

Matthias Viehmann: Operationsverstärker – Grundlagen, Schaltungen, Anwendungen

2., überarbeitete und erweiterte Auflage
Stand: August 2019

■ Liste der Formelzeichen, Symbole und Abkürzungen

Hinweise

- Angabe der Maßeinheit in Klammern
- A. o. M. = Angabe ohne Maßeinheit; Erwähnung nur bei einer Alternative mit Maßeinheit
- Formelzeichen, Symbole und Abkürzungen aus den im Buch verwendeten Datenblättern sind nicht vollständig aufgelistet.

Formelzeichen

A	Fläche (m^2)
$A(\omega); A ; G(j\omega) $	Amplitudengang
$A(\lambda)$	spektrales dekadisches Absorptionsmaß
A_g	Verstärkung bei Grenzfrequenz (A. o. M.; dB)
A_0	Verstärkung bei 0 Hz für Gleichgröße (A. o. M.; dB)
A_∞	Verstärkung bei Frequenz gegen unendlich (A. o. M.; dB)
$a_i; b_i$	Koeffizienten Filterentwurf
a_V	Dämpfungsmaß für Spannung (dB)

B	Bandbreite (Hz)
B	Gleichstromverstärkung Bipolartransistor
b	Abstand (m)
b_i	Bitkoeffizient (0 oder 1)
C	Kapazität (F)
$C_B; C_s$	Blockkondensator; getakteter (geschalteter) Kondensator (F)
C_{MG}	Messgliedkoeffizient
C_{MK}	Messkettenkoeffizient
C_q	Quarzkapazität (F)
C_{th}	Wärmekapazität (J/K)
c_F	Federkonstante (N/ μ m)
c_T	Steifigkeit (N/ μ m)
CMRR	Common Mode Rejection Ratio, Gleichtaktunterdrückung (dB)
CMV	Common Mode Voltage Isolation (V)
d	Dicke (m)
d_{33}	piezoelektrische Konstante (m/V)
$D_{DAU}; D_{ADU}$	digitales Codewort DAU; ADU
DR	Dynamic Range, Dynamikbereich (dB); Dose Rate (rad/s)
E	elektrische Feldstärke (V/m)
e	Regelabweichung
ER	Event Rate (h^{-1})
ENOB	Effective Number of Bits (Bits)
F	Kraft (N)
F	Rauschfaktor, Rauschzahl
F_{dB}	Rauschmaß (dB)
$F(p)$	Bildfunktion

$F(t)$	Ausfallwahrscheinlichkeit (%)
F_T	Teilerfaktor
$f(t)$	Zeitfunktion
f_a	Ausgangsfrequenz (Hz)
f_{CLK}	Clock, Taktfrequenz (Hz)
f_g	Grenzfrequenz (Hz)
f_{gIFK}	erste Grenzfrequenz mit Frequenzgang-Kompensation (Hz)
f_{Ref}	Referenzfrequenz (Hz)
f_r	Resonanzfrequenz (Hz)
f_s	Signalfrequenz (Hz)
f_s	Schaltfrequenz (Hz)
f_{SZ}	Frequenz Sägezahnsignal (Hz)
f_T	Transitfrequenz (Hz)
f_{180}	Frequenz bei Phasenverschiebung -180° (Hz)
g	Schleifenverstärkung, Loop Gain (A. o. M.; dB)
$G(j\omega); \underline{A}(j\omega)$	Frequenzgang oder komplexe Übertragungsfunktion
$G(p)$	Übertragungsfunktion
$G(S)$	komplexe Übertragungsfunktion mit Substitution $S = j \frac{\omega}{\omega_g}$
G_R	Übertragungsfunktion Regler
G_S	Übertragungsfunktion erweiterte Regelstrecke
G_{th}	thermischer Leitwert (W/K)
GBP	Gain Bandwith Product, Verstärkungs-Bandbreiten-Produkt (Hz)
$h(t)$	Übergangsfunktion
HKI _{xxx}	Kennzeichnung House-Keeping-Signale der Strommessung Satellit BIROS: HKIBA, HKISO, HKINL, HKISX, HKIBUS, HKINVS

