



Leseprobe

Matthias Viehmann

Operationsverstärker

Grundlagen, Schaltungen, Anwendungen

ISBN (Buch): 978-3-446-43053-2

ISBN (E-Book): 978-3-446-44895-7

Weitere Informationen oder Bestellungen unter

<http://www.hanser-fachbuch.de/978-3-446-43053-2>

sowie im Buchhandel.

Vorwort

Wenn Sie sich in diesem Moment einmal umsehen, werden Sie feststellen, dass Sie von zahlreichen elektronischen Anordnungen umgeben sind. Die Elektronik ist in nahezu jedem Gerät notwendig – und ein Operationsverstärker ist in den meisten Fällen als einzelnes Bauelement oder eingebettet in Strukturen enthalten. Selten stellt man sich die Frage, was das für Menschen sind, die diese Technik entwickelten. Sie haben eine analytische Denkweise, gehen systematisch an das Lösen von Aufgabenstellungen heran, haben umfangreiches Fachwissen und beherrschen ihre Entwicklungstools. Eine nachhaltige Gestaltung des Lernprozesses zur Erlangung von umfassendem Wissen sowie die Ausprägung von Fähigkeiten und Fertigkeiten für die Anwendung des Fachwissens gelingen am besten mit einem Motivator – der Neugier. *„Geht es doch bei der Neugierde um nichts weniger als um die Triebfeder dessen, was der Mensch von allen Lebewesen auf der Erde am besten kann, womit er deswegen auch seine meiste Zeit verbringt und was er ohnehin am liebsten macht: Lernen!“* Manfred Spitzer, Wulf Bertram, 2012, [21]. Aus persönlicher Erfahrung heraus möchte ich zwei Aspekte ergänzen – die Freude und den Stolz. Für den Ingenieur/die Ingenieurin gibt es kaum einen schöneren Moment als den, in welchem eine selbst entwickelte Technik in Betrieb genommen wird und diese funktioniert. Eine derartige Freude teile ich immer wieder gern mit den Studierenden.

Ich wünsche mir, dass dieses Buch die Neugier auf den Operationsverstärker weckt und seinen Beitrag zur Vergrößerung des Anhängerkreises dieses Bauelements mit seinen wunderbar idealen Eigenschaften und seiner Applikationsvielfalt leistet. Als Einstieg finden Sie im Kapitel 1 einen kurzen Abriss über die Geschichte des Operationsverstärkers sowie Aussagen über das Anliegen und die Strukturierung des Buches. Dem Einstieg folgen das Kapitel 2 mit Grundlagen zum Operationsverstärker, das Kapitel 3 mit anwendungsübergreifenden Ausführungen über Kühlmaßnahmen und Zuverlässigkeit sowie die Kapitel 4 bis 11 mit Anwendungen und teilweise integriertem Überblick über das Anwendungsgebiet. Mit dem Werk möchte ich Sie nicht nur mit dem Operationsverstärker und dem „Schaltungsblick“ vertraut machen, es soll auch Respekt gegenüber den Personen zum Ausdruck bringen, die sich in der Anfangszeit des Bauelements bis in die Gegenwart hinein mit ihren Ideen und ihrer Kreativität in seine Entwicklung eingebracht haben – 50 Jahre integrierter Operationsverstärker sind ein würdiger Anlass.

Mein Dank gilt dem Fachbuchverlag Leipzig/Carl Hanser Verlag, insbesondere Frau Franziska Jacob und Frau Mirja Werner für ihre kompetente und motivierende Begleitung als Lektorinnen sowie Frau Franziska Kaufmann für die Buchgestaltung. Ich danke Alexander Merkel, Alexander Altenburg, Christina Kloß und Susann Petzold für die Hilfe bei der Er-

stellung der zahlreichen Abbildungen. Für fachliche Hinweise bedanke ich mich bei Mario Wolf, Klaus Elbe, Marco Hartung, Professor Klaus-Peter Neitzke, Birgit Lustermaun und Ilka Schumann sowie für die Genehmigung der Bildverwendungen bei den Firmen Analog Devices, Texas Instruments und Linear Technology Corporation. Meiner Familie möchte ich für die Unterstützung einen besonders herzlichen Dank aussprechen.

Eine Liste mit verwendeten Formelzeichen, Symbolen und Abkürzungen ist unter www.hanser-fachbuch.de/buch/Operationsverstärker/9783446430532 hinterlegt. Hinweise auf Fehler im Buch oder gestalterische Empfehlungen sind jederzeit willkommen.

Nordhausen, im August 2016

Matthias Viehmann

Inhalt

1	Einführung	11
1.1	Historischer Abriss über den Operationsverstärker	11
1.2	Pädagogische Zielstellungen und didaktisches Konzept	12
2	Grundlagen des Operationsverstärkers	14
2.1	Eigenschaften	14
2.1.1	Wirkungsweise und Kenngrößen	14
2.1.2	Gehäusevarianten	29
2.2	OPV-Grundsätze und Schaltungsanalyse	31
2.3	Verstärkergrundsaltungen	33
2.3.1	Prinzip der Gegenkopplung	33
2.3.2	Nichtinvertierender Verstärker und Spannungsfolger	36
2.3.3	Invertierender Verstärker	38
2.4	Kompensationsmaßnahmen und Bauelementoptimierung	39
2.4.1	Eingangsruestrom-Kompensation	40
2.4.2	Eingangsoffsetspannungs-Kompensation	41
2.4.3	Frequenzgang-Kompensation	42
2.4.4	Optimierung und Funktionsvielfalt	45
3	Anwendungen des Operationsverstärkers	46
3.1	Applikationsvielfalt	46
3.2	Kühlmaßnahmen	47
3.3	Zuverlässigkeitsbetrachtungen	53
4	Analoge Rechenschaltungen	62
4.1	Addierer	62
4.2	Subtrahierer	65
4.3	Integrierer	69
4.4	Differenzierer	73
4.5	Logarithmierer	76
4.6	Potenzierer	81
4.7	Multiplizierer und Dividierer	84

