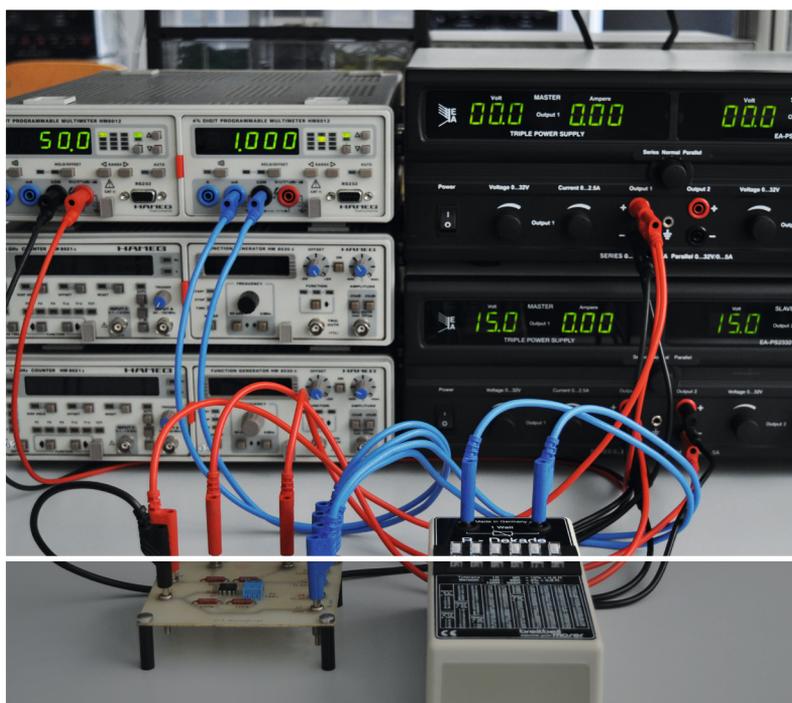


Matthias Viehmann

Operations- verstärker

Grundlagen, Schaltungen, Anwendungen



HANSER



bleiben Sie auf dem Laufenden!

Hanser Newsletter informieren Sie regelmäßig über neue Bücher und Termine aus den verschiedenen Bereichen der Technik. Profitieren Sie auch von Gewinnspielen und exklusiven Leseproben. Gleich anmelden unter

www.hanser-fachbuch.de/newsletter

Matthias Viehmann

Operationsverstärker

Grundlagen, Schaltungen, Anwendungen

Mit 171 Bildern, 30 Tabellen und 46 Übungen



Fachbuchverlag Leipzig
im Carl Hanser Verlag

Prof. Dr.-Ing. Matthias Viehmann
FH Nordhausen



Alle in diesem Buch enthaltenen Informationen, Verfahren und Darstellungen wurden nach bestem Wissen zusammengestellt und mit Sorgfalt getestet. Dennoch sind Fehler nicht ganz auszuschließen. Aus diesem Grund sind die im vorliegenden Buch enthaltenen Informationen mit keiner Verpflichtung oder Garantie irgendeiner Art verbunden. Autor und Verlag übernehmen infolgedessen keine juristische Verantwortung und werden keine daraus folgende oder sonstige Haftung übernehmen, die auf irgendeine Art aus der Benutzung dieser Informationen – oder Teilen davon – entsteht.

Ebenso übernehmen Autoren und Verlag keine Gewähr dafür, dass beschriebene Verfahren usw. frei von Schutzrechten Dritter sind. Die Wiedergabe von Gebrauchsnamen, Handelsnamen, Warenbezeichnungen usw. in diesem Buch berechtigt deshalb auch ohne besondere Kennzeichnung nicht zu der Annahme, dass solche Namen im Sinne der Warenzeichen- und Markenschutz-Gesetzgebung als frei zu betrachten wären und daher von jedermann benutzt werden dürften.

Bibliografische Information der Deutschen Nationalbibliothek

Die Deutsche Nationalbibliothek verzeichnet diese Publikation in der Deutschen Nationalbibliografie; detaillierte bibliografische Daten sind im Internet über <http://dnb.d-nb.de> abrufbar.

ISBN: 978-3-446-43053-2

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

Dieses Werk ist urheberrechtlich geschützt.

Alle Rechte, auch die der Übersetzung, des Nachdruckes und der Vervielfältigung des Buches, oder Teilen daraus, vorbehalten. Kein Teil des Werkes darf ohne schriftliche Genehmigung des Verlages in irgendeiner Form (Fotokopie, Mikrofilm oder ein anderes Verfahren), auch nicht für Zwecke der Unterrichtsgestaltung – mit Ausnahme der in den §§ 53, 54 URG genannten Sonderfälle –, reproduziert oder unter Verwendung elektronischer Systeme verarbeitet, vervielfältigt oder verbreitet werden.

© 2016 Carl Hanser Verlag München

Internet: <http://www.hanser-fachbuch.de>

Lektorat: Franziska Jacob, M.A.

Herstellung: Dipl.-Ing. (FH) Franziska Kaufmann

Satz: Kösel Media GmbH, Krugzell

Titelbild: Rohde & Schwarz GmbH & Co. KG (Die Firma Hameg ist komplett in die Rohde & Schwarz GmbH & Co. KG integriert und hat damit auch ihren Namen abgegeben), mit freundlicher Genehmigung

Coverconcept: Marc Müller-Bremer, www.rebranding.de, München

Coverrealisierung: Stephan Rönigk

Druck und Bindung: Pustet, Regensburg

Printed in Germany

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 Lustermann 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

1

Einführung

Das folgende Kapitel beinhaltet einen Abriss über die Geschichte des Operationsverstärkers sowie Aussagen über seine Vorzüge. Darüber hinaus wird das Anliegen des Buches erläutert, einschließlich seiner didaktischen Umsetzung.

■ 1.1 Historischer Abriss über den Operationsverstärker

Der Operationsverstärker (OPV, OV), Operational Amplifier (Op Amp, OPA), ist seit Jahrzehnten fester Bestandteil der Analog- sowie Mixed-Signal-Technik. Seine Bezeichnung wurde 1947 von John R. Ragazzini, Robert H. Randall, Frederick A. Russell geprägt [6], [S4].

„As an amplifier so connected can perform the mathematical operations of arithmetic and calculus on the voltages applied to its input, it is hereafter termed an operational amplifier.“
John R. Ragazzini, Robert H. Randall, Frederick A. Russell, 1947, [S4].

