Hz}}]$
$U_{NFet}$	Feldeffekttransistor-Verstärker Rauschspannung [V]
$u_{NFet}$	Feldeffekttransistor-Verstärker Rauschspannungsdichte $[\frac{V}{\sqrt{Hz}}]$
$U_{NOP}$	OP-Verstärker Rauschspannung [V]
$u_{NOP}$	OP-Verstärker Rauschspannungsdichte $[\frac{V}{\sqrt{Hz}}]$
$U_{NR}$	Widerstands-Rauschspannung [V]
$u_{NR}$	Widerstands-Rauschspannungsdichte $[\frac{V}{\sqrt{Hz}}]$
$U_{Nsh}$	Schrot-Rauschspannung [V]
$u_{Nsh}$	Schrot-Rauschspannungsdichte $[\frac{V}{\sqrt{Hz}}]$
$U_{NTr}$	Bipolar-Transistor-Verstärker Rauschspannung [V]
$u_{NTr}$	Bipolar-Transistor-Verstärker Rauschspannungsdichte $[\frac{V}{\sqrt{Hz}}]$
$x, X$	Koordinate
$y, Y$	Koordinate
$Z$	Impedanz [ $\Omega$ ] (1 $\Omega = 1 \frac{V}{A}$ )

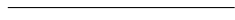
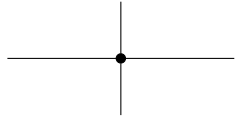

**Tab. A.3** (Fortsetzung)

Formelzeichen	Bedeutung [SI-Einheit] (Naturkonstante/Anmerkung)
$\epsilon_0$	Elektrische Feldkonstante [ $\frac{F}{m}$ ] ( $1 \frac{F}{m} = 1 \frac{C}{Vm} = 1 \frac{As}{Vm}$ ) ( $= \frac{1}{\mu_0 c_0^2} \approx 8,854187817 \cdot 10^{-12} \frac{As}{Vm}$ )
$\epsilon_r$	Permittivitätszahl [ $\frac{F}{m}$ ] ( $1 \frac{F}{m} = 1 \frac{C}{Vm} = 1 \frac{As}{Vm}$ )
$\eta$	Wirkungsgrad [1]
$\lambda$	Wellenlänge [m]
$\mu_0$	Magnetische Feldkonstante [ $\frac{H}{m}$ ] ( $1 \frac{H}{m} = 1 \frac{Vs}{Am}$ ) ( $= 4\pi \cdot 10^{-7} \frac{Vs}{Am} \approx 1,2566 \cdot 10^{-6} \frac{Vs}{Am}$ )
$\mu_r$	Permeabilitätszahl [ $\frac{H}{m}$ ] ( $1 \frac{H}{m} = 1 \frac{Vs}{Am}$ )
$\varrho$	Spezifischer Widerstand [ $\Omega m$ ]
$\varphi$	Phasenwinkel [ $1^\circ$ ]
$\omega$	Kreisfrequenz [ $\frac{1}{s}$ ]


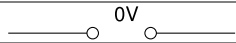
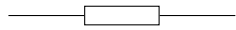




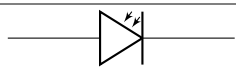

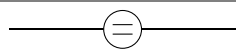


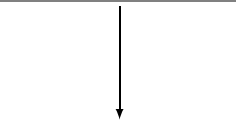

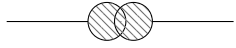

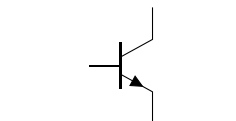
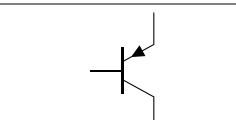
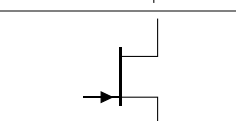
Die Naturkonstanten sind von der Website <http://physics.nist.gov/cuu/Constants/> entnommen, auf die die Physikalisch-Technische Bundesanstalt (PTB) [www.ptb.de](http://www.ptb.de) aus Braunschweig verweist.

