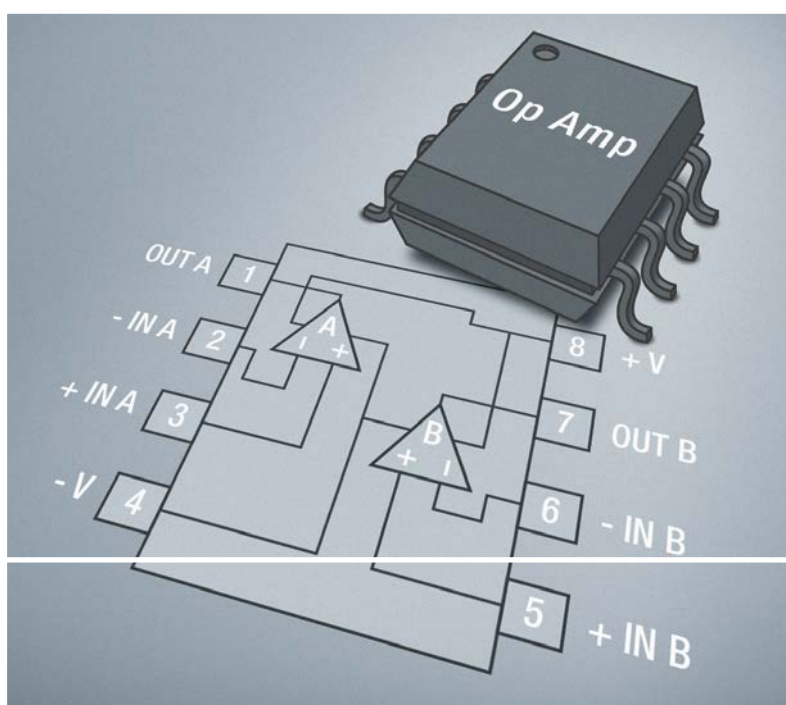


Matthias Viehmann



Operations- verstärker

Grundlagen, Schaltungen, Anwendungen



3., aktualisierte und erweiterte Auflage

HANSER

Disclaimer zur Barrierefreiheit

Der Carl Hanser Verlag unternimmt große Anstrengungen, um seine Produkte barrierefrei zu machen. Dazu gehört auch, dass Bilder oder Tabellen für blinde und sehbehinderte Menschen zugänglich gemacht werden. Dies geschieht durch zusätzliche beschreibende Texte (Alternativtexte), die in den Daten integriert sind. Die Alternativtexte können von assistiven Technologien (z. B. Screenreadern) vorgelesen werden. Bei der Erstellung dieser Texte kommt eine KI zum Einsatz. Die inhaltliche Verantwortung liegt weiterhin bei den Lektor:innen und Autor:innen.

Viehmann Operationsverstärker



Ihr Plus – digitale Zusatzinhalte!

Auf unserem Download-Portal finden Sie zu diesem Titel kostenloses Zusatzmaterial.

Geben Sie dazu einfach diesen Code ein:

plus-nb6u8-5d32k

plus.hanser-fachbuch.de



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

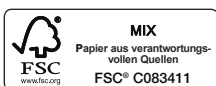
Grundlagen, Schaltungen, Anwendungen

3., aktualisierte und erweiterte Auflage

HANSER

Über den Autor:

Prof. Dr.-Ing. Matthias Viehmann ist Professor für Industrieelektronik an der Hochschule Nordhausen.



Print-ISBN: 978-3-446-47897-8

E-Book-ISBN: 978-3-446-47898-5

Die allgemein verwendeten Personenbezeichnungen gelten gleichermaßen für alle Geschlechter.

Alle in diesem Werk enthaltenen Informationen, Verfahren und Darstellungen wurden zum Zeitpunkt der Veröffentlichung nach bestem Wissen zusammengestellt. Dennoch sind Fehler nicht ganz auszuschließen. Aus diesem Grund sind die im vorliegenden Werk enthaltenen Informationen für Autor:innen, Herausgeber:innen und Verlag mit keiner Verpflichtung oder Garantie irgendeiner Art verbunden. Autor:innen, Herausgeber:innen und Verlag übernehmen infolgedessen keine Verantwortung und werden keine daraus folgende oder sonstige Haftung übernehmen, die auf irgendeine Weise aus der Benutzung dieser Informationen – oder Teilen davon – entsteht. Ebenso wenig übernehmen Autor:innen, Herausgeber:innen und Verlag die Gewähr dafür, dass die beschriebenen Verfahren usw. frei von Schutzrechten Dritter sind. Die Wiedergabe von Gebrauchsnamen, Handelsnamen, Warenbezeichnungen usw. in diesem Werk berechtigt also 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.