5	Schalter	90
5.1	Komparator	90
5.2	Fensterkomparator	93
5.3	Schmitt-Trigger	95
6	Schwingschaltungen	101
6.1	Astabiler Multivibrator mit Schmitt-Trigger	101
6.2	Dreieck-Rechteck-Oszillator	106
6.3	Spannungsgesteuerter Oszillator (VCO)	109
6.3.1	VCO1 mit Subtrahierer	110
6.3.2	VCO2 mit summierendem Integrierer	113
6.3.3	VCO3 mit unsymmetrischer Betriebsspannung	116
6.4	Phasenregelkreis (PLL)	121
6.5	Pulsweitenmodulator	125
7	Konditionier- und Umsetzungsschaltungen	128
7.1	Instrumentationsverstärker	128
7.2	Phasenschieber	132
7.3	Gleichrichter	136
7.4	Analog-Digital- und Digital-Analog-Umsetzer	139
7.4.1	Analog-Digital-Umsetzer	142
7.4.2	Digital-Analog-Umsetzer	148
7.5	Ladungsverstärker	152
7.6	Fotoempfänger	159
7.7	Negative Impedance Converter und Gyrator	162
7.7.1	Negative Impedance Converter	162
7.7.2	Gyrator	163
7.8	Einstellbare Verstärker und Widerstände	166
7.8.1	Einstellbare Verstärker	167
7.8.2	Einstellbare Widerstände und Variation mit DAU	169
8	Reglerschaltungen	176
8.1	Überblick	176
8.1.1	Regelkreis	178
8.1.2	Beschreibungsmöglichkeiten von Systemen	180
8.2	Reglertypen und Schaltungsbeispiele	182
8.3	Reglerentwurf am Beispiel PID	190
8.3.1	Verfahren	191
8.3.2	Reglerbeispiel	192
9	Filterschaltungen	195
9.1	Überblick	195
9.2	Aktive RC-Filter	196

9.2.1	Filter mit Einfachgegenkopplung	200
9.2.2	Filter mit Mehrfachgegenkopplung	201
9.2.3	Filter mit Einfachmitkopplung	206
9.3	Switched-Capacitor-Filter	207
9.3.1	Funktionsprinzip	207
9.3.2	Beispiel SC-Filter 2. Ordnung	209
9.3.3	Integrierte SC-Filter	211
10	Stabilisierungsschaltungen und Energiemanagement	215
10.1	Überblick Spannungsstabilisierung	215
10.1.1	Prinzip der Stabilisierung mit OPV	218
10.1.2	Beispiel Universalspannungsregler	222
10.2	Energy Harvesting am Beispiel Thermogenerator	225
10.3	Energiemanagementsystem mit der Power Management Classification	231
10.4	Konstantstromquellen	237
11	Leistungs-Operationsverstärker	241
11.1	Aufbau und Eigenschaften	241
11.2	Betriebsvarianten	244
11.2.1	Symmetrische Betriebsspannung	244
11.2.2	Unsymmetrische Betriebsspannung	245
11.2.3	Brückenschaltung	248
11.3	Rückkopplungs-Ersatzschaltung	250
	Liste der Übungen	255
	Literatur	257
	Index	261

2

Grundlagen des Operationsverstärkers

Im folgenden Kapitel werden der Aufbau und die Wirkungsweise des Operationsverstärkers erläutert. Es erfolgt ein Vergleich zwischen dem idealen und realen Bauelement sowie die Erläuterung notwendiger Maßnahmen zur Reduzierung von Fehlereinflüssen. Ausgewählte Methoden zur Schaltungsanalyse, das Prinzip der Gegenkopplung und die Verstärkergrundschaltungen werden beschrieben.

■ 2.1 Eigenschaften

2.1.1 Wirkungsweise und Kenngrößen

Der Operationsverstärker (OPV, OV), Operational Amplifier (Op Amp, OPA), ist ein analoges, integriertes Bauelement als direkt gekoppelter, mehrstufiger Gleichspannungsverstärker. Aufgrund der nahezu idealen Eigenschaften, insbesondere seiner hohen Leerlaufverstärkung mit dem anwendbaren Gegenkopplungsprinzip, und seines Variantenreichtums ergibt sich eine sehr große Anwendungsvielfalt. Bereits an dieser Stelle soll auf weitere Literatur zu Grundlagen und Anwendungen hingewiesen werden, siehe beispielsweise [3], [4], [5], [6], [8], [10], [20], [22]. Das Kapitel 2 des vorliegenden Buches beschreibt die wesentlichen Grundlagen des Bauelements.

Aufbaustruktur, Schaltzeichen, Betriebsspannungen

Aus technologischer Sicht können die Elemente des monolithisch hergestellten Operationsverstärkers von uni- und/oder bipolarem Charakter sein, typisch in einer internen, dreistufigen **Struktur** angeordnet. Das Bild 2.1 zeigt die verallgemeinerte Anordnung mit den mindestens vorhandenen Anschlüssen. Je nach OPV- und Gehäusevariante können noch ein Masseanschluss, Anschlüsse zur Fehlerkompensation (Offsetspannungs-Kompensation, Frequenzgang-Kompensation), siehe Abschnitt 2.4, oder vervielfachte Anschlüsse (Mehrfachgehäuse) hinzukommen. Bei den Stufen handelt es sich um die Differenzeingangsstufe, die Treiber- oder Zwischenstufe und die Ausgangsstufe. Das Produkt ihrer Spannungsverstärkungen ergibt die sehr hohe Leerlaufverstärkung (Open Loop Gain) des OPV. Neben den Verstärkerstufen sind weitere Teilschaltungen enthalten, beispielsweise zur Spannungs- und Stromversorgung, zur Optimierung des An- und Aussteu-

erbereiches, zur dynamischen Stabilisierung oder als Schutzschaltungen – dazu später mehr.