## A.4 Schaltsymbole

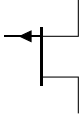
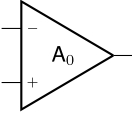
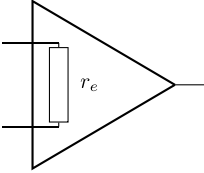
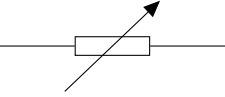

**Tab. A.4** Schaltzeichen

Schaltzeichen	Bedeutung
	Leitung
	Knotenpunkt
	nicht leitende Leitungskreuzung

**Tab. A.4** (Fortsetzung)

Schaltzeichen	Bedeutung
	Anschlussklemme
	Virtuell 0 V
	Idealer Widerstand
	Ideale Induktivität
	Idealer Kondensator
	Diode
	LED
	Photodiode
	Spannungsquelle
	DC Spannungsquelle
	AC Spannungsquelle
	Rauschspannungsquelle
	Spannungspfeil
	Stromquelle
	Rauschstromquelle
	Stromrichtung
	NPN-Transistor
	PNP-Transistor
	N-Kanal FET

**Tab. A.4** (Fortsetzung)

Schaltzeichen	Bedeutung
	P-Kanal FET
	Idealer Operationsverstärker mit Verstärkung $A_0$
	Idealer Operationsverstärker mit Innenwiderstand $r_e$
	Veränderbar-Zeichen bzw. gesteuerte Quelle
	Zwick'sches Integral (=Schaltungskomponente oder Formelbestandteil kann vernachlässigt werden)

---

## Literaturverzeichnis

- [Amb83] Andras Ambrozy. *Electronic Noise*. McGraw Hill Higher Education, New York, 1983.
- [Fis93] Peter J. Fish. *Electronic Noise and Low Noise Design*. McGraw-Hill Companies, New York, 1993.
- [Kay12] Art Kay. *Operational Amplifier Noise: Techniques and Tips for Analyzing and Reducing Noise*. Newnes, London, 2012.
- [MF73] C.D. Motchenbacher, F.C. Fitchen. *Low-Noise Electronic Design*. Wiley, New York, 1973.
- [MJ93] C.D. Motchenbacher, J.A. Connelly. *Low-Noise Electronic System Design*. Crystal Dreams Pub, Berlin, 1993. Eine optionale Notiz.
- [Ott88] Henry W. Ott. *Noise Reduction Techniques in Electronic Systems*. Wiley, New York, 1988.
- [Str80] Karl Strubecker. *Einführung in die Höhere Mathematik Band 3*. R. Oldenbourg Verlag München, 1980.
- [Vog11] Burkhard Vogel. *RIAA Phono-Amps: Designer's Guide*. Springer, Berlin, 2011.