Die endgültige Entscheidung über die Eignung der Informationen für die vorgesehene Verwendung in einer bestimmten Anwendung liegt in der alleinigen Verantwortung des Nutzers.

Bibliografische Information der Deutschen Nationalbibliothek:

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

Dieses Werk ist urheberrechtlich geschützt.

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

Wir behalten uns auch eine Nutzung des Werks für Zwecke des Text und Data Mining nach § 44b UrhG ausdrücklich vor.

© 2025 Carl Hanser Verlag GmbH & Co. KG, München
Vilshofener Straße 10 | 81679 München | info@hanser.de
www.hanser-fachbuch.de

Lektorat: Dipl.-Ing. Natalia Silakova-Herzberg
Herstellung: le-tex publishing services GmbH, Leipzig
Coverkonzept: Marc Müller-Bremer, www.rebranding.de, München
Covergestaltung: Max Kostopoulos
Titelmotiv: © Max Kostopoulos
Satz: Eberl & Koesel Studio, Kempten
Druck: CPI Books GmbH, Leck
Printed in Germany

Inhalt

Vorwort und Begleitwort	IX
1 Einführung	1
1.1 Historischer Abriss über den Operationsverstärker	1
1.2 Pädagogische Zielstellungen und didaktisches Konzept	3
2 Grundlagen des Operationsverstärkers	7
2.1 Eigenschaften	7
2.1.1 Wirkungsweise und Kenngrößen	7
2.1.2 Gehäusevarianten	22
2.2 OPV-Grundsätze und Schaltungsanalyse	24
2.3 Verstärkergrundsaltungen	26
2.3.1 Prinzip der Gegenkopplung	26
2.3.2 Nichtinvertierender Verstärker und Spannungsfolger	29
2.3.3 Invertierender Verstärker	31
2.4 Kompensationsmaßnahmen und Bauelementoptimierung	32
2.4.1 Eingangsruhestrom-Kompensation	32
2.4.2 Eingangsoffsetspannungs-Kompensation	34
2.4.3 Frequenzgang-Kompensation	36
2.4.4 Optimierung und Funktionsvielfalt	38
2.4.5 Programmierbare Analogbaugruppen	39
2.5 Gleichtaktspannungen in OPV-Applikationen	41
2.5.1 Gleichtaktspannung am Beispiel Instrumentationsverstärker	41

2.5.2	Instrumentation Amplifier Diamond Plot Tool	44
2.5.3	Applikation Instrumentationsverstärker mit Vollbrücke	46
2.6	Fehlereinflüsse in Schaltungen	50
2.6.1	Masse und Potentialversatz	50
2.6.2	Impedanzen	54
2.6.3	Thermospannung	56
2.6.4	Rauschen	58
3	Anwendungen des Operationsverstärkers	63
3.1	Applikationsvielfalt	63
3.2	Kühlmaßnahmen	64
3.3	Zuverlässigkeitsbetrachtungen	70
4	Analoge Rechenschaltungen	81
4.1	Addierer	81
4.2	Subtrahierer	84
4.3	Integrierer	88
4.4	Differenzierer	92
4.5	Logarithmierer	95
4.6	Potenzierer	100
4.7	Multiplizierer und Dividierer	103
5	Schalter	109
5.1	Komparator	109
5.2	Fensterkomparator	112
5.3	Schmitt-Trigger	114
6	Schwingschaltungen	121
6.1	Astabiler Multivibrator mit Schmitt-Trigger	121
6.2	Dreieck-Rechteck-Oszillator	126
6.3	Spannungsgesteuerter Oszillator (VCO)	129
6.3.1	VCO1 mit Subtrahierer	130
6.3.2	VCO2 mit summierendem Integrierer	132
6.3.3	VCO3 mit unsymmetrischer Betriebsspannung	135
6.4	Phasenregelkreis (PLL)	141
6.5	Pulsweitenmodulator	145