Ausgangspunkt für die Entwicklung des Bauelements war der Bedarf an hochpräzisen und driftarmen Komponenten in elektronischen Analogrechnern. In ihnen wurden mathematische Variablen durch analoge Spannungen und Ströme zeitabhängig dargestellt. Dazu war es notwendig, den zu betrachtenden Prozess (die zu lösende Aufgabenstellung) modellhaft in die analogen Größen zu transformieren, diese gemäß Modell mathematischen Berechnungen zu unterziehen (Addieren, Subtrahieren, Multiplizieren, Differenzieren, Integrieren usw.), um anschließend durch die Messung der Ausgangswerte den Prozessverlauf oder die Prozessparameter zu erhalten. Die ursprünglich dafür eingesetzten Rechenschaltungen (Verstärkerschaltungen) wurden diskret aufgebaut, verbunden mit einer hohen Temperaturabhängigkeit, mit Bauteiltoleranzen und einem nichtlinearen Verhalten. Erst der Einsatz von Operationsverstärkern mit ihrer sehr hohen Leerlaufverstärkung und dem Rückkopplungskonzept für die Durchführung der mathematischen Operationen, daher ihre Bezeichnung, reduzierte die Störeinflüsse und verbesserte die Rechengenauigkeit. Die ersten Exemplare wurden mit Elektronenröhren aufgebaut, später kamen Transistoren zum Einsatz. Der Durchbruch war letztendlich die Anfertigung des OPV als integrierte Schaltung (IS, Integrated Circuit, IC) in monolithischer Form auf einem Siliziumchip. Rea-

lisiert wurde dies in den frühen 60er Jahren durch Robert J. Widlar, genannt „The Father of Analog Integrated Circuit“, von Fairchild Semiconductor Corporation, beginnend mit dem Bauelement $\mu\text{A}702$ [6], [S3]. Im Jahr 1968 entwickelte Fairchild den legendären Operationsverstärker $\mu\text{A}741$ [6], [S3]. Eine spannende Zusammenfassung der Geschichte des Operationsverstärkers befindet sich in [S1] sowie in [S3].

Durch seine nahezu idealen Eigenschaften, beispielsweise sehr hohe Leerlaufverstärkung, hohe Eingangsimpedanzen und geringe Drift, kann das gewünschte Verhalten der Anordnung allein durch die äußere Beschaltung des OPV bestimmt werden. Losgelöst vom Einsatz in Analogrechnern finden Operationsverstärker heutzutage Verwendung in zahlreichen Applikationen der Fahrzeugelektronik, Leistungselektronik, Energie- und Antriebselektronik, Mechatronik, Informations- und Kommunikationstechnik, Automatisierungstechnik, Messtechnik usw. Neben der Anzahl der Anwendungen hat sich auch die Typenvielfalt extrem erhöht, da die Eigenschaften der Operationsverstärker in Abhängigkeit vom Einsatzzweck gezielt optimiert wurden. Beispielhaft können die Reduzierung der Drift, des Rauschens und des Eingangsstroms sowie die Erhöhung der Bandbreite genannt werden, siehe Abschnitt 2.4.4. Einige Typen beinhalten Zusatzfunktionen für spezielle Anwendungen (beispielsweise Potentialtrennung oder Filter) und sind als Funktionseinheit in komplexe Schaltungen eingebettet. War der $\mu\text{A}741$ noch ein als universell zu bezeichnender OPV, bieten inzwischen zahlreiche Hersteller ein umfangreiches Portfolio spezifischer Typen in unterschiedlichen Herstellungstechnologien und Gehäuseformen an.

■ 1.2 Pädagogische Zielstellungen und didaktisches Konzept

Das Anliegen des vorliegenden Buches besteht in der Vermittlung von Grundlagenwissen über das Bauelement Operationsverstärker, in der Befähigung zur Schaltungsanalyse und zum Schaltungsdesign sowie, allgemein ausgedrückt, in der „Ausprägung des Schaltungsblickes für Operationsverstärker“.

Folgende **pädagogische Zielstellungen** bilden die Ausgangsbasis:

- Vermittlung von Grundlagenwissen über das Bauelement Operationsverstärker,
- Ausprägung von Fähigkeiten und Fertigkeiten zur Schaltungsanalyse,
- Qualifizierung im Schaltungsdesign,
- Befähigung zum Umgang mit Datenblättern.

Bei dem vorliegenden Werk handelt es sich um ein praxisorientiertes Lehrbuch für die Unterstützung der Bachelor- und Masterausbildung an Fachhochschulen, Hochschulen und Universitäten, insbesondere in den Lehrgebieten Elektrotechnik und Elektronik, Fahrzeugelektronik, Leistungselektronik, Energie- und Antriebselektronik, Mechatronik, Informations- und Kommunikationstechnik, Automatisierungstechnik, Messtechnik. Darüber hinaus kann es in der Berufsausbildung und im Arbeitsalltag wertvolle Dienste leisten. Das Lehrbuch ist als Grundlage für das Selbststudium sowie als Vorlage für die Lehrveranstaltung zum Thema Operationsverstärker geeignet.

Für das Verständnis des Buchinhaltes werden Grundlagenkenntnisse der Elektrotechnik, Mathematik und Physik vorausgesetzt, einschließlich der Gesetzmäßigkeiten der Bauelemente Widerstand, Kondensator, Spule, bipolarer und unipolarer Transistor. Aufgrund der nahezu idealen Eigenschaften des Operationsverstärkers lässt er sich überwiegend und vereinfachend als Black Box betrachten. Im Eingangsteil des Buches sind der Aufbau, die Eigenschaften und die Funktionsweise des Operationsverstärkers beschrieben. Verzichtet wird auf ausführliche Berechnungen von Innenschaltungen. An dieser Stelle sei auf weiterführende Literatur verwiesen, siehe Literaturverzeichnis. Bei der Buchgestaltung wurde besonderer Wert auf eine nachvollziehbare Strukturierung gelegt, welche die wesentlichen Lernaspekte kennzeichnet. Wenn es sich anbietet, werden Merksätze, Verallgemeinerungen und Regeln eingefügt, basierend auf einer didaktisch induktiven oder deduktiven Vorgehensweise. Die Gesetzmäßigkeiten der Applikationsschaltungen sind mit ihren Herleitungen und Analysemethoden enthalten.

Die **Beschreibung der Anwendungen besitzt folgende Systematik:**

1. Schaltung mit wesentlicher Gesetzmäßigkeit,
2. Herleitung der Gesetzmäßigkeit im Review,
3. Dimensionierungsbeispiel und/oder Übungsaufgabe.