HKSG	Kennzeichnung House-Keeping-Signale der Batterieüberwachung Satellit BIROS
HKU _{XXX}	Kennzeichnung House-Keeping-Signale der Spannungsmessung Satellit BIROS: HKUPOB, HKULSX
I	Strom (A)
I_a	Ausgangsstrom (A)
I_B	Input Bias Current OPV, Eingangsruhestrom (A)
I_B	Basisstrom Bipolartransistor (A)
I_{Bat}	Batteriestrom (A)
$I_C; I_C$	Kondensatorstrom; Kollektorstrom (A)
I_{CS}	Kollektorsättigungsstrom (A)
I_D	Diodenstrom (A)
I_E	Emitterstrom (A)
I_K	Konstantstrom (A)
I_{OS}	Input Offset Current, Eingangsoffsetstrom (A)
$I_{last}; I_{RL}$	Strom durch Last; durch Lastwiderstand (A)
$I_p; I_n$	Strom am nichtinvertierenden OPV-Eingang; am invertierenden OPV-Eingang (A)
I_q	Querstrom (A)
I_R	Strom durch ohmschen Widerstand (A)
I_S	Sättigungsstrom (A)
I_{SC}	Short Circuit Current, Kurzschlussstrom (A)
IMR	Isolation Mode Rejection (dB)
IMV	Isolation Mode Voltage (V)
K	Rückkopplungsfaktor
K	Klirrfaktor (%)
$K_P; K_I; K_D$	Parameter P-Glied; I-Glied; D-Glied
k	Proportionalitätsfaktor DMS

k	piezoelektrische Empfindlichkeit (As/N)
k	Boltzmann-Konstante (J/K)
k_s	Verhältnissfaktor SC-Filter
L	Induktivität (H)
L, l	Länge (m)
L_{Uabs}	absoluter Spannungspegel, Bezug auf 1 V (dBV)
LET	Linear Energy Transfer $\left(\text{MeV} \frac{\text{cm}^2}{\text{mg}} \right)$
m	Verhältnis zwischen Außen- und Innenwiderstand Thermogenerator; Aussteuerungsgrad Leistungsverstärker
MTBE	Mean Time Between Event (h)
MTBF	Mean Time Between Failure (h)
MTTF	Mean Time To Failure (h)
MTTFF	Mean Time To First Failure (h)
n	Anzahl; Bitanzahl; Filterordnung
p	Druck; Sauerstoff-Partialdruck (bar)
P_{e}	elektrische Gleichleistung an einer Last (W)
P_{a}	elektrische Leistung am Außenwiderstand (W)
P_{H}	elektrische Hilfsleistung (W)
P_{JK}	Kaltseitenanteil der Joule-Wärme (W)
P_{JW}	Warmseitenanteil der Joule-Wärme (W)
P_{K}	Kälteleistung (W)
P_{L}	Wärmestrom (W)
P_{PK}	Peltier-Kälte auf der Warmseite (W)
P_{PW}	Peltier-Wärme auf der Kaltseite (W)
P_{S}	Signalleistung (W)
P_{T}	Verlustleistung am Transistor (W)

P_{TK}	Kaltseitenanteil der Thomson-Wärme (W)
P_{TW}	Warmseitenanteil der Thomson-Wärme (W)
P_{tot}	maximal zulässige Verlustleistung (W)
P_V	elektrische Verlustleistung (W)
P_W	zugeführte Wärmeleistung (W)
PBW	Power Bandwidth, Leistungsbandbreite (Hz)
PSRR	Power Supply Rejection Ratio, Betriebsspannungsdurchgriff (dB)
Q	Ladung (C)
Q	Güte
R	Widerstand (Ω)
$R(t)$	Überlebenswahrscheinlichkeit, Zuverlässigkeit (%)
$R_a; R_i$	Außenwiderstand; Innenwiderstand (Ω)
R_q	Innenwiderstand Quarz (Ω)
R_{Pt}	Widerstand Platin-Temperatursensor (Ω)
$R_{th}; R_{thjc}; R_{thcs}; R_{thsa}$	Wärmewiderstand; Junction-Case; Case-Heat Sink; Heat Sink-Ambient (K/W)
r_a	differentieller Ausgangswiderstand (Ω)
r_D	Differenzeingangswiderstand zwischen den OPV-Klemmen (Ω)
r_e	differentieller Eingangswiderstand (Ω)
r_{G1}	Gleichtakteingangswiderstand Klemme gegen Masse (Ω)
SNR	Signal-Noise-Ratio, Signal-Rausch-Abstand (dB)
SOC	State of Charge (Ah)
SR	Slew Rate (V/ μ s)
$T; \Delta T$	absolute Temperatur; Temperaturdifferenz (K)
T	Schwingungsdauer (s)
$T_i; T_D$	Integral- oder Nachstellzeit; Differential- oder Vorhaltezeit (s)

