

HANSER



Leseprobe

zu

„Operationsverstärker“

von Matthias Viehmann

Print-ISBN: 978-3-446-45951-9
E-Book-ISBN: 978-3-446-46370-7

Weitere Informationen und Bestellungen unter
<http://www.hanser-fachbuch.de/978-3-446-45951-9>

sowie im Buchhandel

© Carl Hanser Verlag, München

Vorwort und Begleitwort

■ Vorwort zur ersten Auflage

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 Erstellung 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/Operationsverstaerker/9783446430532 hinterlegt. Hinweise auf Fehler im Buch oder gestalterische Empfehlungen sind jederzeit willkommen.

Nordhausen, im August 2016

Matthias Viehmann

■ Vorwort zur 2., überarbeiteten und erweiterten Auflage

Die Tatsache, dass sich die 1. Auflage als Studienliteratur bewährt hat, und Bewertungen, wie „... *didaktisch gut aufbereitet ... klare und gut verständliche Sprache ... anschauliche Praxisbeispiele ...*“, motivierten den Verlag und mich zur 2., überarbeiteten und erweiterten Auflage. Für die Anerkennung und die gestalterischen Hinweise danke ich den Leserinnen und Lesern.

Besonders danke ich dem Carl Hanser Verlag für die Realisierung einer überarbeiteten und erweiterten Auflage. Dadurch konnte ich den Abschnitt 7.9 über Isolationsverstärker, den Abschnitt 11.4 über Hochvolt-Operationsverstärker und vor allem das Kapitel 12 über Anwendungen in der Luft- und Raumfahrttechnik ergänzen. In bewährter Manier sind neben den Grundlagen interessante Praxisbeispiele enthalten, beispielsweise mit einem Mehrkanal-Analog-Front-End, mit Piezoaktorkik, mit einem realen Satelliten und einem Stratosphärenballon. Besonders informativ ist ein Überblick über Effekte von Strahlung in elektronischen Bauelementen im neuen Kapitel 12. Einige Textpassagen und Bilder der ersten Auflage wurden überarbeitet. Im Zusammenhang mit der aktuellen Auflage danke ich nicht nur dem Carl Hanser Verlag, ich erinnere auch an den Fachbuchverlag Leipzig, mit welchem die erste Auflage entstand. Der Fachbuchverlag, vom Hanser Verlag von 1995 bis 2018 als Imprint geführt, hätte 2019 seinen 70. Geburtstag gefeiert.

Für ihre kompetente Unterstützung bei der Erstellung des vorliegenden Werkes danke ich vor allem der Lektorin, Frau Natalia Silakova-Herzberg, sowie Frau Christina Kubiak und Frau Anne Kurth. Für die Genehmigung der Verwendung von Bildmaterial und technischen Daten danke ich den Firmen Analog Devices, Texas Instruments, APEX Microtechnology, Piezosystem Jena GmbH und dem Deutschen Zentrum für Luft- und Raumfahrt e. V. (DLR). Ohne die Bereitstellung von Informationen und die Beratung durch Herrn An-

dreas Kotz, Herrn Dr. Anko Börner und Herrn Dr. Winfried Halle, alle vom Deutschen Zentrum für Luft- und Raumfahrt e. V. Berlin, hätte ich das Kapitel 12 nicht erstellen können, ein ganz besonderer Dank an sie. Für fachliche und gestalterische Hinweise bedanke ich mich herzlich bei Herrn Mario Wolf, Herrn Marcel Brichet und Professor Klaus-Peter Neitzke. Dem studentischen Team BEXUS-IMUFUSION der Hochschule Nordhausen gilt mein aufrichtiger Dank für die Aufbereitung von Informationen des Ballonexperimentes BEXUS-IMUFUSION und für die köstliche Projektzeit, gemeinsam mit den Organisationen und Einrichtungen ESA, DLR, SNSA, SSC, ZARM. Meine Familie stand mir in liebevoller Weise zur Seite, herzlichen Dank.

Eine aktuelle Liste mit verwendeten Formelzeichen, Symbolen und Abkürzungen ist unter www.hanser-fachbuch.de/buch/Operationsverstaerker/9783446459519 hinterlegt. Hinweise und Anmerkungen zum Buch sind nach wie vor herzlich willkommen.