Bei zahlreichen Applikationen wird ein kurzer Überblick über das Anwendungsgebiet gegeben. Besonders erwähnenswert sind in diesem Zusammenhang die Abschnitte 3.2 (Kühlmaßnahmen) und 3.3 (Zuverlässigkeitsbetrachtungen) mit ihren anwendungsübergreifenden Ausführungen. Im Kapitel 7 ist ein Überblick über die Digitalisierung enthalten. Die Kapitel 8 (Reglerschaltungen) und 9 (Filterschaltungen) beinhalten ebenfalls einen einführenden Überblick über das jeweilige Anwendungsgebiet. Im Kapitel 10 sind neben den Stabilisierungsschaltungen auch eine Übersicht über Schaltreglerprinzipien sowie Ausführungen über das Energy Harvesting mit einer speziellen Betrachtung des Thermogenerators und über Energiemanagementsysteme enthalten. Die Einteilung der vorgestellten Applikationen in ihrer repräsentativen Auswahl erfolgte zur besseren Anschaulichkeit aus der Sicht des thematischen Einsteigers nach der Schaltungsaufgabe. Diese Tatsache und der schrittweise gesteigerte Komplexitätsgrad der Schaltungen führen dazu, dass das Lehrbuch auch abschnittsweise genutzt werden kann und spätere Ergänzungen durch Leser/-innen oder im Rahmen einer überarbeiteten Buchaufgabe übersichtlich eingepflegt werden können. Das Buch enthält Zusatzinformationen über Schaltungen und Sachverhalte angrenzender Themengebiete, Anmerkungen zum besseren Verständnis sowie Hinweise für die praktische Umsetzung von Schaltungen. Eine Liste mit verwendeten Formelzeichen, Symbolen und Abkürzungen ist unter www.hanser-fachbuch.de/buch/Operationsverstärker/9783446430532 hinterlegt.

Dimensionierungsbeispiele mit Schaltkreisen und die Nutzung von Datenblättern dienen der Befähigung im Umgang mit derartigen Dokumenten. Das didaktische Konzept und dessen konsequente Umsetzung in Form einer lernprozessfördernden Buchgestaltung sind die Merkmale, welche entscheidend zur Bezeichnung Lehrbuch beitragen. Möge es einen Beitrag zur Ausprägung der Technikbegeisterung liefern.

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.

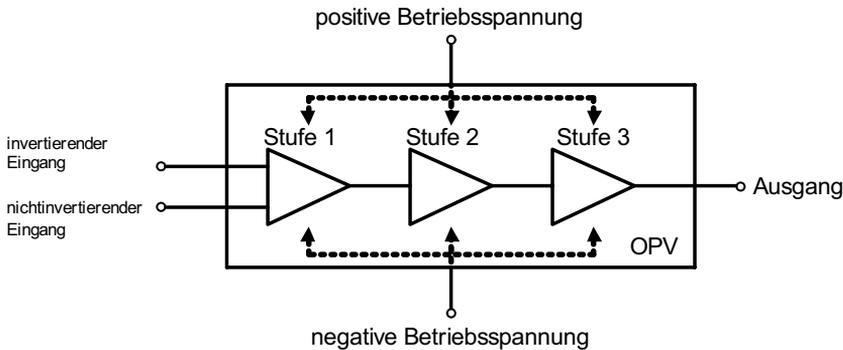


Bild 2.1 Allgemeine dreistufige Struktur des OPV

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.

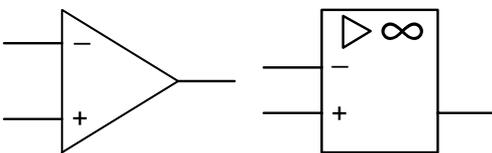


Bild 2.2
Dreieckiges und rechteckiges Schaltzeichen, [S9]

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.

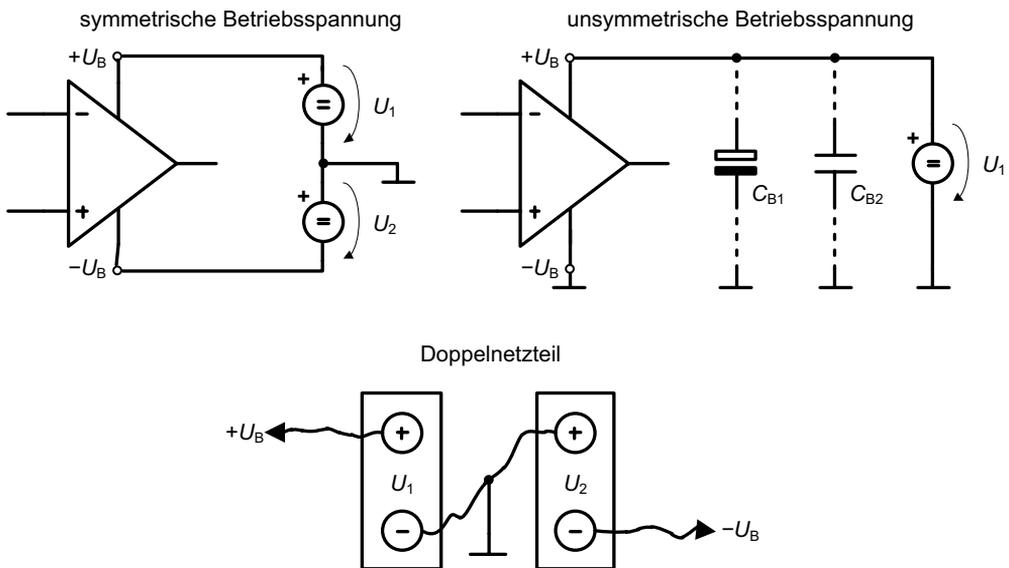


Bild 2.3 Versorgungsvarianten



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 $I_{Last} = f(U_{Ref})$.

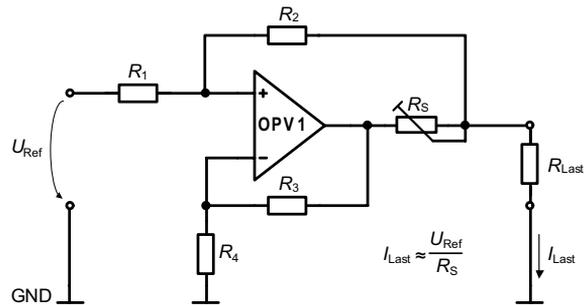
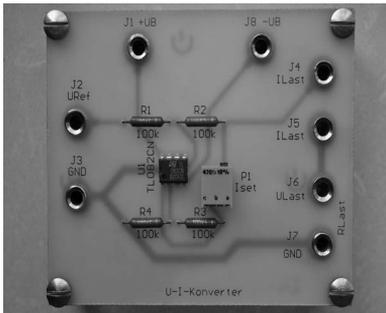


Bild 2.4 Versuchsschaltung einer steuerbaren Konstantstromquelle

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)

Bezeichnungen, Betriebsarten

Folgend werden die Bezeichnungen am OPV und die beiden Betriebsarten erläutert. Die Darstellungen erfolgen zunächst ohne Berücksichtigung von Fehlergrößen. Die Größen mit Bezug zum invertierenden Eingang werden mit dem Index n und mit Bezug zum nichtinvertierenden Eingang mit dem Index p gekennzeichnet, siehe Bild 2.5 (Kleinsignalerersatzschaltbild). Die Bezeichnungen lauten:

- $+U_B, -U_B$ positive und negative Betriebsspannung
- U_a, I_a, r_a Ausgangsspannung und -strom, differentieller Ausgangswiderstand
- U_p, I_p Spannung und Strom am nichtinvertierenden Eingang
- U_n, I_n Spannung und Strom am invertierenden Eingang
- U_{Diff}, r_D Differenzspannung, Differenzeingangswiderstand zwischen Klemmen
- U_{Gl} Gleichtaktspannung
- r_{Gl} Gleichtakteingangswiderstand zwischen Klemme und Masse

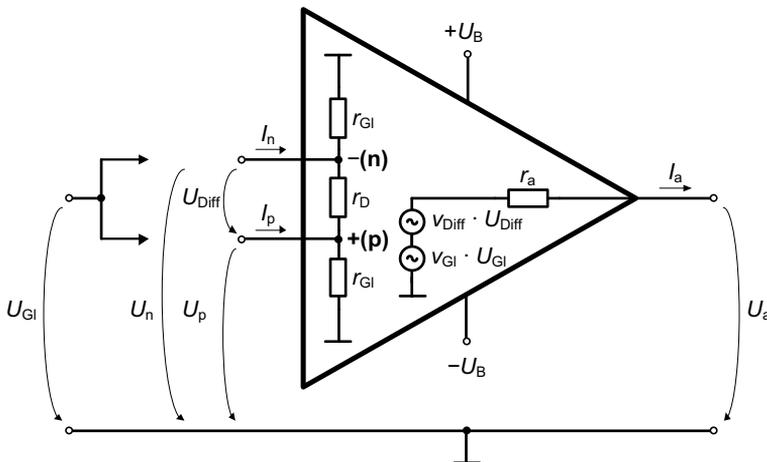


Bild 2.5 Bezeichnungen am Operationsverstärker

Der **Differenzbetrieb** (auch Gegentaktbetrieb, Differential Mode) ist dadurch gekennzeichnet, dass die anliegende Differenzeingangsspannung U_{Diff} verstärkt wird. Die dabei wirkende Verstärkung wird Differenzverstärkung v_{Diff} genannt, siehe (2.1), bei offener Schleife (Open Loop, ohne Gegenkopplung) wird sie auch als Leerlaufverstärkung v_L (Open Loop Gain) bezeichnet. Sie ist frequenzabhängig, siehe hierzu Abschnitt 2.4.3.

Leerlaufverstärkung, Differenzverstärkung:

$$v_L = v_{\text{Diff}} = \frac{U_a}{U_{\text{Diff}}} \quad (2.1)$$

$$v_{\text{Diff,dB}} = 20 \lg \left| \frac{U_a}{U_{\text{Diff}}} \right|$$

mit: $U_{\text{Diff}} = U_n - U_p$

Die Ansteuerung am invertierenden Eingang mit nichtinvertierendem Eingang auf Masse ergibt das Verhältnis von Spannungs- und Stromänderung an der Parallelschaltung von r_D und r_{Gl} :

$$r_D \parallel r_{Gl} = \left| \frac{\Delta U_n}{\Delta I_n} \right| \quad (2.2)$$

Für die Ermittlung des Differenzeingangswiderstands stellt (2.2) bei bipolaren Eingangsstufen mit $r_{Gl} \gg r_D$ eine gute Näherung dar. Bei unipolaren Stufen sind alle Widerstandsanteile sehr groß und eine Unterscheidung unnötig.

Ausgangswiderstand bei Open Loop, für Closed Loop siehe (2.9):

$$r_a = \frac{\Delta U_a}{\Delta I_a} \quad (2.3)$$

Bei dem sogenannten **Gleichtaktbetrieb** (Common Mode) werden beide Eingänge durch ein Gleichtaktsignal, die Gleichtaktspannung U_{Gl} , beeinflusst, siehe hierzu der folgende Kasten.



Gleichtaktsignal

Ein Gleichtaktsignal wirkt gleichzeitig, in gleicher Höhe sowie mit identischer Polarität und Phasenlage an den beiden Eingängen. Es kann als Störsignal durch Einkoppeln auf beide Anschlüsse entstehen (Gleichtaktstörung) oder durch gleichzeitige, thermisch verursachte, driftförmige Änderung der Arbeitspunktlagen der symmetrischen Differenzeingangsstufe des Operationsverstärkers hervorgerufen werden. Seine Auswirkungen auf den Ausgang sind unerwünscht und werden unterdrückt (durch geringe Gleichtaktverstärkung). Ein Gleichtaktsignal kann beispielsweise als Störsignal von benachbarten Leitungen in die beiden Eingangsanschlussleitungen eingekoppelt werden. Die vom Anwender als Nutzsignal verwendete Spannungsdifferenz zwischen den beiden Eingängen (Differenzsignal) bleibt jedoch bei einer Gleichtaktstörung unverändert. Diesen Vorteil nutzt man bei Bussystemen, die im Differenzbetrieb betrieben werden.

Gleichtaktverstärkung:

$$V_{Gl} = \frac{U_a}{U_{Gl}} \quad (2.4)$$

Gleichtakteingangswiderstand, Messung siehe [4]:

$$r_{Gl} = \frac{\Delta U_{Gl}}{\Delta I_p} = \frac{\Delta U_{Gl}}{\Delta I_n} \quad (2.5)$$

Gleichtaktunterdrückung (Common Mode Rejection Ratio, CMRR):

$$\text{CMRR}_{\text{dB}} = 20 \lg \left| \frac{V_{\text{Diff}}}{V_{\text{GI}}} \right| \quad (2.6)$$

Innenschaltung

Anhand des OPV-Beispiels LM741 von National Semiconductor, [D1], bzw. Texas Instruments, [D15], soll die innere Struktur erläutert werden, siehe Bild 2.6. Der Schaltkreis ist auf den berühmten OPV μA741 von Fairchild zurückzuführen – ein Meilenstein in der OPV-Entwicklung, siehe Abschnitt 1.1 und [S3].

