

**ing**  
elektrotechnik

Harald Hartl  
Edwin Krasser  
Wolfgang Pribyl  
Peter Söser  
Gunter Winkler

# Elektronische Schaltungstechnik

Mit Beispielen in PSpice

**Harald Hartl  
Edwin Krasser  
Wolfgang Pribyl  
Peter Söser  
Gunter Winkler**

# **Elektronische Schaltungstechnik**

**Mit Beispielen in PSpice**

**PEARSON**  
Studium

---

ein Imprint von Pearson Education  
München • Boston • San Francisco • Harlow, England  
Don Mills, Ontario • Sydney • Mexico City  
Madrid • Amsterdam

Um die Funktion des Differenzverstärkers verstehen zu lernen, betrachten wir zuerst die Arbeitspunkteinstellung der beiden Transistoren. Die Versorgung erfolgt im Allgemeinen durch eine so genannte erdsymmetrische Spannung. Darunter versteht man zwei Spannungen, die den gleichen Absolutwert besitzen, von denen eine positiv ( $V_+$ ), die andere jedoch negativ ( $V_-$ ) relativ zum Bezugspotential ist. Es handelt sich um zwei identische Spannungsquellen, die in Serie geschaltet sind. Der Verbindungspunkt der beiden Quellen bildet das Bezugspotential. Um den Ruhezustand der Schaltung zu bestimmen, verbinden wir beide Eingänge mit diesem Bezugspotential.

Der Strom  $I_k$  der Stromsenke teilt sich zu gleichen Teilen auf die beiden Transistoren auf. Dadurch entsteht an den Basis-Emitter-Dioden ein Spannungsabfall. Das Potential des Punktes A liegt um diesen Spannungsabfall unter dem Bezugspotential. Die Kollektorströme führen zu gleichen Spannungsabfällen an den Kollektorwiderständen. Wird als Ausgangssignal die Differenz der beiden Kollektorpotentiale verwendet, so ist das Ausgangssignal  $v_a$  Null.

### 4.8.1 Gleichtaktaussteuerung

Als Gleichtaktaussteuerung (►Abbildung 4.61) bezeichnet man den Fall, bei dem sich beide Eingänge um den selben Betrag und in dieselbe Richtung ändern. Das Eingangssignal wird als Gleichtaktssignal bezeichnet. Es gilt:

$$\Delta V_{GL} = \frac{\Delta V_{e1} + \Delta V_{e2}}{2} .$$

Schaltungstechnisch kann eine Gleichtaktaussteuerung erreicht werden, indem man die beiden Eingänge verbindet und an diese Verbindung eine Signalquelle anschließt. Ist die Symmetrie des Differenzverstärkers perfekt und die Stromsenke ideal, so ändert sich durch das Eingangssignal nur das Potential am Emitter der Transistoren. Der Strom  $I_k$  einer idealen Stromsenke bleibt jedoch konstant. Durch die Gleichtaktaussteuerung wird kein Unterschied zwischen den Potentialen am Kollektor von  $T_1$  und  $T_2$  und damit keine Ausgangsspannung  $V_a$  hervorgerufen. Gleichtaktssignale werden von einem idealen Differenzverstärker nicht verstärkt. Auch eine Änderung der Basis-Emitter-Spannungen durch eine Temperaturänderung wirkt wie ein Gleichtaktssignal und wird unterdrückt.

Reale Differenzverstärker besitzen keine ideale, sondern eine Stromsenke mit einem parallel geschalteten endlichen Innenwiderstand  $r_k$ . Eine Gleichtaktaussteuerung verändert die Spannung an diesem Widerstand und damit den Emitterstrom  $I$  der beiden Transistoren. Bei idealer Symmetrie ändern sich die Spannungsabfälle an den Emitterwiderständen um denselben Betrag und in dieselbe Richtung. Das Ausgangssignal bleibt weiterhin Null. Ein kleiner Unterschied der beiden Kollektorwiderstände führt jedoch sofort zu einem Ausgangssignal. Der reale Differenzverstärker besitzt daher eine Gleichtaktverstärkung  $A_{GL}$  größer als Null.