---

# Sachverzeichnis

## Symbol

$1/f$ -Rauschen, 1

## A

Äquivalente

    Eingangsrauschspannungsquelle, 51, 55

Äquivalente Eingangsruschquelle, 33

Äquivalenten, 71

Äquivalenten Eingangsruschspannung, 71

## B

Basisschaltung, 132

    Kleinsignalbetrachtung, 132

    Rauschen, 134

Bode-Diagramm, 20

Bodeverfahren, 20

Brown'sche Bewegung, 2

Brückenschaltung, 210

Butterworth-Filter

    Rauschbandbreite, 44

## D

Der optimale Quellenwiderstand, 36

Dimensionierung von rauscharmen  
    Schaltungen, 38

## E

Eingangsrauschspannungsquelle, 51

Eingangsrauschstromquelle, 55

Emitterschaltung, 113

    Berechnung der Kleinsignalparameter, 116

    Gleichstrom-Arbeitspunkt, 113

    Rauschen, 118

Emitterschaltung mit Millereffekt, 144

    Arbeitspunkt, 144

    Ausgangswiderstand, 147

    Eingangswiderstand, 147

    Kleinsignalbetrachtung, 146

    Rauschen, 148

    Vergleich im Rauschen mit  
        Operationsverstärker, 152

Excess-Noise, 7

Excessrauschdichte, 8

Excessrauschen, 197, 219

## F

Farbiges Rauschen, 1

Feldeffekttransistoren

    Rauschen bei hohen Frequenzen, 104

    Rauschen bei mittleren Frequenzen, 101

    Rauschen bei tiefen Frequenzen, 103

    Rauschmaß bei Feldeffekttransistoren, 105

    Rauschspannung  $u_{NFet}$ , 102

    Rauschspannung  $u_{NFet}$  im Vergleich zu  
         $u_{NTr}$ , 102

    Rauschstrom  $i_{NFet}$ , 102

    Vergleich Bipolar- und Feldeffekttransistor,  
        105

Flicker-Noise, 7

## G

Gesamtrauschen, 42

    bei mehreren Tiefpässen, 43

Grenzfrequenz, 41

**I**

- Impedanzwandler, 207
- Induktive Sensoren, 62, 63
  - mit Signalspannungsquelle, 62
  - mit Signalstromquelle, 63

**K**

- Kapazitiver Sensor, 59, 60
  - mit Signalspannungsquelle, 59
  - mit Signalstromquelle, 60
- Kapazitiver Sensor-Verstärker, 193
- Kohleschichtwiderständen, 7
- Kollektorschaltung, 127
  - Gleichstrom-Arbeitspunkt, 127
  - Kleinsignalbetrachtung, 127
  - Rauschen, 129
- Kollektorschaltung mit Bootstrapeffekt, 135
  - Kleinsignalbetrachtung, 136
  - Rauschen, 140
  - Vergleich im Rauschen mit Operationsverstärker, 143
  - Vergleich mit Operationsverstärker, 142
- Korrelation, 13

**M**

- Metallschichtwiderständen, 7
- Millereffekt, 86

**N**

- Noise Factor, 35
- Noise Figure  $NF$ , 35

**O**

- Operationsverstärker
  - Ausgang ungleich Ausgang des OP's, 83
  - Brückenschaltung, 210
  - Idealer Operationsverstärker, 71
  - Impedanzwandler, 207
  - Schaltung ideal, invertierende Schaltung, 71
  - Schaltung ideal, nichtinvertierende Schaltung, 74
  - Schaltung ideal, Spannungsfolger, 75
  - Schaltung mit Ausgangswiderstand, 81
  - Schaltung real, 76

**P**

- Parallel- und Serienschaltungen von elektronischen Bauteilen, 159
  - Feldeffekttransistoren, 164
  - Operationsverstärker, 164

- Transistoren, 160
- Widerstände, 159

**Q**

- Quellenverschiebung, 15

**R**

- Rauschanpassung, 37, 93
- Rauschbandbreite  $f_R$ , 41
- Rauschen
  - $1/f$ -Rauschen, 1
  - äquivalente Eingangsräuschspannungsquelle, 51
  - äquivalente Eingangsräuschquelle, 33
  - Bodeverfahren, 20
  - Brown'sche Bewegung, 2
  - Der optimale Quellenwiderstand, 36
  - Dimensionierung von rauscharmen Schaltungen, 38
  - Eingangsräuschspannungsquelle, 51
  - Eingangsräuschstromquelle, 55
  - Excess-Noise, 7
  - Excessrauschdichte, 8
  - farbiges Rauschen, 1
  - Flicker-Noise, 7
  - Gesamtrauschen, 42
  - Induktive Sensoren, 62
  - Kapazitiver Sensor, 59
  - Korrelation, 13
  - Low Noise Design, 38
  - Noise Figure  $NF$ , 35
  - Quellenverschiebung, 15
  - Rauschanpassung, 37, 93
  - Rauschbandbreite  $f_R$ , 41
  - Rauschfaktor  $F$ , 35
  - Rauschindex  $NI$ , 8
  - Rauschleistung, 2
  - Rauschmaß  $NF$ , 35
  - Rauschmechanismen, 2
  - Rauschspannungsdichte, 1, 4
  - Rauschstromdichte, 4
  - Schrotrauschen, 6
  - Shot-Noise, 6
  - Signal-Rausch-Abstand  $S/N$ , 36
  - Stromrauschen, 7
  - Thermisches Rauschen, 2
  - Vernachlässigung kleiner Rauschgrößen, 12
  - Verstärkerrauschen, 33
  - weißes Rauschen, 6