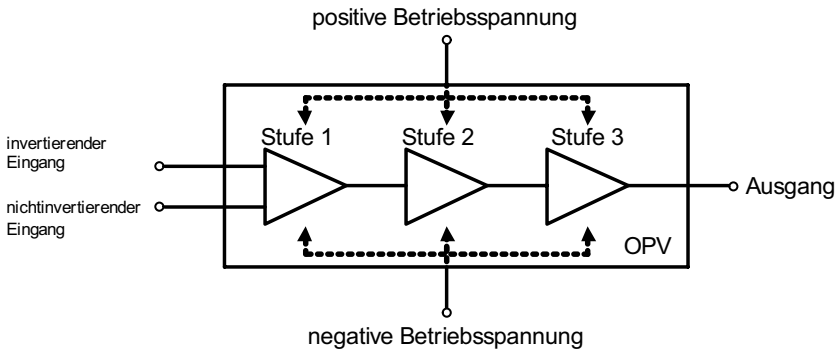


Bild 2.1 Allgemeine dreistufige Struktur des OPV

Die Betrachtung des Operationsverstärkers als Black Box führt zum **Schaltzeichen**. Im Bild 2.2 sind die beiden gebräuchlichen Varianten zu sehen. Die dreieckige (ältere) Form kennzeichnet die Signalflussrichtung unmittelbar, die rechteckige Variante, siehe EN 60 617-13:1993, [S9], besitzt kleine Symbole zur Kennzeichnung eines Verstärkers mit (ideal) unendlicher Leerlaufverstärkung. Im Regelfall sind der nichtinvertierende und invertierende Eingang (ideal 180° Phasenverschiebung zum Ausgang) sowie der Ausgang eines normalen VV-Typen (siehe Tabelle 2.1) angedeutet. Die Kennzeichnung eines anderen OPV-Typen und weitere Anschlüsse, beispielsweise für die Betriebsspannungen oder die Kompensationsmaßnahmen, werden bei Bedarf hinzugefügt. Im Buch wird die dreieckige Form benutzt.

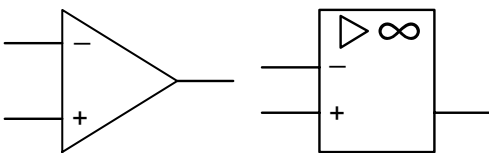


Bild 2.2
Dreieckiges und rechteckiges Schaltzeichen, [S9]

Ein Operationsverstärker benötigt eine **positive Betriebsspannung** $+U_B$ und eine potentialmäßig niedrigere, **negative Betriebsspannung** $-U_B$. Das Vorhandensein der Versorgung wird in der Regel vorausgesetzt, sodass die Anschlüsse der Betriebsspannungen im Schaltzeichen und in Schaltungen nicht immer dargestellt sind. Man unterscheidet zwei Beschaltungsvarianten: a) symmetrische Betriebsspannung mit positiver und negativer Spannung sowie b) unsymmetrische Betriebsspannung (Single Supply) mit positiver Spannung und Masse, siehe auch Kapitel 11. Ein Single-Supply-OPV ist für den Betrieb mit unsymmetrischer (teilweise kleiner) Betriebsspannung optimiert und lässt sich prinzipiell auch symmetrisch betreiben. Bei der symmetrischen Betriebsspannung ist durch die Serienschaltung zweier Spannungsquellen und mittigen Abgriff zwischen ihnen ein Massepotential als Bezugspunkt zu bilden. Die Versorgungsvarianten sind im Bild 2.3 dargestellt, wobei auch eine Skizze zur Beschaltung eines Doppelnetzteils (zwei unabhängige

Spannungsquellen) für die Erzeugung von $\pm U_B$ enthalten ist. Darüber hinaus sind die Blockkondensatoren C_{B1} und C_{B2} am Betriebsspannungsanschluss angedeutet. Die Betriebsspannungszuführungen (Leiterbahnen, Backplane-Verdrahtung) haben eine längenabhängige Induktivität, die im dynamischen Betrieb zu Spannungsabfällen und damit zu Betriebsspannungsschwankungen am OPV führt. Blockkondensatoren sorgen für den Schwankungsausgleich. Sie werden dicht am Schaltkreis eingesetzt, meist bestehend aus einem Elektrolytkondensator (geringer Widerstand bei niedrigen Frequenzen, durch parasitäre Induktivität Zunahme mit steigender Frequenz) und einem keramischen Kondensator (geringer Widerstand auch bei hohen Frequenzen). Teilweise sind zu den Blockkondensatoren Hinweise im Datenblatt zu finden.