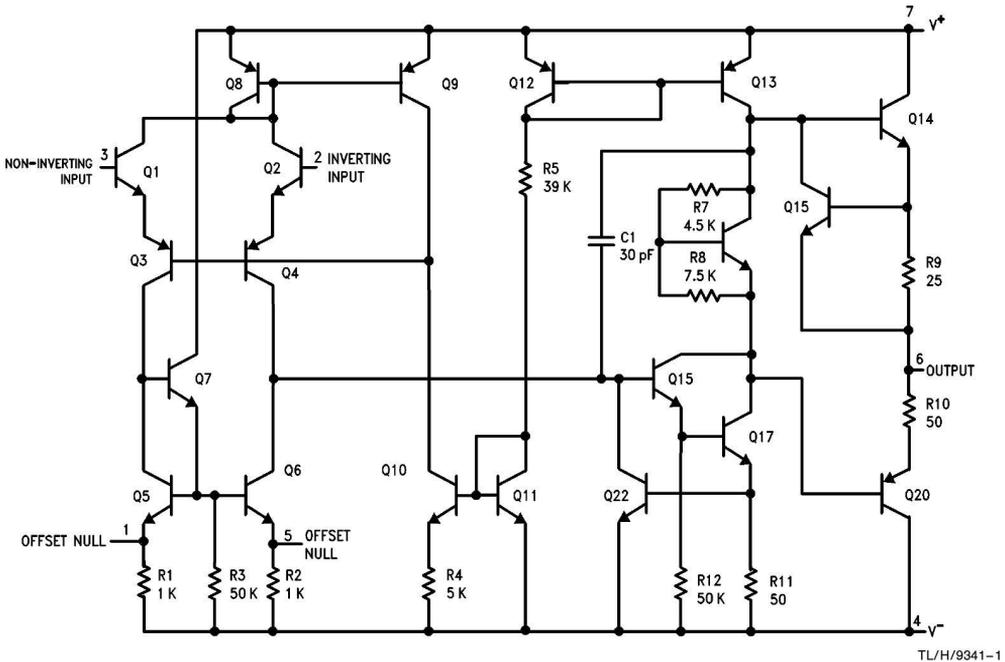


Bild 2.6 Schaltung LM741, [D1] (siehe Hinweis)

Hinweis (Stand März 2016): In der dem Datenblatt [D1] entnommenen Innenschaltung im Bild 2.6 wurden, wie in [D15] auch, die Transistorbezeichnungen doppelt oder nicht durchgängig verwendet (Q_{15} doppelt; Q_{16} , Q_{18} , Q_{19} , Q_{21} nicht). Der mit R_7 und R_8 beschriftete Transistor wurde nicht benannt, die Bezeichnung R_6 nicht verwendet. Die Erläuterung der inneren Struktur erfolgt dennoch anhand der vorliegenden Darstellung. Ein Datenblatt (aus 1987) des μA741 von Fairchild befindet sich in [6].

Beim OPV LM741 handelt es sich um eine monolithisch integrierte Bipolarschaltung als VV-OPV, siehe Tabelle 2.1, mit der dreistufigen Struktur gemäß Bild 2.1. Die Stufe 1 wird durch einen Eingangsdifferenzverstärker mit Komplementärschaltungen gebildet (Q_1 bis Q_4). Die Stufe beinhaltet einen Stromspiegel (Q_8 , Q_9) sowie einen weiteren Differenzver-

stärker als phasenaddierende Schaltung (Q_5 bis Q_7) und besitzt eine hohe Gleichtaktunterdrückung sowie Differenzverstärkung. Die Darlington-Kombination Q_{15} und Q_{17} wird in Emitterschaltung betrieben und stellt die Stufe 2 dar. Ihr Lastwiderstand ist ein Stromspiegel (Q_{12} , Q_{13}). Die Stufe 3 wird durch eine Komplementär-AB-Endstufe gebildet (Q_{14} , Q_{20}), siehe auch Abschnitt 11.3. Die Vorspannungserzeugung für den AB-Betrieb übernimmt ein Flussspannungs-Vervielfacher (R_7 , R_8 mit zugehörigem Transistor). Die Widerstände R_9 und R_{10} detektieren den Ausgangsstrom und realisieren mit Q_{15} (an Q_{14}) und Q_{22} eine Kurzschlussstrombegrenzung. Der Kondensator C_1 dient der internen Frequenzgang-Kompensation, siehe Abschnitt 2.4.3. Über die Anschlüsse 1 und 5 lässt sich eine externe Eingangsoffsetspannungs-Kompensation realisieren, siehe Abschnitt 2.4.2.

Operationsverstärker können aufgrund ihrer Optimierung und Funktionsvielfalt, siehe Abschnitt 2.4.4, weitere Teilschaltungen beinhalten. Mittels OPV-Beispiel ADA4091-2/ADA4091-4 von Analog Devices, [D2] und [N1], siehe auch Tabelle 2.2, werden exemplarisch die Funktionen Overvoltage Protection (OVP) und Rail-to-Rail-Input-Output (RRIO) beschrieben, Innenschaltung siehe Bild 2.7.

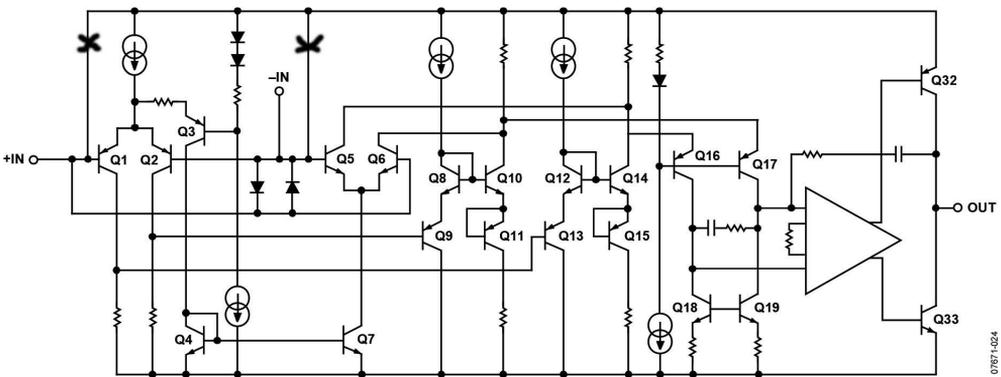


Bild 2.7 Schaltung ADA4091-2/ADA4091-4, [D2], [N1] (siehe Hinweis)

Hinweis (Stand März 2016): Die beiden mit einem Kreuz gekennzeichneten, galvanisch direkten Verbindungen an den Schaltungseingängen im Bild 2.7 sind in der Darstellung fehlerhaft (Kennzeichnung im Bild durch Autor). Laut Hersteller erfolgt eine Revision des Datenblatts (siehe zu gegebener Zeit unter [N1]).

Es handelt sich beim ADA4091-2/ADA4091-4 um einen Precision Micropower, Overvoltage Protection (OVP), Single Supply, Rail-to-Rail-Input-Output (RRIO) Operational Amplifier. Seine Schutzschaltung gegen Überspannung am Eingang ist im Bild 2.8 zu sehen. Zwei Teilschaltungen übernehmen den Schutz: Serienwiderstände (R_1 , R_2) mit jeweils 5 k Ω und Dioden (D_1 , D_2 , D_5 , D_6) zur positiven und negativen Betriebsspannung sowie Diacs (D_3 , D_4 , D_7 , D_8) zwischen Eingang und Betriebsspannung, jeweils vorstellbar als zwei antiparallele Z-Dioden mit einer Z-Spannung von 42 V. Eingangsschutzbeschaltungen dienen neben dem Schutz vor Zerstörung durch Überspannung und elektrostatische Entladung (Electrostatic Discharge, ESD) auch der Vermeidung des Latch-up-Effekts, siehe Hinweisboxen.