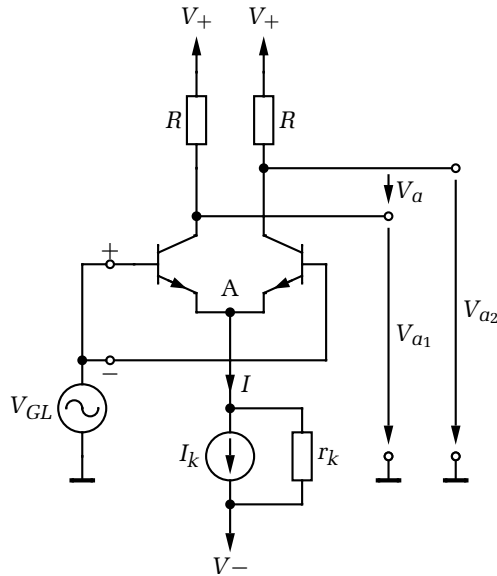


Abbildung 4.61: Differenzverstärker mit Gleichtaktaussteuerung

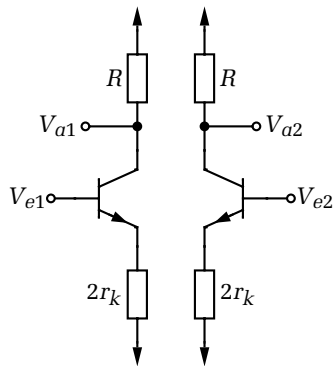


Abbildung 4.62: Gleichtaktverstärkung

Es gibt Anwendungsfälle, bei denen statt der Differenz der beiden Kollektorpotentiale  $V_a = V_{a2} - V_{a1}$  nur die Spannung am Kollektor eines Transistors relativ zum Bezugspotential als Ausgangssignal verwendet wird. Der Vorteil dieser Variante ist ein geringerer Aufwand, da nur eine Ausgangsleitung gebraucht wird. Jede Änderung des Kollektorstromes führt jedoch sofort zu einem Ausgangssignal. Die Gleichtaktverstärkung hängt wie bei einer Emitterschaltung vom Verhältnis des Kollektorwiderstandes zum Emittterwiderstand ab. Der Differenzverstärker zerfällt für diese Überlegung in zwei Emitterschaltungen, die sich als Emittterwiderstand den Innenwiderstand  $r_k$  der Stromquelle teilen. Aus der Sicht jedes Teilverstärkers wirkt daher

der doppelte Emitterwiderstand ( $2r_k$ ). Die Verhältnisse sind in ►Abbildung 4.62 grafisch dargestellt. Für die Gleichtaktverstärkung bezüglich eines unsymmetrischen Ausgangs gilt:

$$A_{GL} = \frac{\Delta V_{a2}}{\Delta V_{GL}} = -\frac{R}{2r_k} .$$

Auch die Größe der zulässigen Gleichtaktspannung ist beim realen Differenzverstärker begrenzt. Die untere Grenze für die gezeigte Struktur mit npn-Transistoren ist erreicht, wenn der Spannungsabfall an der Stromquelle für die Funktion der Stromquelle nicht mehr ausreicht. Die obere Grenze ist durch die Sättigung der beiden Transistoren gegeben.

## 4.8.2 Gegentaktsteuerung

Als Gegentaktsteuerung bezeichnet man einen Fall, bei dem sich beide Eingänge um denselben Betrag, aber in entgegengesetzte Richtungen ändern. Das Signal wird auch als Gegentaktsignal oder Differenzsignal bezeichnet.

$$\Delta V_D = \Delta V_{e1} - \Delta V_{e2}$$

Bei der Gegentaktsteuerung ändert sich das Potential am Punkt A nicht. Die Eingangsspannung teilt sich symmetrisch auf die beiden Basis-Emitter-Strecken auf. Wird zum Beispiel die Eingangsspannung  $V_{e1}$  positiver, so steigt der Basisstrom von  $T_1$  und entsprechend der Stromverstärkung auch der Kollektorstrom  $I_{C1}$ . Die Spannung  $V_{e2}$  sinkt um den gleichen Betrag. Dadurch sinkt der Basisstrom und auch der Kollektorstrom von  $T_2$ . Die Summe der Ströme entspricht dem Strom der Stromsenke  $I_k$  und ist daher konstant. Als Ausgangssignal kann wieder die Spannung am Kollektor von  $T_2$  oder von  $T_1$  beziehungsweise die Differenz dieser Spannungen verwendet werden. Es gilt:

$$-\Delta V_{a1} = \Delta V_{a2} \quad \text{beziehungsweise} \quad \Delta V_a = \Delta V_{a2} - \Delta V_{a1} = 2 \cdot \Delta V_{a2} .$$

Da sich das Potential am Emitter der Transistoren nicht ändert, entspricht die Spannungsverstärkung jedes Transistors der einer Emitterschaltung ohne Gegenkopplung. Es gilt:

$$\Delta V_{a1} = -S \cdot R \cdot \Delta V_{BE1} \quad \text{und} \quad \Delta V_{a2} = -S \cdot R \cdot \Delta V_{BE2} .$$

Die Änderung der Eingangsspannung teilt sich zu gleichen Teilen auf zwei Basis-Emitter-Strecken auf. Die Spannungsverstärkung des Differenzverstärkers ist bei Verwendung eines Kollektorpotentials als Ausgangssignal daher nur halb so groß wie die der Emitterschaltung.

$$A_D = \frac{\Delta V_{a1}}{\Delta V_e} = \frac{\Delta V_{a2}}{\Delta V_e} = -\frac{S}{2} \cdot R$$

Verwendet man die Differenzspannung als Ausgangssignal, ist die Änderung  $\Delta V_d$  bei derselben Eingangsspannungsänderung  $\Delta V_e$  und damit auch die Differenzverstärkung doppelt so groß.