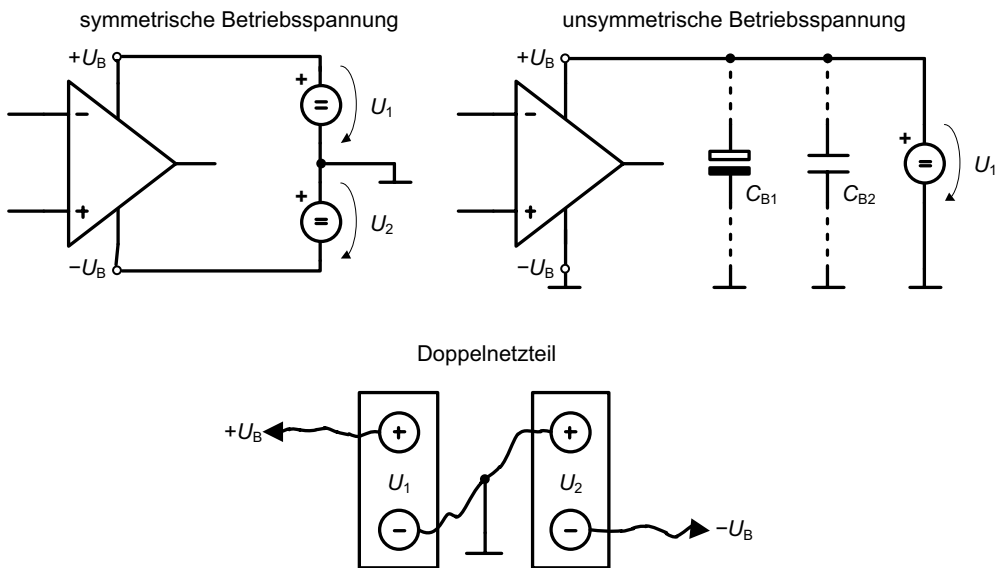


Bild 2.3 Versorgungsvarianten



Reihenfolge Zu- und Abschaltung, Stromaufnahme, Masse

Um mögliche Beschädigungen des Operationsverstärkers durch eine unzulässige Relation zwischen Eingangsspannungen und Betriebsspannungen zu vermeiden, insbesondere zur Schonung der Eingangsschutzbeschaltung (Overvoltage Protection, OVP), sollten die Betriebsspannungen als Erstes zugeschaltet und als Letztes ausgeschaltet werden. Darüber hinaus wird die Stromaufnahme des Bauelements bei der Erstinbetriebnahme einer Schaltung gern als anfängliches Indiz für eine ordnungsgemäße Funktion genutzt – sehr hohe Werte deuten nicht selten auf ein Problem hin. Im Layout der Leiterplatte (gedruckte Schaltung, Printed Circuit Board, PCB) sind Masseverbindungen niederohmig und sternförmig oder als Massefläche auszuführen (Masseschleifen vermeiden), siehe Übung 3.4 zum Versatz des Massepotentials. Die Masselage einer mehrlagigen Leiterplatte (Multilayer Board) kann auch der Schirmung dienen (Unterdrückung kapazitiver Kopplung).

Im Bild 2.4 ist eine Versuchsschaltung dargestellt. Es handelt sich dabei um die steuerbare Konstantstromquelle, deren Gesetzmäßigkeiten im Abschnitt 10.4 vorgestellt werden und die beispielhaft für die Generierung eines Stromeinheitssignals dimensioniert wird, siehe Übung 10.4. Realisiert wurde die Schaltung mit dem OPV '082. Auf der Oberseite (Top Layer) und Unterseite (Bottom Layer) der Leiterplatte sind zu erkennen: die Anschlüsse der beiden Betriebsspannungen ($+U_B$, $-U_B$), die erzeugte Masse (Ground, GND), der Eingang für die Steuerspannung (U_{Ref}) sowie der Ausgang für den Anschluss einer Last (I_{Last}) mit Strommessmöglichkeit (I_{Last}). Ein Potentiometer (P_1) bietet die Abgleichmöglichkeit für $I_{Last} = f(U_{Ref})$.

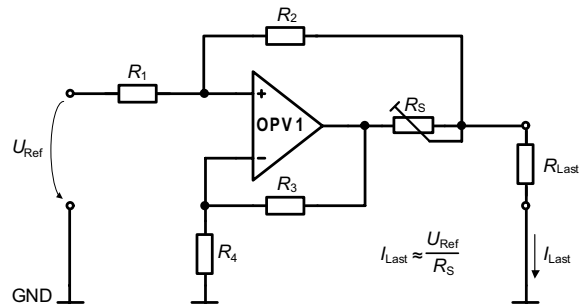
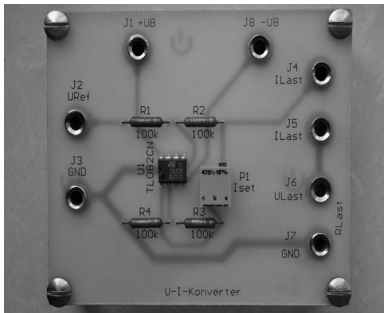


Bild 2.4 Versuchsschaltung einer steuerbaren Konstantstromquelle

OPV-Typen

Es existieren vier Operationsverstärker-Typen. Sie ergeben sich aus den Kombinationsmöglichkeiten von Spannungssignal (Voltage, V) oder Stromsignal (Current, C) am invertierenden Eingang und Ausgang. Die Tabelle 2.1 beinhaltet eine Übersicht der Typen. Der nichtinvertierende Eingang ist stets hochohmig. Soweit keine anderen Hinweise im Buch erfolgen, ist die Rede vom meist verwendeten VV-Typen. Ein- und Ausgänge auf Strombasis werden im Schaltzeichen gekennzeichnet. In [22] sind umfangreiche Ausführungen über die Typen enthalten.

Tabelle 2.1 Operationsverstärker-Typen

Eingang-Ausgang	Bezeichnung	Eigenschaften
Voltage-Voltage	VV-Typ, normaler Typ, Spannungs-Verstärker	hochohmiger Eingang, niederohmiger Ausgang
Current-Current	CC-Typ, Strom-Verstärker	niederohmiger Eingang, hochohmiger Ausgang
Voltage-Current	VC-Typ, Transkonduktanz-Verstärker (Operational Transconductance Amplifier, OTA)	hochohmiger Eingang, hochohmiger Ausgang, bevorzugt zum Treiben von Koaxialleitungen
Current-Voltage	CV-Typ, Transimpedanz-Verstärker	niederohmiger Eingang, niederohmiger Ausgang, bevorzugt als Videoverstärker (hohe Bandbreite)

7

Konditionier- und Umsetzungsschaltungen

Das folgende Kapitel behandelt Applikationen, welche der Signalaufbereitung dienen. Dazu zählen beispielsweise die Beeinflussung von Amplitude, Phasenlage und Polarität, die Umsetzung eines analogen in ein digitales Signal und umgekehrt sowie die Verarbeitung von Ladungsmengen, optischen Größen und die Änderung der Impedanz.