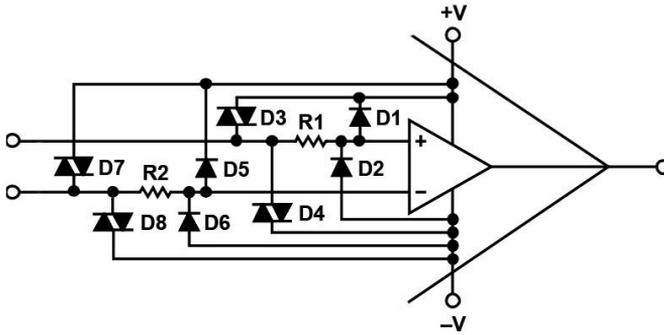


Bild 2.8 Eingangsschutzbeschaltung, [D2], [N1]



Latch-up-Effekt

Es handelt sich um einen Einrast-Effekt mit sprunghafter Verlagerung der Arbeitspunktgrößen eines Bauelements oder einer integrierten Schaltung; eine Zerstörung der betroffenen Anordnung ist möglich. In der Regel ist der Effekt nur durch das Abschalten der Betriebsspannung umkehrbar. Gefährdet sind beispielsweise ein stark gegengekoppelter OPV bei Übersteuerung des invertierenden Eingangs oder CMOS-Schaltungen. Als Gegenmaßnahmen kommen neben der Einhaltung der vorgeschriebenen Betriebsbedingungen Eingangsschutzbeschaltungen und Maßnahmen im Chipdesign zum Einsatz.

Der Rail-to-Rail-Input ergibt sich durch die Verwendung von zwei komplementären Differenzverstärkern als Eingangsstufe. Die Schaltung Q_1 und Q_2 (pnp) im Bild 2.7 ist bis zur negativen Betriebsspannung aussteuerbar und die Schaltung Q_5 und Q_6 (nnp) bis zur positiven. Die Ausgangssignale der beiden Teilschaltungen werden anschließend miteinander kombiniert. Die im Bild 2.7 dargestellten, antiparallel geschalteten Dioden zwischen den beiden Eingängen (+IN, -IN) begrenzen die Differenzspannung der Eingangsstufe auf etwa $\pm 0,6$ V, woraus eine hohe zulässige Eingangsspannung resultiert, siehe [D2]. Die Begrenzung des Diodenstroms erfolgt über die Serienwiderstände R_1 , R_2 , siehe Bild 2.8. Für einen Rail-to-Rail-Output sind die beiden komplementären Transistoren Q_{32} und Q_{33} der Ausgangsstufe mit ihren Emittlern jeweils an die Betriebsspannung angeschlossen und mit dem Kollektor am Ausgang verbunden, sodass sie, vom Ausgang (OUT) betrachtet, als Emitterschaltung agieren. Dadurch ergibt sich bei Vollaussteuerung eine minimale Spannungsdifferenz zwischen Betriebsspannung und Ausgang von lediglich Kollektor-Emitter-Sättigungsspannung, im Fall des ADA4091 etwa 50 mV. Die Ansteuerschaltung für Q_{32} und Q_{33} ist im Bild 2.7 als Verstärkersymbol zusammengefasst und soll an dieser Stelle nicht näher erläutert werden. Das Bild 2.9 links zeigt den Verlauf der Ausgangsspannung bei einer Großsignalaussteuerung und symmetrischer Betriebsspannung ± 15 V. Zu erkennen sind die Eigenschaft Rail-to-Rail sowie die Slew Rate (Tabelle 2.2: SR = 0,46 V/ μ s). Im Vergleich dazu befindet sich rechts daneben der Verlauf der Ausgangsspannung bei Kleinsignalaussteuerung.

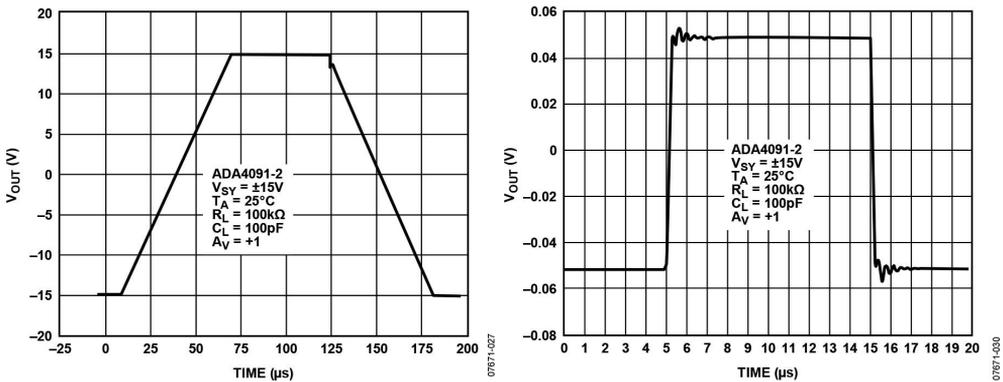


Bild 2.9 Großsignal- und Kleinsignalaussteuerung, [D2], [N1]

Grenz- und Kennwerte, Vergleich reales und ideales Bauelement

Die Grundlage für die Anwendungen eines elektronischen Bauelements bildet sein **Datenblatt** (Data Sheet, Specification), in welchem neben anderen Angaben auch die Grenz- und Kennwerte vermerkt sind.



Datenblatt, Grenz- und Kennwerte

Ein Datenblatt enthält neben dem zusammenfassenden Deckblatt in der Regel folgende Rubriken: Grenzwerte (Absolute Maximum Ratings), Kennwerte (Electrical Characteristics), Beschaltung (Pin Configuration), Kennlinien zum Übertragungsverhalten (Typical Performance Characteristics), Schaltungsprinzip (Schematic Diagram), Testschaltungen und -bedingungen (Test Circuits, Test Conditions), Funktionsbeschreibung (Theory of Operation), Applikationshinweise (Application Notes), typische Applikationen (Typical Applications), Gehäuseinformationen (Packaging Information), Verarbeitungshinweise (ESD, Pb-Free, Solder Temperature), Bestellinformationen (Ordering Guide), Revisionsgeschichte (Revision History, Documentation Support). In der Regel ist ein RoHS-Hinweis (Restriction of Hazardous Substances) hinsichtlich der Bleifreiheit zu finden. Bemerkungen wie „Discontinued“ oder „Obsolete“ weisen darauf hin, dass das Bauelement abgekündigt wurde (keine oder zeitlich begrenzte Lieferung) und Neuentwicklungen mit ihm nicht mehr durchzuführen sind. Grenzwerte stellen die maximal zulässigen Werte dar, deren Über- oder Unterschreitung zur Schädigung, Zerstörung oder Reduzierung der Lebensdauer des Bauteils führt. Die Kennwerte, angegeben als minimaler, typischer und maximaler Wert, garantiert der Hersteller bei Einhaltung der Grenzwerte. Der Abschnitt 3.3 enthält Aussagen über den Zusammenhang zwischen Bauteilbelastung und Zuverlässigkeit.