Nordhausen, Januar 2020

Matthias Viehmann

■ Begleitwort von Dr. Anko Börner

Professor Viehmann hat mit viel Sorgfalt ein Buch über Operationsverstärker geschrieben – immer darauf bedacht, die Leser auf ihrer Reise durch die Welt dieser unverzichtbaren elektronischen Bauelemente Stück für Stück mitzunehmen und reales Handwerk zu vermitteln. Im Kapitel zu den Anwendungen in der Raumfahrt berichtet er aus erster Hand, welche Besonderheiten im All auf OPV und Co. warten. Ich bin mir sicher, dass das nicht nur bei „Trekkies“ Interesse weckt. Dem Leser wünsche ich viel Spaß und Erkenntnis, Professor Viehmann alles Gute und viel Energie! Power on!!!

Berlin, Januar 2020

Anko Börner

Inhalt

1	Einführung	13
1.1	Historischer Abriss über den Operationsverstärker	13
1.2	Pädagogische Zielstellungen und didaktisches Konzept	14
2	Grundlagen des Operationsverstärkers	16
2.1	Eigenschaften	16
2.1.1	Wirkungsweise und Kenngrößen	16
2.1.2	Gehäusevarianten	31
2.2	OPV-Grundsätze und Schaltungsanalyse	33
2.3	Verstärkergrundsaltungen	35
2.3.1	Prinzip der Gegenkopplung	35
2.3.2	Nichtinvertierender Verstärker und Spannungsfolger	38
2.3.3	Invertierender Verstärker	39
2.4	Kompensationsmaßnahmen und Bauelementoptimierung	41
2.4.1	Eingangsruestrom-Kompensation	41
2.4.2	Eingangsoffsetspannungs-Kompensation	43
2.4.3	Frequenzgang-Kompensation	44
2.4.4	Optimierung und Funktionsvielfalt	46
3	Anwendungen des Operationsverstärkers	48
3.1	Applikationsvielfalt	48
3.2	Kühlmaßnahmen	49
3.3	Zuverlässigkeitsbetrachtungen	55
4	Analoge Rechenschaltungen	64
4.1	Addierer	64
4.2	Subtrahierer	67
4.3	Integrierer	70
4.4	Differenzierer	74
4.5	Logarithmierer	77
4.6	Potenzierer	82
4.7	Multiplizierer und Dividierer	85

5	Schalter	91
5.1	Komparator	91
5.2	Fensterkomparator	94
5.3	Schmitt-Trigger	96
6	Schwingschaltungen	102
6.1	Astabiler Multivibrator mit Schmitt-Trigger	102
6.2	Dreieck-Rechteck-Oszillator	107
6.3	Spannungsgesteuerter Oszillator (VCO)	110
6.3.1	VCO1 mit Subtrahierer	111
6.3.2	VCO2 mit summierendem Integrierer	114
6.3.3	VCO3 mit unsymmetrischer Betriebsspannung	117
6.4	Phasenregelkreis (PLL)	122
6.5	Pulsweitenmodulator	126
7	Konditionier- und Umsetzungsschaltungen	129
7.1	Instrumentationsverstärker	129
7.2	Phasenschieber	133
7.3	Gleichrichter	137
7.4	Analog-Digital- und Digital-Analog-Umsetzer	140
7.4.1	Analog-Digital-Umsetzer	143
7.4.2	Digital-Analog-Umsetzer	149
7.5	Ladungsverstärker	153
7.6	Fotoempfänger	159
7.7	Negative Impedance Converter und Gyrator	162
7.7.1	Negative Impedance Converter	162
7.7.2	Gyrator	164
7.8	Einstellbare Verstärker und Widerstände	166
7.8.1	Einstellbare Verstärker	166
7.8.2	Einstellbare Widerstände und Variation mit DAU	169
7.9	Isolationsverstärker	175
8	Reglerschaltungen	185
8.1	Überblick	185
8.1.1	Regelkreis	187
8.1.2	Beschreibungsmöglichkeiten von Systemen	189
8.2	Reglertypen und Schaltungsbeispiele	191
8.3	Reglerentwurf am Beispiel PID	199
8.3.1	Verfahren	199
8.3.2	Reglerbeispiel	201