■ 7.1 Instrumentationsverstärker

Der Instrumentationsverstärker (Instrumentation Amplifier, In-Amp, INA) dient der Verstärkung von Differenzspannungen, beispielsweise von Sensorik. Er besitzt einen hohen Eingangswiderstand (geringe Quellenbelastung), eine sehr hohe Gleichtaktunterdrückung (geringe Gleichtaktstörungen), geringes Rauschen, eine geringe Temperaturabhängigkeit und Drift sowie eine einstellbare Spannungsverstärkung. Zahlreiche Hersteller bieten Instrumentationsverstärker als integrierte Bausteine an. In [20] und [22] sind verschiedene Schaltungsvarianten beschrieben. Folgend wird eine Variante vorgestellt, siehe Bild 7.1, die aus der Kombination von Spannungsfolgern (OPV1 und OPV2) und Subtrahierer (OPV3) gebildet wird. Die Verstärker OPV1 und OPV2 sorgen für einen hohen Eingangswiderstand. Die Ausgangsspannung U_a ist massebezogen.

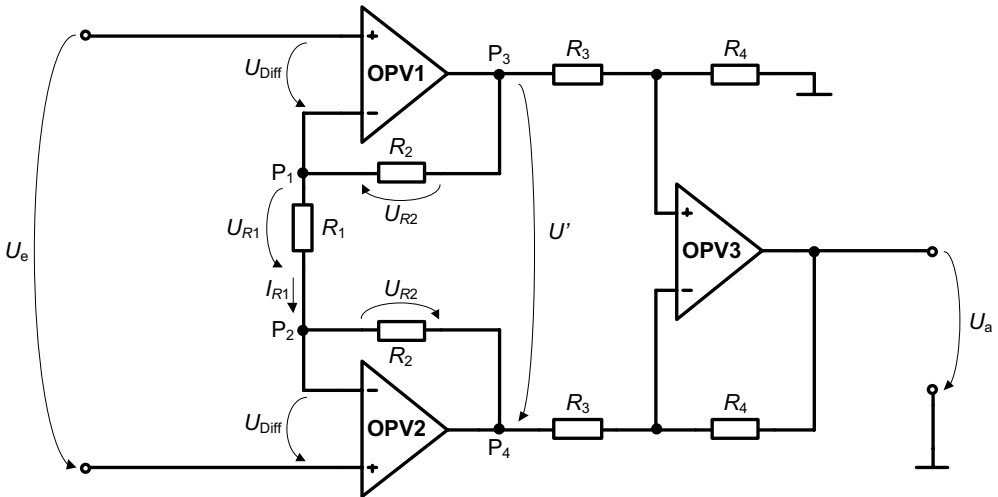


Bild 7.1 Instrumentationsverstärker

Ausgangsspannung:

$$U_a = \frac{R_4}{R_3} \left(1 + \frac{2R_2}{R_1} \right) U_e \quad (7.1)$$

Review

Für die Herleitung der Gleichung (7.1) liefert (4.6) des Subtrahierers, siehe Abschnitt 4.2, den Ansatz für die Verhältnisse am OPV3. Gemäß Grundsatz 2, $I_n = I_p = 0$, werden die Eingangsströme der Verstärker in der Herleitung vernachlässigt.

Allgemeine Gleichung eines Subtrahierers mit $R_1 = R_3$ und $R_2 = R_4$:

$$U_a = \frac{R_4 (R_1 + R_2)}{R_1 (R_3 + R_4)} U_{e2} - \frac{R_2}{R_1} U_{e1} = \frac{R_4}{R_3} (U_{e2} - U_{e1}) \quad (7.2)$$

Mit $U_{e1} = U_{P4}$ und $U_{e2} = U_{P3}$ (jeweils gegen Masse) sowie $U' + U_{e1} - U_{e2} = 0$ (U' als Spannung zwischen den Knotenpunkten P_3 und P_4) ergibt sich (7.3).

$$U_a = \frac{R_4}{R_3} U' \quad (7.3)$$

Der Grundsatz 1, $U_{\text{Diff}} = 0$, ist am OPV1 und OPV2 dann erfüllt, wenn $U_{R1} = U_e$ vorliegt.

$$\frac{U'}{U_{R1}} = \frac{U'}{U_e} = \frac{R_1 + 2R_2}{R_1}$$

$$U' = \left(\frac{R_1 + 2R_2}{R_1} \right) U_e = \left(1 + \frac{2R_2}{R_1} \right) U_e \quad (7.4)$$

Das Einsetzen von (7.4) in (7.3) ergibt die Ausgangsspannung U_a gemäß (7.1).

$$U_a = \frac{R_4}{R_3} \left(1 + \frac{2R_2}{R_1} \right) U_e$$

Übung 7.1: Instrumentationsverstärker mit DMS-Brücke

Ein Instrumentationsverstärker gemäß Bild 7.1 ist für die Verarbeitung des Messsignals einer Vollbrücke mit Dehnungsmessstreifen (DMS) auszulegen. Es sollen Dehnungsmessstreifen mit einem k -Faktor ≈ 2 und einer maximal zulässigen Längsdehnung $\varepsilon \approx 10^{-3}$ zum Einsatz kommen. Die Brückenspeisespannung U_B , siehe Bild 7.2, beträgt 10 V. Lösen Sie folgende Aufgaben!

1. Herleitung der allgemeinen Gleichung für die Ausgangsspannung einer Vollbrücke mit veränderlichen Widerständen.
2. Berechnung der maximalen Ausgangsspannung der Brücke mit den gegebenen Dehnungsmessstreifen.
3. Berechnung der Verstärkung des Instrumentationsverstärkers für eine maximale Ausgangsspannung von 1 V und Dimensionierung von R_1 , wenn $R_2 = R_3 = 10 \text{ k}\Omega$ und $R_4 = 20 \text{ k}\Omega$ betragen.