- Rauschen in Kaskadenschaltungen, 153  
   Emitter–Emitter-Schaltung, 153  
   Kaskode-Schaltung, 154  
   Kollektor–Basisschaltung  
     (Differenzverstärker), 158  
   Kollektor–Emitter-Schaltung, 156  
   Schaltungen mit Feldeffekttransistoren, 158  
 Rauschfaktor  $F$ , 35  
 Rauschindex, 198, 206  
 Rauschindex  $NI$ , 8  
 Rauschleistung, 2  
 Rauschmaß  
   in Abhängigkeit vom Quellenwiderstand, 37  
   mit  $S/N$  ausgedrückt, 36  
 Rauschmaß  $NF$ , 35  
 Rauschmechanismen, 2  
 Rauschspannungsdichte, 1, 4  
 Rauschstromdichte, 4  
 Resonanz, 27, 69  
   Resonanzüberhöhung, 27, 69
- S**
- Schrotrauschen, 6  
 Shot-Noise, 6  
 Signal to Noise  $S/N$ , 36  
 Signal–Rausch–Abstand  $S/N$ , 36  
   am Ausgang, 36  
   am Eingang, 36  
 Signalbandbreite, 41  
 Sourceschaltung, 123  
   Gleichstrom-Arbeitspunkt, 123  
   Kleinsignalbetrachtung, 125  
   Rauschen, 127  
 Stromquelle mit Feldeffekttransistoren, 170  
 Stromquelle mit Transistor, 167  
   Innenwiderstand, 167  
   Kapazität, 169  
   Kapazität der Transistorstromquelle, 169  
 Stromquelle mit Transistoren  
   Rauschen, 170  
 Stromquelle mit Transistoren und  
   Operationsverstärker, 175  
   Innenwiderstand, 175  
   Rauschen, 176  
 Stromquellen, 167
- Stromrauschen, 7  
 Stromspiegel-Schaltungen, 177  
   einfacher Stromspiegel, Kapazität, 178  
   Rauschen, 178  
   Wilson-Stromspiegel, 179  
   Wilson-Stromspiegel, Innenwiderstand, 179  
 Stromspiegel-Schaltungen erweitert, 185  
 Stromspiegel-Schaltungen  
   einfacher Stromspiegel, 177  
   Widlar-Stromspiegel, 183  
   Widlar-Stromspiegel, Innenwiderstand, 183  
   Widlar-Stromspiegel, Kapazität, 184  
   Widlar-Stromspiegel, Rauschen, 185  
   Wilson-Stromspiegel, Kapazität, 181  
   Wilson-Stromspiegel, Rauschen, 182  
 Stromspiegel-Schaltungen erweitert  
   einfacher Stromspiegel, Rauschen, 186  
   Innenwiderstand, 185
- T**
- Thermisches Rauschen, 2  
 Transistor  
   Vergleich Bipolar- und Feldeffekttransistor,  
     105  
 Transistor als Diode, 165  
 Transistoren  
   Einsatz verschiedener aktiver Bauteile, 107  
   Leistungsanpassung, 93  
   Rauschanpassung, 93  
   Rauschen bei höheren Frequenzen, 97  
   Rauschen bei mittleren Frequenzen, 89  
   Rauschen bei tiefen Frequenzen, 95  
   Rauschen im gesamten Frequenzbereich, 99  
   Rauschspannung  $u_{NT_r}$ , 89, 90  
   Rauschstrom  $i_{NT_r}$ , 89, 92
- U**
- Übertrager, 159
- V**
- Vernachlässigung kleiner Rauschgrößen, 12  
 Verstärkerrauschen, 33
- W**
- Weißes Rauschen, 6