9	Filterschaltungen	204
9.1	Überblick	204
9.2	Aktive RC-Filter	205
9.2.1	Filter mit Einfachgegenkopplung	209
9.2.2	Filter mit Mehrfachgegenkopplung	210
9.2.3	Filter mit Einfachmitkopplung	215
9.3	Switched-Capacitor-Filter	216
9.3.1	Funktionsprinzip	216
9.3.2	Beispiel SC-Filter 2. Ordnung	218
9.3.3	Integrierte SC-Filter	220
10	Stabilisierungsschaltungen und Energiemanagement	224
10.1	Überblick Spannungsstabilisierung	224
10.1.1	Prinzip der Stabilisierung mit OPV	227
10.1.2	Beispiel Universalspannungsregler	231
10.2	Energy Harvesting am Beispiel Thermogenerator	234
10.3	Energiemanagementsystem mit der Power Management Classification ...	240
10.4	Konstantstromquellen	246
11	Leistungs-Operationsverstärker	250
11.1	Aufbau und Eigenschaften	250
11.2	Betriebsvarianten	253
11.2.1	Symmetrische Betriebsspannung	253
11.2.2	Unsymmetrische Betriebsspannung	254
11.2.3	Brückenschaltung	257
11.3	Rückkopplungs-Ersatzschaltung	259
11.4	Hochvolt-Operationsverstärker	263
12	Anwendungen in der Luft- und Raumfahrttechnik	270
12.1	Spezifische Einflüsse auf elektronische Bauelemente	270
12.2	Anwendungen im Satelliten BIROS	276
12.2.1	System BIROS	277
12.2.2	Schaltungsbeispiele im Energiesystem	279
12.3	Anwendungen im Ballonexperiment BEXUS-IMUFUSION	287
12.3.1	System BEXUS-IMUFUSION	288
12.3.2	Schaltungsbeispiel Analog-Front-End AFE	291
	Liste der Übungen	298
	Literatur	300
	Index	306

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, siehe Kasten im Abschnitt 4.7. 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. Realisiert 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 Baustein $\mu\text{A}702$ [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 Buchauflage übersichtlich eingepflegt werden können. In der 2. Auflage wurden der Abschnitt Isolationsverstärker mit einem Analog-Front-End als Applikation, der Abschnitt Hochvolt-Operationsverstärker mit dem Schwerpunkt Piezoaktorik und das interessante Kapitel Anwendungen in der Luft- und Raumfahrt-technik mit dem Satelliten BIROS und dem Ballonexperiment BEXUS-IMUFUSION ergänzt. 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/Operationsverstaerker/9783446459519 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.

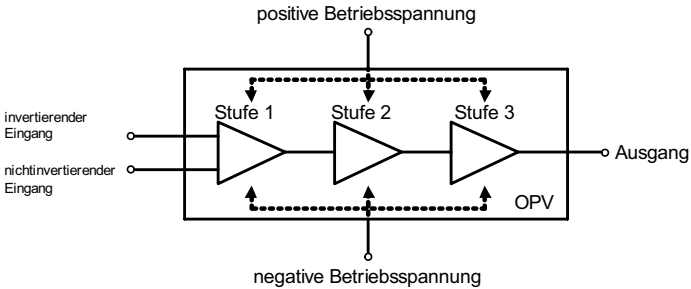


Bild 2.1 Allgemeine dreistufige Struktur des OPV

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.

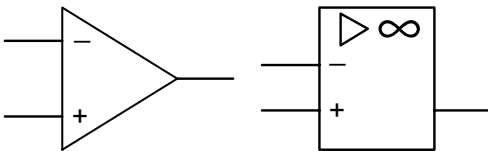


Bild 2.2
Dreieckiges und rechteckiges Schaltzeichen, [S9]

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.