T_{krit}	kritische Periodendauer (s)
T_{SZ}	Periodendauer Sägezahnspannung (s)
T_t	Totzeit (s)
T_V	Tastverhältnis
$T_W; T_K$	Temperatur Warmseite; Temperatur Kaltseite (K)
$T_1; T_2$	Zeitkonstanten Regler (s)
THD	Total Harmonic Distortion (%; dB)
TID	Total Ionizing Dose (Gy; rad)
t_{Aus}	Zeit des ausgeschalteten Zustands (s)
$t_{\text{Ein}}; t_{\text{IH}}$	Zeit des eingeschalteten Zustands (s)
t_s	Settling Time (s)
U	Spannung (V)
\underline{U}	komplexe Spannung (V)
\hat{U}	Amplitudenwert Spannung (V)
\bar{U}	arithmetischer Mittelwert Spannung (V)
U_a	Ausgangsspannung (V)
$U_{a(p)}; U_{a(n)}$	ausgangsseitiger Wirkungsanteil des nichtinvertierenden Eingangs; des invertierenden Eingangs (V)
$+U_{\text{amax}}; -U_{\text{amax}}$	Maximalwert der positiven Ausgangsspannung; der negativen Ausgangsspannung (V)
U_{AK}	Spannung Anode-Kathode (V)
U_{AFE}	Ausgangsspannung AFE (V)
$+U_B; -U_B$	positive Betriebsspannung; negative Betriebsspannung (V)
U_{Bat}	Batteriespannung (V)
U_{BE}	Basis-Emitter-Spannung (V)
U_C	Kondensatorspannung (V)
U_{CE}	Kollektor-Emitter-Spannung (V)

U_{Diff}	Differenzspannung (V)
U_e	Eingangsspannung (V)
U_{EB}	Spannung Energy Bus (V)
U_{F}	Flussspannung (V)
$U_{\text{FS}}; U_{\text{FSR}}$	Maximalwert (Full Scale) Spannung; Full Scale Range (V)
U_{Gl}	Gleichtaktspannung (V)
U_{H}	Schalthysterese (V); Hall-Spannung (V)
$U_{\text{Last}}; U_{\text{RL}}$	Spannung an Last; an Lastwiderstand (V)
U_{LSB}	analoger Spannungswert LSB (V)
U_{M}	Messspannung (V)
$U_{\text{p}}; U_{\text{n}}$	Spannung am nichtinvertierenden OPV-Eingang gegen Masse; am invertierenden Eingang (V)
U_{PWM}	Wert der pulsweitenmodulierten Spannung (V)
U_{q}	piezoelektrisch erzeugte Quarzspannung (V)
U_{R}	Spannung am ohmschen Widerstand (V)
$U_{\text{r}}; U_{\text{R,r}}$	Rauschspannung; Rauschspannung am leerlaufenden Widerstand $(V/\sqrt{\text{Hz}})$
$U_{\text{Ref}}; U_{\text{Ref-u}}; U_{\text{Ref-o}}$	Referenzspannung; untere; obere (V)
U_{S}	Sondenspannung; Sensorspannung (V)
U_{SZ}	Sägezahnspannung (V)
U_{T}	Temperaturspannung (V)
U_{th}	Thermospannung (V)
U_{Z}	Zusatzspannung; Z-Spannung (V)
$u; u_{\text{r}}$	Stellgröße; tatsächlich wirkende Stellgröße
\ddot{u}	Übersetzungsverhältnis Transformator
$V_{\text{OS}}; U_{\text{OS}}$	Eingangsoffsetspannung (V)

V_{Diff}	Differenzverstärkung, Open Loop Gain (A. o. M.; dB)
V_{Gl}	Gleichtaktverstärkung (A. o. M.; dB)
V_{L}	Leerlaufverstärkung, Open Loop Gain (A. o. M.; dB)
V_{U}	Verstärkung des rückgekoppelten Systems, Closed Loop Gain (A. o. M.; dB)
w	Führungsgröße Regelung
y	Regelgröße
y_{m}	Messwert der Regelgröße
y_{S}	Zielgröße Regelung
Z	Impulszahl; Dezimalwert
z	Störsignal
z	Güteziffer TEG (1/K)
\underline{Z}	Impedanz (Ω)
α	Seebeck-Koeffizient (V/K)
ε	Dehnung DMS
ε_0	Dielektrizitätskonstante (As/Vm)
ε_r	relative Permittivitätszahl
$\varphi; \varphi_{\text{OPV}}$	Phasenverschiebung; Phasenverschiebung OPV (Grad)
φ_{g}	Phasenverschiebung bei Grenzfrequenz (Grad)
φ_{R}	Phasenreserve, Phasenrand (Grad)
$\varphi(\omega)$	Phasengang
η	Wirkungsgrad (A. o. M.; %)
λ	Lambda-Wert Sonde
λ	Wellenlänge (m)
$\lambda(t)$	Ausfallrate (1/h; FIT)
ϑ_{a}	Außentemperatur/Ambient ($^{\circ}\text{C}$)
ϑ_{c}	Gehäusetemperatur/Case ($^{\circ}\text{C}$)