7	Konditionier- und Umsetzungsschaltungen	149
7.1	Instrumentationsverstärker	149
7.2	Phasenschieber	153
7.3	Gleichrichter	157
7.4	Analog-Digital- und Digital-Analog-Umsetzer	161
7.4.1	Analog-Digital-Umsetzer	164
7.4.2	Digital-Analog-Umsetzer	169
7.5	Ladungsverstärker	174
7.6	Fotoempfänger	181
7.7	Negative Impedance Converter und Gyrator	184
7.7.1	Negative Impedance Converter	184
7.7.2	Gyrator	185
7.8	Einstellbare Verstärker und Widerstände	188
7.8.1	Einstellbare Verstärker	188
7.8.2	Einstellbare Widerstände und Variation mit DAU	191
7.9	Isolationsverstärker	197
8	Reglerschaltungen	209
8.1	Überblick	209
8.1.1	Regelkreis	211
8.1.2	Beschreibungsmöglichkeiten von Systemen	214
8.2	Reglertypen und Schaltungsbeispiele	216
8.3	Reglerentwurf am Beispiel PID	224
8.3.1	Verfahren	225
8.3.2	Reglerbeispiel	226
9	Filterschaltungen	229
9.1	Überblick	229
9.2	Aktive RC-Filter	230
9.2.1	Filter mit Einfachgegenkopplung	234
9.2.2	Filter mit Mehrfachgegenkopplung	236
9.2.3	Filter mit Einfachmitkopplung	240
9.3	Switched-Capacitor-Filter	242
9.3.1	Funktionsprinzip	242
9.3.2	Beispiel SC-Filter 2. Ordnung	244
9.3.3	Integrierte SC-Filter	246

9.4	Entwurf mehrstufiger Filterapplikationen	249
9.4.1	Tiefpass 4. Ordnung mittels Filterdesigntool	249
9.4.2	Programmierbarer Breitbandpass auf Basis Sallen-Key nach dem Prinzip Equal Components mittels Simulation	253
10	Stabilisierungsschaltungen und Energiemanagement	267
10.1	Überblick Spannungsstabilisierung	267
10.1.1	Prinzip der Stabilisierung mit OPV	271
10.1.2	Beispiel Universalspannungsregler	274
10.2	Energy Harvesting am Beispiel Thermogenerator	277
10.3	Energiemanagementsystem mit der Power Management Classification ..	283
10.4	Konstantstromquellen	290
11	Leistungs-Operationsverstärker	295
11.1	Aufbau und Eigenschaften	295
11.2	Betriebsvarianten	298
11.2.1	Symmetrische Betriebsspannung	298
11.2.2	Unsymmetrische Betriebsspannung	299
11.2.3	Brückenschaltung	303
11.3	Rückkopplungs-Ersatzschaltung	305
11.4	Hochvolt-Operationsverstärker	309
12	Anwendungen in der Luft-und Raumfahrttechnik	317
12.1	Spezifische Einflüsse auf elektronische Bauelemente	317
12.2	Anwendungen im Satelliten BIROS	324
12.2.1	System BIROS	324
12.2.2	Schaltungsbeispiele im Energiesystem	327
12.3	Anwendungen im Ballonexperiment BEXUS-IMUFUSION	335
12.3.1	System BEXUS-IMUFUSION	336
12.3.2	Schaltungsbeispiel Analog-Front-End AFE	340
12.4	Anwendungen im Ballonexperiment BEXUS-ELFI	346
12.4.1	System BEXUS-ELFI	346
12.4.2	Schaltungsbeispiel Analog-Front-End AFE	347
	Literatur	359
	Index	365

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 Luster mann 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 online 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 Piezoaktorik, mit einem realen Satelliten und einem Stratosphärenballon. Besonders informativ ist ein Überblick über Effekte von Strahlung in elektronischen Bauelementen im neuen Kapi-

tel 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 Andreas 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 online 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