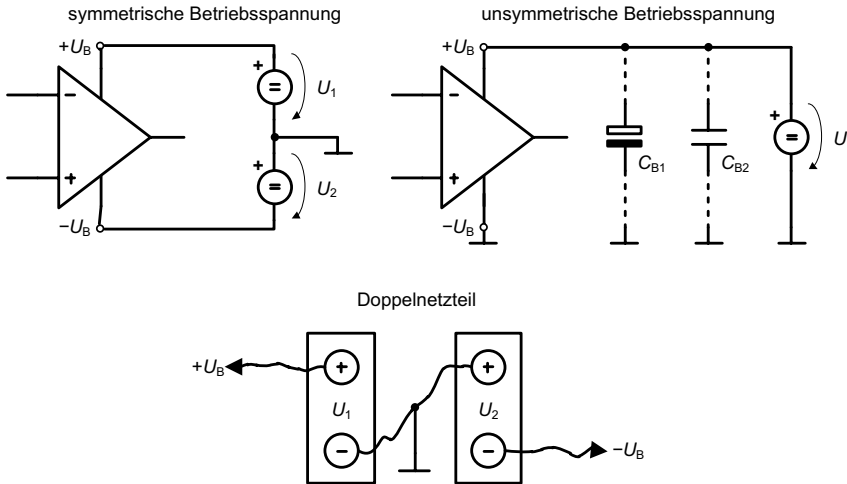


Bild 2.3 Versorgungsvarianten



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 (unbestückt Printed Circuit Board PCB, bestückt Printed Circuit Board Assembly PCBA) 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 (U_{Last}) mit Strommessmöglichkeit (I_{Last}). Ein Potentiometer (P_1) bietet die Abgleichmöglichkeit für $I_{Last} = f(U_{Ref})$.

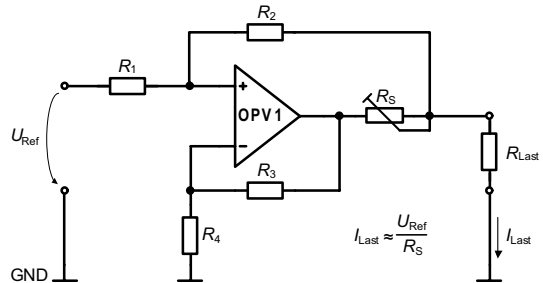
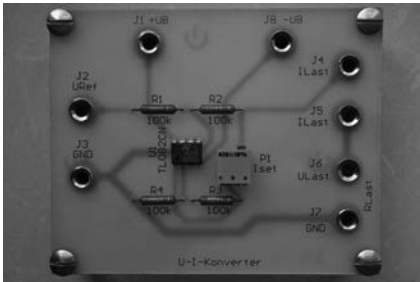


Bild 2.4 Versuchsschaltung einer steuerbaren Konstantstromquelle

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

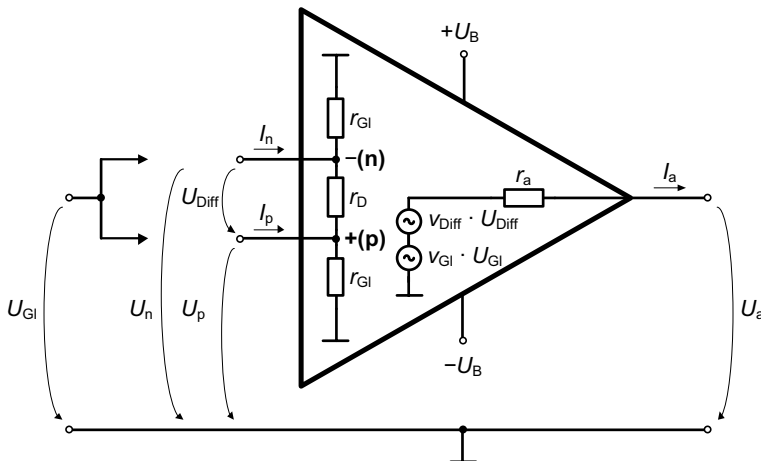


Bild 2.5 Bezeichnungen am Operationsverstärker

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), durch gleichzeitige, thermisch verursachte, driffförmige Änderung der Arbeitspunktlagen der symmetrischen Differenzeingangsstufe des Operationsverstärkers hervorgerufen werden oder als Spannung existieren, welcher das Nutzsignal überlagert ist, siehe beispielhaft High-Side-Strommessung im Abschnitt 12.2.2. 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):

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

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].