Lösung:

Zu 1) Ausgangsspannung einer Vollbrücke

Das Bild 7.2 veranschaulicht eine Vollbrücke mit 4 veränderlichen Widerständen. Der Ansatz zur Berechnung der Ausgangsspannung U_a der Brücke wird mittels Maschensatz im unteren Brückenbereich durchgeführt. Die Versorgung der Brücke erfolgt mittels Brückenspeisespannung U_B .

$$0 = U_2 - U_1 - U_a$$

$$U_a = U_2 - U_1 \quad (7.5)$$

Für die Teilspannungen U_1 und U_2 , mit $(R + \Delta R) + (R - \Delta R) = 2R$:

$$\frac{U_1}{U_B} = \frac{R - \Delta R}{2R}$$

$$U_1 = \left(\frac{R - \Delta R}{2R} \right) U_B \quad (7.6)$$

$$\frac{U_2}{U_B} = \frac{R + \Delta R}{2R}$$

$$U_2 = \left(\frac{R + \Delta R}{2R} \right) U_B \quad (7.7)$$

Gleichungen (7.6) und (7.7) in (7.5):

$$U_a = \left(\frac{R + \Delta R}{2R} - \frac{R - \Delta R}{2R} \right) U_B$$

$$U_a = \frac{\Delta R}{R} U_B \quad (7.8)$$

Für DMS gilt unter Vernachlässigen des Einflusses auf die Querrichtung der Zusammenhang (7.9).

$$\frac{\Delta R}{R} \approx k \frac{\Delta l}{l} \approx k \varepsilon \quad (7.9)$$

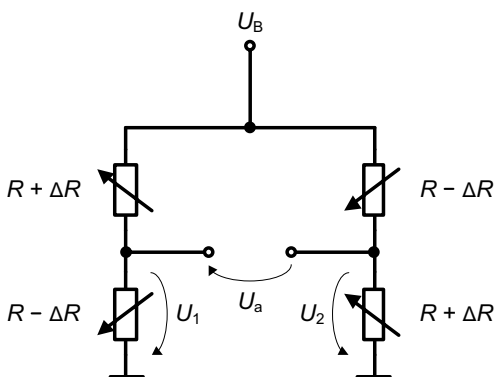


Bild 7.2
Vollbrücke mit veränderlichen Widerständen

Zu 2) Wert der maximalen Ausgangsspannung der gegebenen Anordnung
Aus (7.8) und (7.9) folgt die maximal mögliche Ausgangsspannung der Brücke.

$$\frac{\Delta R}{R} \approx k \varepsilon \approx 2 \cdot 10^{-3}$$

$$U_{a\max} = \frac{\Delta R}{R} U_B = 2 \cdot 10^{-3} \cdot 10 \text{ V} = 20 \text{ mV}$$

Zu 3) Auslegung des Instrumentationsverstärkers

Die Gleichung (7.1) bildet den Ausgangspunkt der Berechnung von R_1 , wobei die Eingangsspannung U_e die maximale Ausgangsspannung der Brücke darstellt.

$$U_a = \frac{R_4}{R_3} \left(1 + \frac{2R_2}{R_1} \right) U_e = \frac{2 \cdot 10^4 \Omega}{10^4 \Omega} \left(1 + \frac{2 \cdot 10^4 \Omega}{R_1} \right) U_e$$

$$R_1 = \frac{4 \cdot 10^4 \Omega}{\frac{U_a}{U_e} - 2} = \frac{4 \cdot 10^4 \Omega}{\frac{1V}{2 \cdot 10^{-2}V} - 2} = 833,3 \Omega$$

Für den Abgleich kann R_1 veränderbar eingesetzt werden.



Dehnungsmessstreifen und Vollbrücke

Dehnungsmessstreifen werden vor allem zur Kraft- und Druckmessung eingesetzt. Eine Vollbrücke besitzt gegenüber der Viertel- und Halbbrücke die größte Empfindlichkeit.

7.2 Phasenschieber

Der Phasenschieber (Phase Shifter) im Bild 7.3 ändert in Abhängigkeit von der Frequenz oder den Werten der Bauelemente die Phasenlage des Eingangssignals bei konstanter Amplitude. Er wird auch als Allpass bezeichnet. Aus der Phasenverschiebung resultieren Anwendungen für Signalverzögerungen und für die Korrektur des Phasengangs, beispielsweise zur Beeinflussung einer Filtercharakteristik, siehe Abschnitt 9.2.2. Der Bereich der Phasenverschiebung φ beträgt rein rechnerisch 0 bis -180° , siehe auch [6] und Allpass 1. Ordnung in [22].

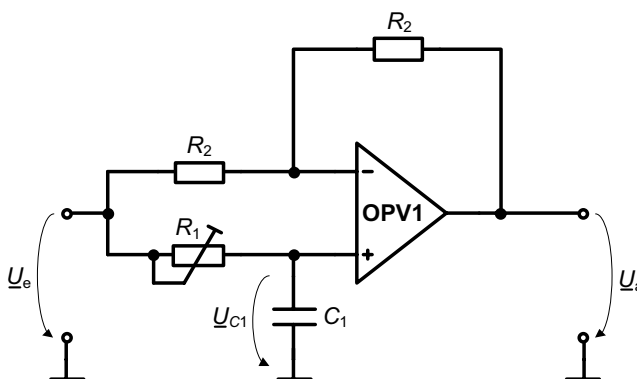


Bild 7.3
Phasenschieber

Phasenverschiebung:

$$\varphi = -2 \arctan(\omega R_1 C_1) \quad (7.10)$$

Index

A

Absorptionsmaß 79
Abtasttheorem 143, 196
Addierer 62, 137, 151, 188, 208
Aliasing 143, 196
Allpass 132, 204
Amplitudengang 70, 74, 181, 185, 201
Analog-Digital-Umsetzer 139, 142, 168
Astabiler Multivibrator
- mit Schmitt-Trigger 101
Ausfallrate 56
Ausfallwahrscheinlichkeit 53
Ausgangsaussteuerbarkeit 24, 26
- Großsignal 22
- Rail-to-Rail 22
Ausgangsruhepotential 244
Ausgangswiderstand 18, 19, 25, 35
Aussteuerungsgrad 252
Automatic Gain Control (AGC) 167
Autozero-Verstärker 41