Vorwort zur 3., aktualisierten und erweiterten Auflage

Willkommen zur aktuellen Auflage. Diese empfängt Sie mit praxisorientierten Neuerungen zu den Schwerpunkten Signalkonditionierung und Schaltungsdesign. Ergänzt wurden die Musterapplikationen Analog-Front-End und programmierbarer Breitbandpass sowie eine weitere Anwendung in der Luft- und Raumfahrttechnik als Experiment zur Magnetfeldmessung an einem Stratosphärenballon. Beschrieben sind das Schaltungsdesign und die Schaltungsanalyse von OPV-Applikationen mithilfe von Simulation sowie Design- und Analysetools. Die Auswirkungen von Gleichtaktspannungen am Instrumentationsverstärker und ausgewählte Fehlereinflüsse in Schaltungen durch Impedanzen, Masseführung, Temperatur und Rauschen wurden ebenfalls in das Portfolio aufgenommen. Das Buch bleibt seinem Konzept treu: Grundlagen, Schaltungen, Anwendungen. Eine Besonderheit des Lehrbuches besteht darin, dass in zahlreichen Applikationen reale Bauelemente zum Einsatz kommen.

Ich gehe fest davon aus, dass Sie der historische Gruß vom $\mu A702$, $\mu A709$ und $\mu A741$ in Abschnitt 1.1 erwärmen wird. Begeistert vom Operationsverstärker ist auch Matthew Duff. Ich danke ihm sehr für seine fachlichen Auskünfte und vor allem für sein Begleitwort zu dieser Auflage. Thank you, Matt! Mein Dank für ihre Unterstützung gilt darüber hinaus Professor Klaus-Peter Neitzke, Mario Wolf, Katrin Rehfeldt, Jonas Jelonek und Niclas Bierwisch. Ich bedanke mich beim Hanser Verlag für die Realisierung, konkret bei meiner Lektorin, Frau Natalia Silakova-Herzberg, und bei Frau Christina Kubiak für die Koordinierung und die Hilfe bei der Gestaltung. Ein besonders aufmerksamer und herzlicher Dank geht an meine Familie, allen voran an meine Frau! Darüber hinaus möchte ich auf die Danksagungen für die Bereitstellung von Projektdokumentationen und Bildmaterial im Literaturverzeichnis aufmerksam machen.

Die Analogtechnik und der Operationsverstärker sind untrennbar miteinander verbunden. Der Charakter der Natur ist analog. Deshalb kann man auf das Bauelement und seine Applikationen zur Signalkonditionierung nicht verzichten.

Onlinematerial zum Buch, beispielsweise eine aktuelle Liste mit verwendeten Formelzeichen, Symbolen und Abkürzungen, eine Liste mit den Übungen und eine Liste mit den Hinweiskästen, ist auf plus.hanser-fachbuch.de hinterlegt. Den Zugangscode finden Sie auf S. I des Buches.

Nordhausen, Juli 2025

Matthias Viehmann

Begleitwort von Matthew Duff

When you first look at an op amp, it's a weird and confusing thing: it's a block with a huge, poorly specified gain, useless without other components around it (unless you count making bad comparators). At first, you learn about this "virtual ground" concept, which will let you do DC analysis. But as soon as you're comfortable, you'll learn your new virtual ground friend can't help you at high frequencies: you must learn feedback theory instead. And why oh why can't we just have one gain equation? Why $(1 + R_f/R_g)$ for positive gain and $-R_f/R_g$ for negative? Even though it's the same exact circuit! (Just with the input and ground terminals switched.) You'll learn that too. And that's not even talking about the problems real op amps have: bias current, offset, gain bandwidth product, slew rate, noise, stability, etc. How did this quirky IC get to be the most used analog block in printed circuit board designs?

Because it is so flexible. The op amp allows you to force two nodes to be the same voltage. This is a powerful thing. You can build gain stages, filter stages, integrators, sample and hold circuits, summers, current sources, and transimpedance amplifiers all with this fundamental block. If you master how this block works, learning other specialty amps like instrumentation amps, current sense amps, fully differential amps, and difference amplifiers is straightforward. And despite all its peculiarities, the op amp is a more trustworthy friend than that simpler building block, the transistor. It is just the right amount of complexity: powerful enough to reliably do its job but simple enough to configure in all sorts of ways.

Once you master the op amp, you are well on your way to being an analog board designer.