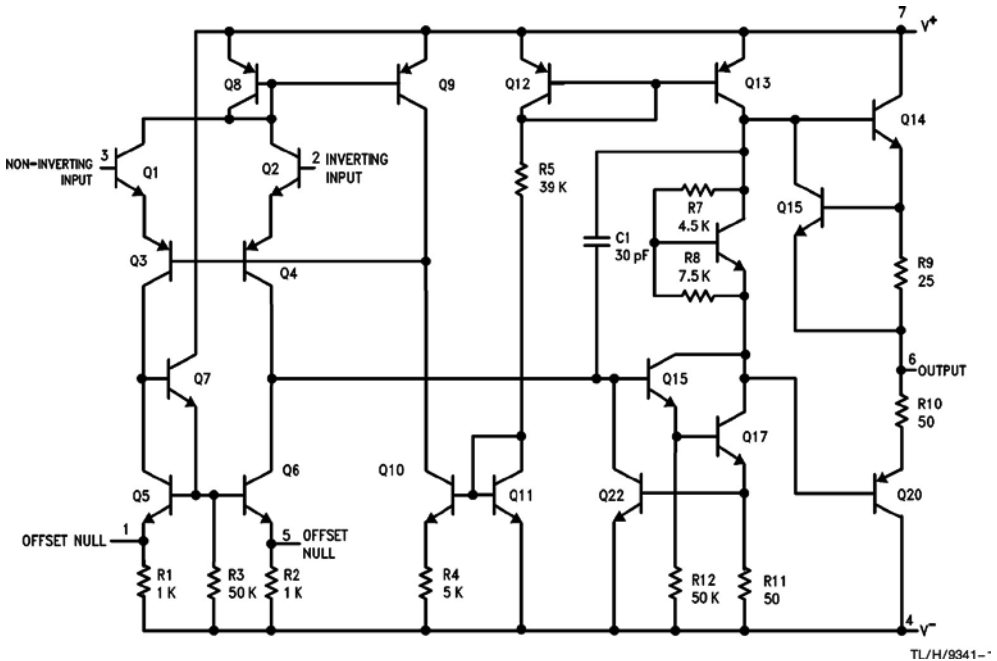


Bild 2.6 Schaltung LM741, [D1] (siehe Hinweis)

Hinweis (Stand August 2019): 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 beschaltete 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. Rail-to-Rail bedeutet: bis hin zur positiven und negativen Betriebsspannung.

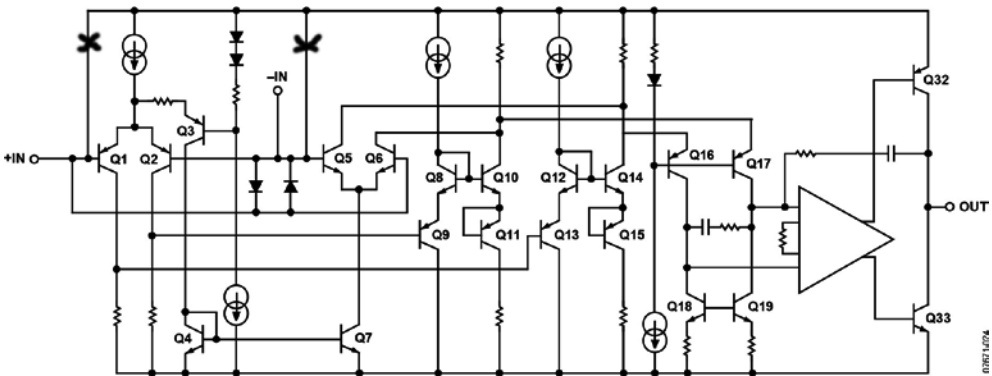


Bild 2.7 Schaltung ADA4091-2/ADA4091-4, [D2], [N1] (siehe Hinweis)

Hinweis (Stand August 2019): 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.