ϑ_j	Sperrschichttemperatur/Junction (°C)
ϑ_s	Kühlkörpertemperatur/Heat Sink (°C)
ρ	spezifischer Widerstand (Ωm)
τ	Zeitkonstante (s)
τ	Thomson-Koeffizient (V/K)
τ_s	Integrationszeitkonstante (s)
τ_{th}	thermische Zeitkonstante (s)
ω	Kreisfrequenz (Hz)
ω_g	Grenzkreisfrequenz, Eck- oder Knickkreisfrequenz (Hz)

Symbole

B	Bit
D	Diode
GaAs	Galliumarsenid
GaInP	Galliumindiumphosphid
GaN	Galliumnitrid
Ge	Germanium
NiH ₂	Nickel-Hydrogen, Nickel-Wasserstoff
P	Potentiometer; Knotenpunkt
Pb	Plumbum, Blei
Pb-Zr-Ti, PZT	Blei-Zirkon-Titan-Mischoxide
Pt	Platin
PTFE	Polytetrafluorethylen
Q	Quarz
QS _I ; QS _{II} ; Q _{III} ; S _{IV}	Klassenbezeichnungen PMC
S	Schalter
SiC	Siliziumkarbid

T;Q	Transistor
W	Wiper, Schleifer
$\Sigma\Delta$	Sigma-Delta(-Umsetzer)

Abkürzungen

ACFB	Autocorrection Feedback
AD	Analog Devices
ADC; ADU	Analog-Digital-Converter; Analog-Digital-Umsetzer
AFE	Analog-Front-End
AGC	Automatic Gain Control
AMV	Astabiler Multivibrator
AOCS	Altitude and Orbit Control Subsystem
AVANTI	Autonomous Vision Approach Navigation and Target Identification
BIRD	Bispectral InfraRed Detection
BIROS	Bispectral InfraRed Optical System
BMS	Batterie-Management-System
BMV	Bistabiler Multivibrator
BPSK	Binary Phase Shift Keying
BB	Burr-Brown
BP	Band-Pass, Bandpass
CC	Current-Current
CCM	Continuous Current Mode
CCO	Current Controlled Oscillator
CDMA	Code Division Multiple Access
CFK	karbonfaserverstärkter Kunststoff
CMOS	Complementary Metal-Oxide-Semiconductor
CV	Current-Voltage
DAC; DAU	Digital-Analog-Converter; Digital-Analog-Umsetzer
DCS	Dynamic Clock Scaling
DFD	Deutsches Fernerkundungsdatenzentrum
DG	Diagnosegrundsatz
DGL	Differentialgleichung
DIP	Dual Inline Package
DLR	Deutsches Zentrum für Luft- und Raumfahrt e. V.
DMS	Dehnungsmessstreifen
DPM	Dynamic Power Management
DUT	Device under Test

DVS	Dynamic Voltage Scaling
EB	Energy Bus
ECSS	European Cooperation for Space Standardization
ECU	Electronic Control Unit
EEG	Elektroenzephalografie
EKG	Elektrokardiografie
EMC; EMV	Electromagnetic Compatibility; Elektromagnetische Verträglichkeit
EMS	Energiemanagementsystem
EOL	End of Life
EPM	Earth Pointing Mode
EPS	Electrical Power Subsystem
ESA	European Space Agency
ESD	Electrostatic Discharge
FET	Field-Effect-Transistor, Feldeffekttransistor
FF	Flip-Flop
FG	Funktionsgruppe
FIR	Finite Impulse Response
FIT	Failure In Time
FK	Frequenzgang-Kompensation
FMEA	Failure Mode and Effects Analysis
FPGA	Field Programmable Gate Array
FSR	Full Scale Range
FTA	Fault Tree Analysis
GEO	Geostationary Earth Orbit
GFK	glasfaserverstärkter Kunststoff
GIC	General Impedance Converter
GND	Ground, Masse
GPS	Global Positioning System
GSM	Global System for Mobile Communications
GSOC	German Space Operations Center
HIL	Hardware-in-the-Loop
HP	High-Pass, Hochpass
HSN	Hochschule Nordhausen
HSRS	Hot Spot Recognition System
HTW	High Torque Wheel
HV	High Voltage, Hochvolt
IC; IS	Integrated Circuit; Integrierte Schaltung
IIR	Infinite Impulse Response
IMU	Inertial Measurement Unit