B

Badewannenkurve 57
Batterie-Management-System (BMS) 94
Betriebsklima 54
Betriebsspannung 15, 244, 245
Betriebsspannungsdurchgriff (PSRR) 25
Betriebsspannungs-Umsetzer 246
Betriebsstrom 25, 167
Biquad-Filter 209
Blockkondensatoren 16, 242
Boucherot-Glied 44, 242
Brückenschaltung 136, 248, 250

C

Chopper-Verstärker 41
Codewort 139
Current Controlled Oscillator (CCO)
109

D

Darlingtontransistoren 252
Datenblatt
- Beispielkennwerte 24, 25
- Inhalt 23
- Obsolete, Discontinued 23
- RoHS-Hinweis 23
Dehnungsmessstreifen 120, 130, 132
- Dehnung 130
Diagnose 55
Diagnosegrundsätze 55
Differenzbetrieb 18
Differenzeingangswiderstand 18, 24
Differenzierer 73, 188
Differenzverstärker
- OPV, Subtrahierer 65
Differenzverstärkung 18, 21
Digital-Analog-Umsetzer 139, 148, 151,
169, 172
Digitales Potentiometer 135, 169
Dividierer 84
Dreieck-Rechteck-Oszillator 106, 108
Druckmessumformer
- mit PWM 126
- mit VCO 120
Drucksensor 120, 126
Dual-Slope-Converter 142, 145

Dunkelstromkompensation 160
Dynamikbereich 167

E

Einfachgegenkopplung 200
Einfachmitkopplung 206
Eingangsoffsetspannung 24
Eingangsoffsetspannungs-Kompensation 41
Eingangsoffsetstrom 24
Eingangsruhestrom 24, 72
Eingangsruhestrom-Kompensation 40
Eingangsschutzbeschaltungen 16, 21, 40
Einheitssignale 240
- Stromeinheitssignal 239
Elektromagnetische Verträglichkeit 54
Emitterschaltung 21, 22
Energiemanagement, technisches
- Definition 231
- für Energy Harvesting 232
- Power Management Classification (PMC) 231
- Struktur Energiemanagementsystem 231
Energy Harvesting 154, 225
Exponentialverteilung 58

F

Fensterkomparator 93
Filter
- Klassifizierung 195
- Ordnung 196
- Parameter 196
Filtercharakteristik 132, 203
Filtertypen
- Bessel-Filter 203
- Butterworth-Filter 203
- Koeffizienten 199
- Tschebyscheff-Filter 204
Flash-Converter 142, 144
Flussspannungs-Vervielfacher 21, 99, 252
Fotoempfänger 159
- Fotodiode, Laserdiode 159
- Sender/Empfänger 159

Frequenzgang-Kompensation 21, 42, 186, 242, 246
Frequenzmessung 120

G

Gegenkopplung 33, 43
- gedachte 91
Gegentaktendstufe
- AB-Endstufe 21
- komplementär 252
- quasi komplementär 252
Gehäuse 29, 45, 50, 241
Gleichtaktbetrieb 19
Gleichtakteingangswiderstand 18, 24
Gleichtaktsignal 19
Gleichtaktunterdrückung (CMRR) 20, 21, 24
Gleichtaktverstärkung 19
Gyrator 163

H

Historie OPV 11

I

Impedanz
- duale 163
Induktivität
- im Schwingkreis 166
- mittels Gyrator 163
Innenschaltungen
- ADA4091-2/ADA4091-4 21
- LM675 243
- LM741 20
Instabilität 35, 43, 74
Instrumentationsverstärker 128
Integrierer 69, 106, 110, 113, 116, 145, 188, 200, 207

J

Jitter 106

K

Kleinsignalersatzschaltbild 18
 Klirrfaktor 106, 242
 Komparator 90, 126, 144, 145
 Konstantstromquelle
 - steuerbar 17, 237, 239
 - Versuchsschaltung 17, 237
 Kraftmessung 157
 Kühlkörper 49
 Kurzschlussstrom 25, 224

L

Ladungsverstärker 152
 - als Ladungsverstärker 156
 - als Spannungsverstärker 155
 - Anschlusskabel 154
 - piezoelektrische Empfindlichkeit 153
 - Piezosensor Quarz 153
 Lambda-Sonde 239
 Latch-up-Effekt 22, 54
 Least Significant Bit (LSB) 140, 148
 Leerlaufverstärkung 18, 24, 43
 Leistungsaufnahme
 - Energiesparmaßnahmen 216
 - Managementfunktionen 215
 Leistungs-Operationsverstärker 241
 Leiterbahnen
 - Masse 55
 - Strombelastbarkeit 55
 Logarithmierer 76

M

Masseverbindungen 15, 16, 55, 242
 Masse, virtuell 39
 Mehrfachgegenkopplung 201
 Messkette
 - Messgliedkoeffizient 154
 - Messkettenkoeffizient 154
 Micro-Electro-Mechanical System (MEMS) 157
 Micropower OPV 167
 Mitkopplung 33, 35, 43, 95, 163
 Modulo- n -Zähler 122, 124