Index

A

Absorptionsmaß 80
Abtasttheorem 144, 205
Addierer 64, 138, 151, 197, 217
Aliasing 144, 205
Allpass 133, 213
Amplitudengang 72, 75, 190, 194, 210
Analog-Digital-Umsetzer 140, 143, 168
Analog-Front-End (AFE) 129, 179, 291
Astabiler Multivibrator
- mit Schmitt-Trigger 102
Ausfallrate 58
Ausfallwahrscheinlichkeit 55
Ausgangsaussteuerbarkeit 26, 28
- Großsignal 24
- Rail-to-Rail 24
Ausgangsruhepotential 253
Ausgangswiderstand 20, 21, 27, 37
Aussteuerungsgrad 261
Automatic Gain Control (AGC) 167
Autozero-Verstärker 43

B

Badewannenkurve 59
Batterie-Management-System (BMS) 95
Betriebsklima 56
Betriebsspannung 17, 253, 254
Betriebsspannungsdurchgriff (PSRR) 27
Betriebsspannungs-Umsetzer 255
Betriebsstrom 27, 167
BEXUS-IMUFUSION 287
Biquad-Filter 218
BIROS (Bispectral InfraRed Optical System)
276

Blockkondensatoren 18, 251
Boucherot-Glied 46, 251
Brückenschaltung 137, 257, 259

C

Chopper-Verstärker 43
Codewort 140
Current Controlled Oscillator (CCO) 110

D

Darlingtontransistoren 261
Datenblatt
- Beispielkennwerte 26
- Inhalt 25
- RoHS-Hinweis 25
Datenkoppler
- isoliert 183
Dehnungsmessstreifen (DMS) 121, 131, 133,
283
- Dehnung 131
Diagnose 57
Diagnosegrundsätze 57
Differenzbetrieb 20
Differenzeingangswiderstand 20, 26
Differenzierer 74, 197
Differenzverstärker
- OPV, Subtrahierer 67
Differenzverstärkung 20, 23
Digital-Analog-Umsetzer 140, 149, 151, 169,
172
Digitales Potentiometer 136, 169
Dividierer 85
Dose Rate (DR) 273

Dreieck-Rechteck-Oszillator 107, 109
 Drei-Tor-Isolation 175, 179
 Druckmessumformer
 - mit PWM 127
 - mit VCO 121
 Drucksensor 121, 127
 Dual-Slope-Converter 143, 146
 Dunkelstromkompensation 160
 Dynamikbereich 167

E

Einfachgegenkopplung 209
 Einfachmitkopplung 215
 Eingangsoffsetspannung 26
 Eingangsoffsetspannungs-Kompensation 43
 Eingangsoffsetstrom 26
 Eingangsruhestrom 26, 74
 Eingangsruhestrom-Kompensation 41
 Eingangsschutzbeschaltungen 18, 23, 41
 Einheitssignale 249
 - Stromeinheitssignal 248
 Elektromagnetische Verträglichkeit 56
 Emitterschaltung 23, 24
 Energiemanagement, technisches
 - Definition 240
 - für Energy Harvesting 242
 - Power Management Classification (PMC) 240
 - Struktur Energiemanagementsystem 240
 Energy Harvesting 154, 234
 Exponentialverteilung 60

F

Fensterkomparator 94
 Filter
 - Klassifizierung 204
 - Ordnung 205
 - Parameter 205
 Filtercharakteristik 133, 212
 Filtertypen
 - Bessel-Filter 212
 - Butterworth-Filter 212
 - Koeffizienten 208

- Tschebyscheff-Filter 213
 Flash-Converter 143, 145
 Flussspannungs-Vervielfacher 23, 100, 261
 Fotoempfänger 159
 - Fotodiode, Laserdiode 159
 - Sender/Empfänger 160
 Frequenzgang-Kompensation 23, 44, 195, 251, 255
 Frequenzmessung 121

G

Gegenkopplung 35, 45
 - gedachte 92
 Gegendaktendstufe
 - AB-Endstufe 23
 - komplementär 261
 - quasi komplementär 261
 Gehäuse 31, 47, 52, 250
 Gleichtaktbetrieb 21
 Gleichtakteingangswiderstand 20, 26
 Gleichtaktsignal 21
 Gleichtaktunterdrückung (CMRR) 22, 23, 26
 Gleichtaktverstärkung 21
 Gyrator 164

H

Historie OPV 13
 Hochvolt-Operationsverstärker 263
 House-Keeping 285

I

Impedanz
 - duale 164
 Induktivität
 - im Schwingkreis 166
 - mittels Gyrator 164
 Inertial Measurement Unit (IMU) 287
 Innenschaltungen
 - ADA4091-2/ADA4091-4 23
 - LM675 252
 - LM741 22
 Instabilität 37, 44, 75
 Instrumentationsverstärker 129, 280