INA, In-Amp	Instrumentation Amplifier
IR	Infrarot
ISS	International Space Station
JEDEC	Joint Electron Device Engineering Council; aktuell: Solid State Technology Association
LDO	Low-Dropout
LEO	Low Earth Orbit
LFCSP	Lead Frame Chip Scale Package
LP	Low-Pass, Tiefpass
LSB	Least Significant Bit
LTC	Linear Technology Corporation
MDAC	Multiplying Digital-Analog-Converter
MEMS	Micro-Electro-Mechanical System
MIL	Model-in-the-Loop; United States Military Standard
MMV	Monostabiler Multivibrator
MORABA	Mobile Raketenbasis
MOSFET	Metal-Oxide-Semiconductor Field-Effect-Transistor
MSB	Most Significant Bit
MSOP	Microsmall Outline Package
MUX	Multiplexer
NASA	National Aeronautics and Space Agency
NIC	Negative Impedance Converter
NP	Nullpunkt
NRND	Not recommended for new designs
OBC	On Board Computer
OBD	On-Board-Diagnose
OK	Offsetspannungs-Kompensation
OPA; Op Amp; OPV	Operational Amplifier; Operationsverstärker
OSIRIS	Optical Space Infrared Downlink System
OTA	Operational Transconductance Amplifier
OVP	Overvoltage Protection
PCB	Printed Circuit Board (unbestückte Leiterplatte)
PCBA	Printed Circuit Board Assembly (bestückte Leiterplatte)
PCDU	Power Control & Distribution Unit
PDM	Puls Duration Modulation, Pulsbreitenmodulation
PFC	Power Factor Correction
PFD	Phase Frequency Detector
PGA	Programmable Gain Amplifier; Pin Grid Array
PID	Proportional-Integral-Differential

PIL	Processor-in-the-Loop
PLL	Phase Locked Loop
PMC	Power Management Classification
PMIC	Power-Management-IC
PSK	Phase Shift Keying
PWM	Puls Width Modulation, Pulsweitenmodulation
PZT	Piezoelektrischer Translator
QAM	Quadrature Amplitude Modulation
QFN	Quad Flat No Leads
REXUS/BEXUS	Rocket/Balloon Experiments for University Students
RGB	Rot-Grün-Blau
RHA	Radiation Hardness Assurance
RoHS	Restriction of Hazardous Substances
RRIO	Rail-to-Rail-Input-Output
RSA	Russian Space Agency
RTC	Real Time Clock
RTD	Resistance Temperature Detector
RTG	Radio-Isotopen-Generator
SAC	Smart Analog Combo
SAR	Successive-Approximation-Register
SC	Switched Capacitor
SED	Student Experiment Documentation
SEE	Single Event Effect (SEU, SEFI, SET, SEL, SEGR, SEB)
SEPIC	Single Ended Primary Inductance Converter
S/H; T/H	Sample-Hold; Track-Hold
SIL	Software-in-the-Loop
SIP	Single Inline Package
SMD; SMT	Surface Mounted Devices; Surface Mounted Technology
SMS	Short Message Service
SNSA	Swedish National Space Agency
SOA	Safe Operating Area
SOIC	Small Outline Integrated Circuit
SOT	Small Outline Transistor Package
SPFM	Sun Pointing Fix Mode
SPI	Solder Paste Inspection
SSC	Swedish Space Corporation
STD	Standard
TCS	Thermal Control Subsystem
TEG	Thermoelectric Generator

TEM	Technisches Energiemanagement
TET	Technologie-Erprobungs-Träger
THT	Through Hole Technology
TI	Texas Instruments
TMR	Tunnelmagnetoresistance
TPM	Target Pointing Mode
TSOT	Thin Small Outline Transistor Package
TSSOP	Thin Shrink Small Outline Package
UHF	Ultra High Frequency
UMTS	Universal Mobile Telecommunications System
UV	Ultraviolett
VC	Voltage-Current
VCO	Voltage Controlled Oscillator
VCXO	Voltage Controlled Xtal Oscillator
VGA	Variable Gain Amplifier
VHF	Very High Frequency
VV	Voltage-Voltage
WCDMA	Wide Band Code Division Multiple Access
WLCSF	Wafer Level Chip Scale Package