February 2025

Matt Duff, Analog Devices

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 (OpAmp, 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 Rechenschaltun-

gen (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 erstmals in den frühen 60er-Jahren durch **Robert J. Widlar** von **Fairchild Semiconductor Corporation**, genannt „The Father of Analog Integrated Circuit“, beginnend mit dem Baustein **μ A702**. Nachdem Widlar diesen ersten integrierten Operationsverstärker 1963 entwickelte, brachte ihn Fairchild 1964 auf den Markt. Seine Eigenschaften wurden durch Widlar verbessert, sodass 1965 der **μ A709** folgte. Basierend auf diesen Vorarbeiten und dem **LM101**, welcher von Widlar nach seinem Wechsel zu National Semiconductor entworfen wurde, entwickelte **Dave Fullagar** bei Fairchild den legendären Operationsverstärker **μ A741**, der 1968 auf den Markt kam. Die Angaben zur Entwicklungsgeschichte sind [6], [S1], [S3], [N16], [N17], [N18], [N19] und [N20] entnommen, wobei vor allem auf das Computer History Museum (CHM) in Mountain View (California) aufmerksam gemacht wird, [N16]. Mit Bild 1.1 ist ein **historischer Gruß an Robert J. Widlar, Dave Fullagar und die Fairchild Eight (Traitorous Eight)** verbunden. Zu sehen sind die Operationsverstärker μ A702, μ A709 und μ A741 als Originalteile von Fairchild.

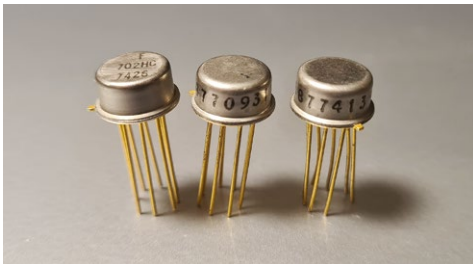
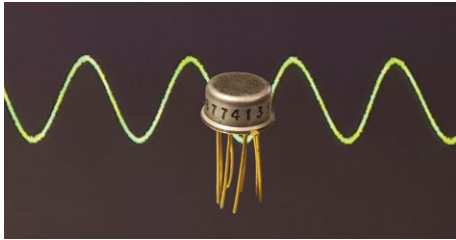


Bild 1.1

Originalteile von Fairchild μ A702, μ A709 und μ A741

Der dargestellte μ A741 wurde 1969 gefertigt, also nur ein Jahr nach seiner Markteinführung. Er funktioniert nach wie vor. Das im Bild 1.2 enthaltene Ausgangssignal entstammt einer Testschaltung mit dem μ A741 von 1969 und besitzt 1969 Hz.

**Bild 1.2**

OPV μ A741 von 1969 und Ausgangssignal seiner Testschaltung mit 1969 Hz

Durch die nahezu idealen Eigenschaften des Operationsverstärkers, beispielsweise sehr hohe Leerlaufverstärkung und hohe Eingangsimpedanzen, kann das gewünschte Verhalten der Applikation allein durch die äußere Beschaltung des OPV bestimmt werden. Losgelöst vom Einsatz in Analogrechnern, siehe Hinweiskasten im Abschnitt 4.7, 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 Variantenvielfalt extrem erhöht, da die Eigenschaften der Operationsverstärker in Abhängigkeit vom Einsatzzweck gezielt optimiert wurden. Beispielfhaft können die Reduzierung der Drift, des Rauschens und des Eingangsstroms sowie die Erhöhung der Bandbreite genannt werden, siehe Abschnitt 2.4.4. Einige Varianten beinhalten Zusatzfunktionen für spezielle Anwendungen (beispielsweise Potentialtrennung oder Filter) und sind als Funktionseinheit in komplexe Schaltungen eingebettet. War der μ A741 noch ein als universell zu bezeichnender OPV, bieten inzwischen zahlreiche Hersteller ein umfangreiches Portfolio spezifischer Varianten in unterschiedlichen Herstellungstechnologien und Gehäuseformen an. Aktuell existieren auch programmierbare Analogbaugruppen, siehe Abschnitt 2.4.5.

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,
- Kennenlernen ausgewählter Design- und Analysetools.