Integrierer 70, 107, 111, 114, 117, 146, 197,
209, 216
Isolationsspannung 176
Isolationsverstärker 175

J

Jitter 107

K

Kleinsignalersatzschaltbild 20
Klirrfaktor 107, 251
Komparator 91, 127, 145, 146
Konstantstromquelle
- steuerbar 19, 246, 248
- Versuchsschaltung 19, 246
Kopplungsarten 175
Kraftmessung 158
Kühlkörper 51
Kurzschlussstrom 27, 233

L

Ladungsverstärker 153
- als Ladungsverstärker 156
- als Spannungsverstärker 155
- Anschlusskabel 154
- piezoelektrische Empfindlichkeit 154
- Piezosensor Quarz 153
Lambda-Sonde 248
Latch-up-Effekt 24, 56
Least Significant Bit (LSB) 141, 149
Leerlaufverstärkung 20, 26, 45
Leistungsaufnahme
- Energiesparmaßnahmen 225
- Managementfunktionen 224
Leistungsbandbreite 264
Leistungs-Operationsverstärker 250
Leiterbahnen
- Masse 57
- Strombelastbarkeit 57
Linear Energy Transfer (LET) 272
Logarithmierer 77

M

Masseschleife 175
Masseverbindungen 17, 18, 57, 251
Masse, virtuell 40
Mehrfachgegenkopplung 210
Messbrücke 182
Messkette
- Messgliedkoeffizient 155
- Messkettenkoeffizient 155
Messsystem 179
Micro-Electro-Mechanical System (MEMS)
158
Micropower OPV 167
Mitzkopplung 35, 37, 44, 96, 163
Modulo-n-Zähler 123, 125
Most Significant Bit (MSB) 141
MTBF, MTTF, MTTF 59
Multiplexer 140, 141, 168, 181
Multiplizierer 85
Multiplying DAC 152, 172
Multivibrator
- astabil 102
- bistabil 102
- monostabil 102
Musterschaltungen
- Aufbau, Analyse 35

N

Negative Impedance Converter (NIC) 162
Nullpunkt
- lebender 128, 181, 248, 249
- toter 248, 249

O

Obsoleszenz 58
Offsetspannungsdrift 26
Optokoppler 176
OPV ADA4091-2/ADA4091-4 23, 26, 32
OPV-Grundsätze 33
OPV LM675 251
OPV LM741 22
OPV-Typen
- VV, CC, VC, CV 19
Oszillator 107, 123
Overvoltage Protection (OVP) 23

P

Pegelumsetzer 69
 Phasendetektor 123
 Phasengang 190, 194, 206
 Phasenregelkreis (PLL) 122
 Phasenreserve 46, 195
 Phasenschieber 133, 136
 Phasenverschiebung 44, 133, 195
 Phase Shift Keying 278
 PID-Regler 197, 199
 Piezoaktorik 265
 Piezosensor 153, 158
 Potentialversatz 57
 Potentiometer
 - digital 183
 Potenzfunktion 85
 Potenzierer 82
 Präzisionsgleichrichter
 - Einweg 137
 - Zweiweg 137, 139
 Präzisionsverstärker 46
 Programmable Gain Amplifier (PGA) 166
 Programmable Operational Amplifier 166
 Pulsweitenmodulation (PWM) 105, 122, 126
 Pulsweitenmodulator 105, 126

Q

Quantisierungsrauschen 144
 Quarzoszillatoren 107

R

Radiation Hardness Assurance (RHA) 273
 Radizierer 85, 89
 Rail-to-Rail-Input-Output (RRIO) 23
 Rauschen 27, 29, 167
 Rauschfaktor 29
 Rauschmaß 29
 Real Time Clock (RTC) 107
 Redundanz 56, 59, 62
 Referenzspannung 181
 Regelgüte 185, 188
 Regelkreis
 - einschleifig 187
 - Standardregelkreis 188

Regelungsarten 186
 Reglerentwurf
 - Verfahren 199
 - Ziegler & Nichols 200, 201
 Reglerschaltungen 196, 198
 Reglertypen 191
 Resistance Temperature Detector (RTD)
 291
 Rückkopplung 35, 187, 259
 Rückkopplungs-Ersatzschaltung 259
 Rückkopplungsfaktor 35
 Rückkopplungsnetzwerk 36