Grenzwerte werden typisch für folgende Größen angegeben: Betriebsspannung (Supply Voltage), Eingangsspannung (Input Voltage), Eingangsstrom (Input Current), Verlustleistung (Power Dissipation), Sperrschichttemperatur (Junction Temperature), Betriebs-(umgebungs)temperatur (Operating Temperature), Lagertemperatur (Storage Tempera-

ture), Löttemperatur mit Zeitangabe (Lead Temperature), Überspannung (ESD Tolerance), siehe hierzu auch Abschnitt 3.2. Die Tabelle 2.2 enthält die Erläuterung wesentlicher Kennwerte eines Operationsverstärkers. Die Bezeichnungen und Symbole variieren teilweise zwischen den Herstellern. Es sind Angaben zu Fehlergrößen enthalten, auf welche im Abschnitt 2.4 näher eingegangen wird. Den Datenblättern sind neben den Werten auch die zugrunde gelegten Testbedingungen zu entnehmen. Als Beispiel für die realen Werte, aufgeführt als typische Werte des Bauelements, dient der bereits bei den Innenschaltungen erwähnte Operationsverstärker ADA4091-2/ADA4091-4 von Analog Devices, [D2] und [N1], ein VV-OPV.

Tabelle 2.2 Erläuterung ausgewählter Kennwerte

Größe	Erläuterung	OPV-Wert real und ideal (für VV-OPV)	
		real, mit: $U_B = \pm 15 \text{ V}$ und $\vartheta_a = 25 \text{ °C}$ [D2], [N1] typischer Wert	ideal
Eingangsgrößen, Input Characteristics			
Eingangsoffsetspannung, Offset Voltage V_{OS}	siehe Abschnitt 2.4.2	-35 μV	0
Offsetspannungsdrift, Offset Voltage Drift $\Delta V_{OS}/\Delta T$	siehe Abschnitt 2.4.2	3 $\mu\text{V/K}$	0
Eingangsruhestrom, Input Bias Current I_B	siehe Abschnitt 2.4.1	-50 nA	0
Eingangsoffsetstrom, Input Offset Current I_{OS}	siehe Abschnitt 2.4.1	0,5 nA	0
Gleichtaktunterdrückung, Common Mode Rejection Ratio CMRR	siehe (2.6)	121 dB	∞
Leerlaufverstärkung v_L , Open Loop Gain A_{VO}	siehe (2.1), auch v_{Diff} , frequenzabhängig, siehe Bild 2.10 und Abschnitt 2.4.3	119 dB ($R_L = 100 \text{ k}\Omega$)	∞
Differenzeingangswiderstand, Differential Mode Input Resistance r_D	siehe Bild 2.5, allgemein im Bereich von 1 M Ω bis einigen T Ω	keine Angabe	∞
Gleichtakteingangswiderstand, Common Mode Input Resistance r_{GI}	siehe Bild 2.5 und (2.5), allgemein im Bereich von 1 G Ω bis einigen T Ω	keine Angabe	∞
Ausgangsgrößen, Output Characteristics			
Ausgangsaussteuerbarkeit, Output Voltage Swing V_{OH} , V_{OL}	gibt die erreichbaren Werte der U_a an, abhängig von Art der Ausgangsstufe, siehe Bild 2.11	$V_{OH} = 14,980 \text{ V}$ $V_{OL} = -14,996 \text{ V}$ ($R_L = 100 \text{ k}\Omega$, Rail-to-Rail)	$+U_B$ $-U_B$

Tabelle 2.2 Erläuterung ausgewählter Kennwerte (Fortsetzung)

Größe	Erläuterung	OPV-Wert real und ideal (für VV-OPV)	
Ausgangswiderstand r_a , Output Resistor/Impedance Z_{OUT}	abhängig von Frequenz und Gegenkopplung (Open Loop, Closed Loop), siehe (2.9)	Closed Loop: 71 Ω ($f = 1$ MHz, $v_u = 1$)	0
Kurzschlussstrom, Short Circuit Limit I_{SC}	siehe Innenschaltungen	± 20 mA	-
Stromversorgung, Power Supply			
Betriebsspannungsdurch- griff, Power Supply Rejec- tion Ratio PSRR	Maß für die Auswirkungen von Schwankungen der Be- triebsspannung auf Offset- spannung	126 dB	∞
Betriebsstrom I_B , Supply Current I_{SY}	Stromaufnahme ohne Aus- gangsstrom	200 μ A (je OPV)	0
Dynamische Kennwerte, Dynamic Performance			
Ausgangsänderungsge- schwindigkeit, Slew Rate SR	maximale Änderung der U_a je Zeiteinheit, siehe Bilder 2.9 und 2.12	0,46 V/ μ s ($R_L = 100$ k Ω , $C_L = 30$ pF)	∞
Einschwingzeit, Settling Time t_s	Zeit bis zum Erreichen einer stabilen Ausgangsamplitude innerhalb Toleranzband nach Eingangssprung, Bild 2.12	22 μ s (bis Toleranz 0,01 %)	0
Verstärkungs-Bandbreiten- Produkt, Gain Bandwidth Product GBP	siehe (2.10) und Abschnitt 2.4.3	1,27 MHz	∞
Transitfrequenz f_T	Frequenz bei Abfall der Ver- stärkung auf 0 dB durch para- sitäre Effekte, siehe Abschnitt 2.4.3	1,27 MHz	∞
Rauschverhalten, Noise Performance			
Voltage Noise Density e_n	siehe Hinweiskasten zum Rauschen und Bild 2.10	$25 \frac{\text{nV}}{\sqrt{\text{Hz}}}$ (1 kHz)	0
Thermische Eigenschaften, Thermal Performance			
Wärmewiderstand, Thermal Resistance R_{thja} , R_{thjc}	Wärmewiderstand, abhängig von Testbedingungen und Gehäuse	$R_{thja} = 55$ K/W $R_{thjc} = 14$ K/W (16-Lead LFCSP, Bild 2.14, 4-Layer JEDEC-PCB ohne Lüf- ter, mit Exposed Pad, JEDEC siehe [N8])	0

Im Bild 2.10 ist der Frequenzgang der Leerlaufverstärkung (Open Loop Gain) und der Phasenreserve am Beispiel des ADA4091-2 von Analog Devices, [D2] und [N1], dargestellt. Bei der Transitfrequenz $f_T = 1,27$ MHz beträgt die Verstärkung (Open Loop Gain) 0 dB und die

Phasenreserve (Phase Margin) 72° . Darüber hinaus beinhaltet das Bild 2.10 rechts den Frequenzverlauf der Voltage Noise, siehe auch Hinweiskasten Rauschen.