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 Ein-

steigers 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 3. Auflage wurden Aussagen über die Eigenschaften von Operationsverstärkern und über Fehlereinflüsse in Schaltungen ergänzt sowie das Kapitel über Filter und das Kapitel über Anwendungen in der Luft- und Raumfahrttechnik erweitert. Genutzt wurden einige **Design- und Analysetools** sowie die **Simulationssoftware LTspice**:

- Instrumentation Amplifier Diamond Plot Tool von Analog Devices, [N24], siehe Abschnitt 2.5,
- Analog Filter Wizard von Analog Devices, [N21], siehe Abschnitt 9.4,
- Spice Simulator Software LTspice von Analog Devices, [N27], siehe Abschnitte 2.5, 9.4 und 12.4,

Das Buch enthält Zusatzinformationen über die Schaltungen und Sachverhalte angrenzender Themengebiete, Anmerkungen zum besseren Verständnis sowie Hinweise für die praktische Umsetzung von Schaltungen. Onlinematerial zum Buch, beispielsweise eine Liste mit verwendeten Formelzeichen, Symbolen und Abkürzungen, eine Liste mit den Übungen und eine Liste mit den Hinweiskästen, ist unter *plus.hanser-fachbuch.de* hinterlegt. Den Zugangscode finden Sie auf S. I des Buches. 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 das Werk einen Beitrag zur Ausprägung der Technikbegeisterung und zur systematischen Herangehensweise bei der Schaltungsentwicklung liefern.

2

Grundlagen des Operationsverstärkers

In diesem 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. Hinweise zum Schaltungsdesign ergänzen die Ausführungen.

2.1 Eigenschaften

2.1.1 Wirkungsweise und Kenngrößen

Der Operationsverstärker (OPV, OV), Operational Amplifier (OpAmp, 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]. Folgend werden die wesentlichen Grundlagen des Bauelements beschrieben.

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

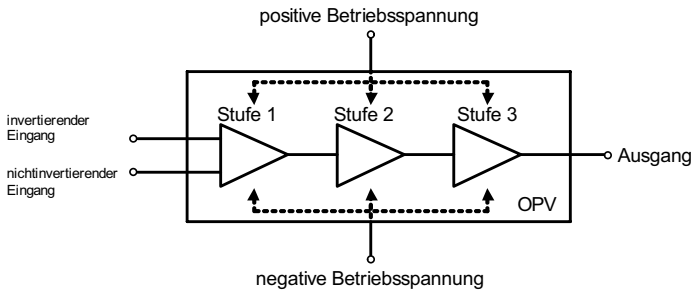


Bild 2.1 Allgemeine dreistufige Struktur des OPV

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 60617-13:1993, [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.

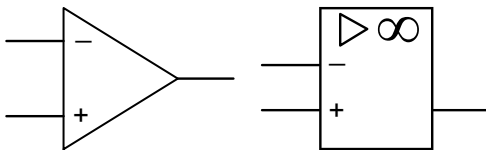


Bild 2.2

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 unter-

scheidet 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.

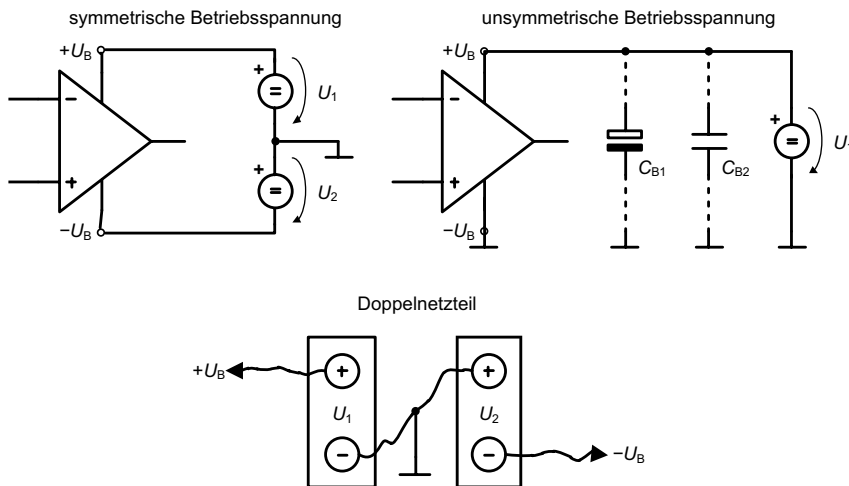


Bild 2.3 Versorgungsvarianten



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 sowie Abschnitt 2.6. 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 $I_{Last} = f(U_{Ref})$.