S

Safe Operating Area Protection 251
 Sägezahnspannung 109, 127
 Sallen-Key-Schaltung 215
 Sample/Hold 145, 168
 SC-Anordnungen
 - Funktionsprinzip 171
 - SC-Filter 216, 217
 - SC-Integrator 216
 Schalthysterese 96
 Schaltungsanalyse 34
 Schaltzeichen OPV 17
 Schleifenverstärkung 36, 45
 Schmitt-Trigger 107, 111, 114, 117
 - Floating 100
 - invertierend 97
 - nichtinvertierend 96
 - unsymmetrisch 99
 Schutzschaltungen 49, 56, 251
 Seebeck-Koeffizient 235
 Selbstüberwachung 128
 Servomotor-Ansteuerung 255
 Settling Time 27
 Sigma-Delta-Umsetzer 143
 Signaldämpfung 183
 Signal-Rausch-Abstand (SNR) 29, 167
 Single Event Effects (SEE) 272
 Slew Rate 27
 Solarstrahlung 271
 Spannungs-Frequenz-Umsetzer 143
 Spezialverstärker 46
 Stabilisierung
 - Low-Dropout Regler 230

- mit OPV 227
- Schaltregler 225
- Universalspannungsregler 231
- State-Variable-Filter 218
- Stratosphärenballon 287
- Stromeinheitssignal 181
- Strommessung
 - Hall-Sensor mit Digitalisierung 148
 - Hall-Sensor mit Pegelumsetzer 69
 - High-Side- 280
- Subtrahierer 67, 111, 124, 129, 161, 255
 - Elektrometer- 292
- Successive-Approximation-Converter 143
- Superposition 34, 67, 134, 255, 293
- Systembeschreibung
 - Bildbereich 190
 - Frequenzbereich 190
 - Zeitbereich 189
 - Zustandsraummodell 190
- Systemzuverlässigkeit 60

T

- Takterzeugung mit PLL 125
- Tastverhältnis 86, 105
- Teilchenstrahlung 271
- Temperaturregelung 189, 201
- Temperaturstress 252
- Thermische Größen
 - Analogie, Modell 50
 - Wärmestrom 50
- Thermoelektrizität 234
- Thermogenerator
 - Gesetzmäßigkeiten 236
 - Seebeck-Koeffizient 237
 - Spannungsaufbereitung 235
 - Thermospannung 237
- Thermometercode 145
- Thermospannung 234
- Tiefpassfilter
 - aktiv 182, 209, 210, 213, 215
 - passiv 206
 - SC-Filter 217
- Total Harmonic Distortion (THD) 251
- Total Ionizing Dose (TID) 273
- Transimpedanz-Verstärker 19
- Transitfrequenz 27, 46

- Transkonduktanz-Verstärker 19, 169
- Trennung
 - galvanische 175
- True RMS 139

U

- Übertragungsfunktion 190, 191
 - Tiefpass allgemein 207

V

- Variable Gain Amplifier (VGA) 168
- Verluste
 - Derating 53, 55
 - Kühlmaßnahmen 52
 - Leistungsaufnahme 142, 166, 224
 - Reduzierungsmaßnahmen 49
 - Verlustleistung 230, 233, 256
- Verstärkergrundsaltungen
 - invertierend 39, 67, 114, 197, 260
 - nichtinvertierend 38, 68, 156, 169, 253, 262
 - Spannungsfolger 39, 53, 129, 144, 195, 215, 255, 256
- Verstärkungs-Bandbreiten-Produkt 27, 195
- Vollbrücke 131
- Voltage Controlled Oscillator (VCO)
 - VCO1, VCO2, VCO3 110, 123
 - Voltage Controlled Xtal Oscillator (VCXO) 111, 125

W

- Wärmewiderstand 27, 50
- Widerstandsnetzwerk
 - gewichtet 151
 - R-2R-Netzwerk 150, 151, 169
 - Widerstandskette 149
- Widlar, Robert J. 14
- Wirkungsgrad 239, 250, 262

Z

- Zuverlässigkeit 55
 - Bewertung 58
 - Schaltbilder 59