Most Significant Bit (MSB) 140
 MTBF, MTF, MTTFF 57
 Multiplexer 139, 140, 168
 Multiplizierer 84
 Multiplying DAC 152, 172
 Multivibrator
 - astabil 101
 - bistabil 101
 - monostabil 101
 Musterschaltungen
 - Aufbau, Analyse 33

N

Negative Impedance Converter (NIC) 162
 Nullpunkt
 - lebender 127, 239, 240
 - toter 239, 240

O

Obsoleszenz 56
 Offsetspannungsdrift 24
 OPV ADA4091-2/ADA4091-4 21, 24, 30
 OPV-Grundsätze 31
 OPV LM675 242
 OPV LM741 20
 OPV-Typen
 - VV, CC, VC, CV 17
 Oszillator 106, 122
 Overvoltage Protection (OVP) 21

P

Pegelumsetzer 67
 Phasendetektor 122
 Phasengang 181, 185, 197
 Phasenregelkreis (PLL) 121
 Phasenreserve 44, 186
 Phasenschieber 132, 135
 Phasenverschiebung 43, 132, 187
 PID-Regler 188, 190
 Piezosensor 152, 157
 Potentialersatz 55
 Potenzfunktion 84
 Potenzierer 81

Präzisionsgleichrichter
 - Einweg 136
 - Zweiweg 136, 138
 Präzisionsverstärker 45
 Programmable Gain Amplifier (PGA) 167
 Programmable Operational Amplifier 166
 Pulsweitenmodulation (PWM) 104, 121, 126
 Pulsweitenmodulator 104, 125

Q

Quantisierungsrauschen 143
 Quarzoszillatoren 106

R

Radizierer 84, 88
 Rail-to-Rail-Input-Output (RRIO) 21
 Rauschen 25, 27, 167
 Rauschfaktor 27
 Rauschmaß 27
 Real Time Clock (RTC) 106
 Redundanz 54, 57, 60
 Regelgüte 176, 179
 Regelkreis
 - einschleifig 178
 - Standardregelkreis 179
 Regelungsarten 177
 Reglerentwurf
 - Verfahren 191
 - Ziegler & Nichols 191, 192
 Reglerschaltungen 187, 189
 Reglertypen 182
 Rückkopplung 33, 178, 250
 Rückkopplungs-Ersatzschaltung 250
 Rückkopplungsfaktor 33
 Rückkopplungsnetzwerk 34

S

Safe Operating Area Protection 242
 Sägezahnspannung 108, 126
 Sallen-Key-Schaltung 206
 Sample/Hold 144, 168
 SC-Anordnungen
 - Funktionsprinzip 171

- SC-Filter 207, 208
 - SC-Integrator 207
 Schalthysterese 95
 Schaltungsanalyse 32
 Schaltzeichen OPV 15
 Schleifenverstärkung 34, 43
 Schmitt-Trigger 106, 110, 113, 116
 - Floating 99
 - invertierend 96
 - nichtinvertierend 95
 - unsymmetrisch 98
 Schutzschaltungen 47, 54, 242
 Selbstüberwachung 127
 Servomotor-Ansteuerung 246
 Settling Time 25
 Sigma-Delta-Umsetzer 142
 Signal-Rausch-Abstand (SNR) 27, 167
 Slew Rate 25
 Spannungs-Frequenz-Umsetzer 142
 Spezialverstärker 45
 Stabilisierung
 - Low-Dropout Regler 221
 - mit OPV 218
 - Schaltregler 216
 - Universalspannungsregler 222
 State-Variable-Filter 209
 Strommessung
 - Hall-Sensor mit Digitalisierung 147
 - Hall-Sensor mit Pegelumsetzer 67
 Subtrahierer 65, 110, 123, 128, 160, 246
 Successive-Approximation-Converter 142
 Superposition 32, 65, 133, 246
 Systembeschreibung
 - Bildbereich 181
 - Frequenzbereich 181
 - Zeitbereich 180
 - Zustandsraummodell 181
 Systemzuverlässigkeit 58

T

Takterzeugung mit PLL 124
 Tastverhältnis 85, 104
 Temperaturregelung 180, 192
 Temperaturstress 243

Thermische Größen

- Analogie, Modell 48
- Wärmestrom 48

Thermoelektrizität 225

Thermogenerator

- Gesetzmäßigkeiten 227
- Seebeck-Koeffizient 228
- Spannungsaufbereitung 225
- Thermospannung 227

Thermometercode 144

Tiefpassfilter

- aktiv 200, 201, 204, 206
- passiv 197
- SC-Filter 208

Total Harmonic Distortion (THD) 242

Transimpedanz-Verstärker 17

Transitfrequenz 25, 44

Transkonduktanz-Verstärker 17, 169

True RMS 138

U

Übertragungsfunktion 181, 182

- Tiefpass allgemein 198

V

Variable Gain Amplifier (VGA) 168

Verluste

- Derating 51, 53
- Kühlmaßnahmen 50

- Leistungsaufnahme 141, 166, 215

- Reduzierungsmaßnahmen 47

- Verlustleistung 221, 224, 247

Verstärkergrundsaltungen

- invertierend 38, 66, 113, 188, 251
- nichtinvertierend 36, 66, 155, 169, 244, 253
- Spannungsfolger 37, 51, 128, 144, 186, 206, 246, 247

Verstärkungs-Bandbreiten-Produkt 25, 186

Vollbrücke 130

Voltage Controlled Oscillator (VCO)

- VCO1, VCO2, VCO3 109, 122
- Voltage Controlled Xtal Oscillator (VCXO) 110, 125

W

Wärmewiderstand 25, 48

Widerstandsnetzwerk

- gewichtet 151
- R-2R-Netzwerk 149, 150, 169
- Widerstandskette 149

Widlar, Robert J. 12

Wirkungsgrad 230, 241, 253

Z

Zuverlässigkeit 53

- Bewertung 56
- Schaltbilder 57