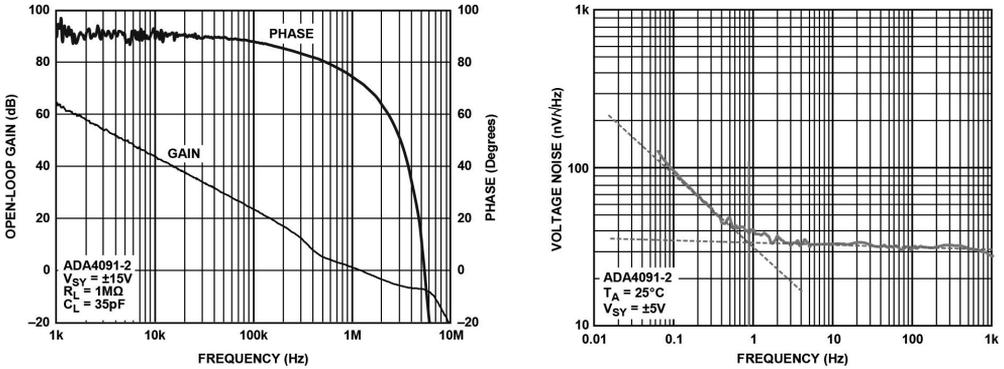


Bild 2.10 Frequenzgänge und Voltage Noise ADA4091-2, [D2], [N1]

Im Bild 2.11 ist die Übertragungskennlinie eines Operationsverstärkers in allgemeiner Form dargestellt, betrieben mit symmetrischer Betriebsspannung. Neben dem Aussteuerbereich (Output Voltage Swing) zwischen V_{OH} und V_{OL} ist die Wirkung einer Offsetspannung V_{OS} angedeutet, welche zu einer Verschiebung der Kennlinie führt. Das Steigungsdreieck liefert mit $\Delta U_a / \Delta U_{Diff}$ die Leerlaufverstärkung.

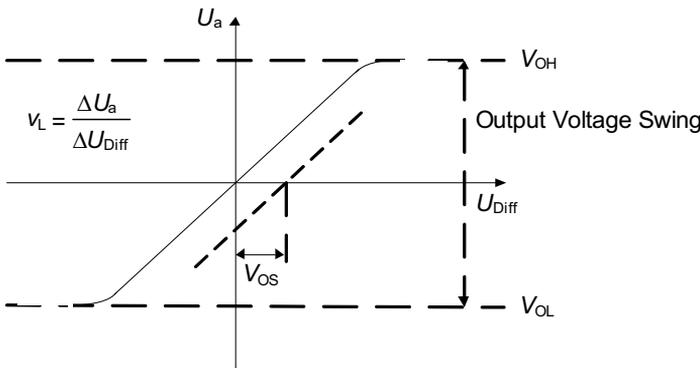


Bild 2.11 Beispiel einer Übertragungskennlinie

Im Bild 2.12 sind die dynamischen Kennwerte Slew Rate SR und Settling Time t_s zu sehen. Am Eingang des Operationsverstärkers wurde ein sprungförmiges Signal angelegt.

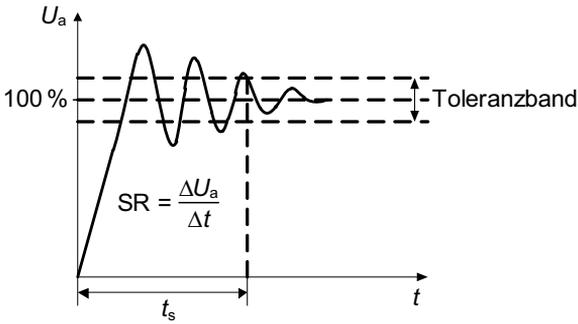


Bild 2.12
Slew Rate und Settling Time



Rauschen von Bauelementen

Unter Rauschen (Noise) versteht man regellos (stochastisch, statistisch) verlaufende Rauschspannungen und -ströme (relevant insbesondere für Audio-, Video-, Mess- und Kommunikationstechnik). Im Bauelement entstehen sie aufgrund der unregelmäßigen Wärmebewegung sowie der Quantisierung von Ladungen, woraus verschiedene, teils sich in ihrer Wirkung überlagernde Rauschquellen resultieren. In Schaltungen kann auch eine Rauscheinkopplung von außen erfolgen (siehe EMV Abschnitt 3.3). Funktionsbedingte Signalanteile von Impuls- und Umschaltvorgängen können ebenfalls als Rauschen bezeichnet werden, beispielsweise das Quantisierungsrauschen bei Umsetzern, siehe Abschnitt 7.4, das Rauschen bei automatischer Eingangsoffsetspannungs-Kompensation, siehe Abschnitt 2.4.2, oder das Grundrauschen von SC-Filtern, siehe Abschnitt 9.3. Das durch einen CPU-Betrieb erzeugte Rauschen auf analogen Größen lässt sich durch einen temporär eingenommenen Sleep Mode vermeiden. Rauschen wird, abgesehen von Rauschgeneratoren zur Erzeugung zufälliger Signale, den Störgrößen zugeordnet. Im Rahmen einer Rauschanalyse erfolgt die spektrale Bewertung der Rauschquellen im Bauelement, typisch hinsichtlich des Anteils am Eingang sowie des Einflusses am Ausgang einer Anordnung. Eine umfangreiche Darstellung der Rauschquellen und der Rauschanalyse ist an dieser Stelle nicht möglich, es wird auf weiterführende Literatur verwiesen, beispielsweise [N5], [S8], [10], [20], [22]. Folgend werden einige Sachverhalte erläutert.

- **Signal-Rausch-Abstand:**
Verhältnis zwischen Signalleistung und Rauschleistung oder Effektivwertquadrat Signalgröße und Effektivwertquadrat Rauschgröße am betrachteten Schaltungspunkt (Signal-Noise-Ratio, SNR)
- **Rauschfaktor und Rauschmaß:**
Rauschfaktor F (Rauschzahl) als Verhältnis des Signal-Rausch-Abstands am Eingang zum Signal-Rausch-Abstand am Ausgang; Rauschmaß $F_{\text{dB}} = 10 \log F$ (auch Noise Figure, NF)