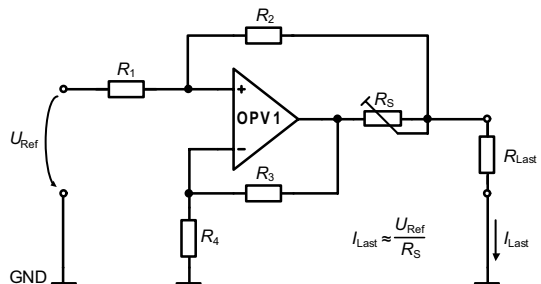
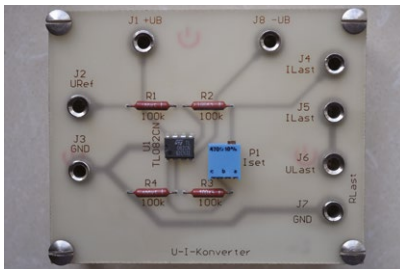


Bild 2.4 Versuchsschaltung einer steuerbaren Konstantstromquelle

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, nieder- ohmiger Ausgang
Current-Current	CC-Typ, Strom-Verstärker	niederohmiger Eingang, hoch- ohmiger Ausgang
Voltage-Current	VC-Typ, Transkonduktanz-Verstärker (Operational Transconduc- tance Amplifier, OTA)	hochohmiger Eingang, hoch- ohmiger Ausgang, bevorzugt zum Treiben von Koaxialleitungen
Current-Voltage	CV-Typ, Transimpedanz-Verstärker	niederohmiger Eingang, nieder- ohmiger 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 (Kleinsignalersatzschaltbild). 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

Ausgangswiderstand bei Open Loop, für Closed Loop siehe (Formel 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 Gleichaktspannung 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. Zum Gleichtaktbetrieb und zum Diamond Plot befinden sich Aussagen im Abschnitt 2.5.

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):

$$CMRR_{dB} = 20 \lg \left| \frac{v_{Diff}}{v_{Gl}} \right| \quad (2.6)$$

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 μ A741 von Fairchild zurückzuführen – ein Meilenstein in der OPV-Entwicklung, siehe Abschnitt 1.1 und [S3].

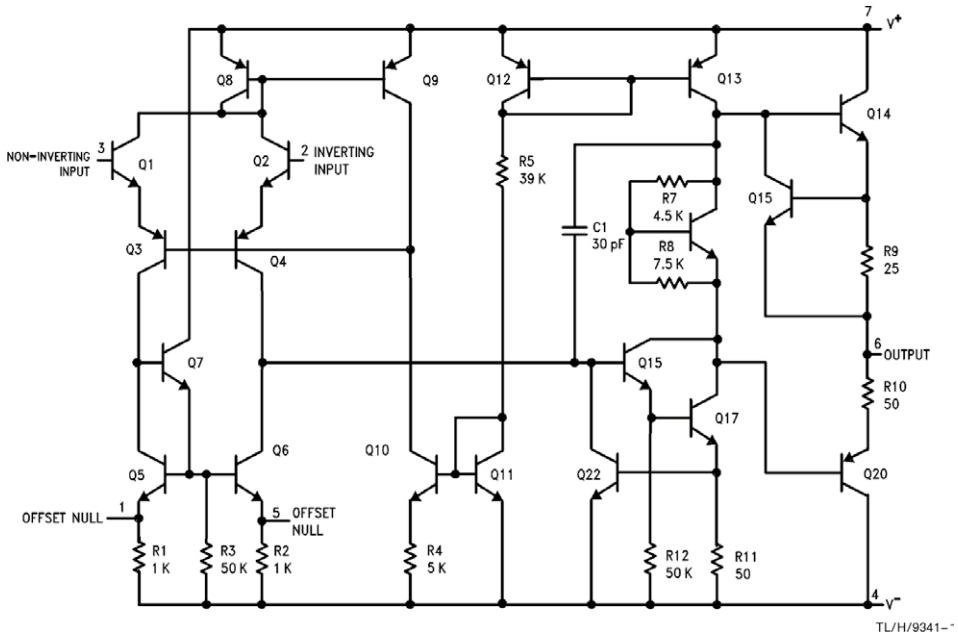


Bild 2.6 Schaltung LM741, [D1] (siehe Hinweis)

Hinweis (Stand Februar 2025): 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 μ A741 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 Differenzverstärker 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-