### 4.8.3 Gleichtaktunterdrückung

Ein Maß für die Qualität eines Differenzverstärkers ist das Verhältnis von Differenzverstärkung zu Gleichtaktverstärkung. Dieser Quotient wird als Gleichtaktunterdrückung (CMRR ... *Common Mode Rejection Ratio*) bezeichnet. Für den Fall, dass nur eine Kollektorspannung als Ausgangssignal verwendet wird, kann die Gleichtaktunterdrückung mit den schon bekannten Zusammenhängen sofort berechnet werden.

$$CMRR = \frac{|A_D|}{|A_{GL}|} = \frac{\frac{S}{2} \cdot R}{\frac{R}{2r_k}} = S \cdot r_k$$

Die Gleichtaktunterdrückung wird häufig auch in Dezibel angegeben.

$$CMRR_{dB} = 20 \cdot \log_{10} \frac{|A_D|}{|A_{GL}|}$$

### 4.8.4 Weitere Kennwerte

Das Großsignalverhalten wird durch die Übertragungsfunktion des Differenzverstärkers beschrieben. Sie ist in ►Abbildung 4.63 gezeigt.

Ist die Differenzspannung Null, fließt in beiden Transistoren der halbe Strom der Stromsenke. Um diesen Punkt kann in einem Bereich von  $\pm V_T$  linear angesteuert werden. Erreicht die Differenzspannung die vierfache Temperaturspannung  $4 \cdot V_T$ , so fließen 98 % von  $I_k$  durch den einen, während nur 2 % durch den anderen Transistor fließen. Der lineare Aussteuerbereich kann aus der Übertragungsfunktion ermittelt werden. Geht man von einem zulässigen Klirrfaktor von 1 % aus, so darf die Amplitude des Eingangssignals die 0,7-fache Temperaturspannung oder 18 mV betragen. Zum Vergleich dürfte die Eingangsspannung einer Emitterschaltung bei einem ähnlichen Klirrfaktor nur 1 mV groß sein. Wird eine Gegenkopplung durch Widerstände am Emitter der beiden Transistoren durchgeführt, so kann der lineare Aussteuerbereich vergrößert werden [39].

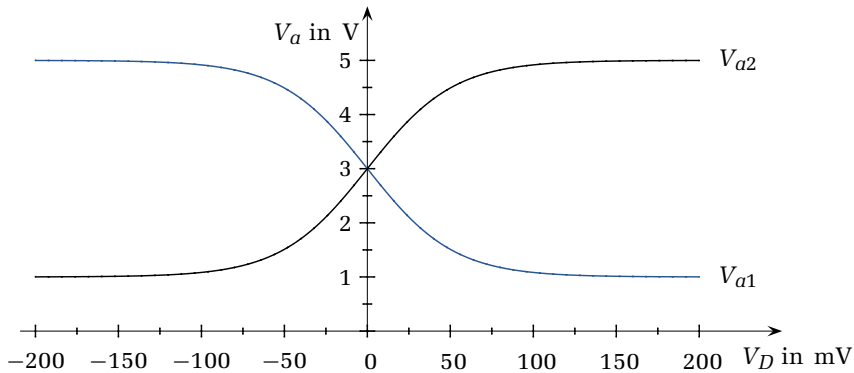


Abbildung 4.63: Übertragungsfunktion des Differenzverstärkers ohne Gegenkopplung

Zum Abschluss unserer Betrachtung des Differenzverstärkers sollen der differentielle Eingangs- und Ausgangswiderstand erwähnt werden. Bei der Bestimmung des Eingangswiderstandes muss zwischen Gegentakt und Gleichtaktansteuerung unterschieden werden.

#### **Gegentakteingangswiderstand:**

Da sich im Fall der Gegentaktansteuerung das Potential am Emitter nicht ändert, kann es für die Kleinsignalbetrachtung mit dem Bezugspotential verbunden werden. Damit ergeben sich dieselben Verhältnisse wie bei einer Emitterschaltung. Allerdings ist die Änderung der Eingangsspannung des Einzeltransistors  $v_{BE}$  nur halb so groß wie die Änderung der Differenzspannung  $v_e$ . Der Gegentakteingangswiderstand ist daher doppelt so groß wie der Eingangswiderstand einer Emitterschaltung.

$$r_{eD} = 2 \cdot r_{BE} = 2 \cdot \frac{\beta}{S}$$

#### **Gleichtakteingangswiderstand:**

Bei Gleichtaktaussteuerung ändert sich das Potential am Emitter der beiden Transistoren. Der Innenwiderstand der Stromquelle wirkt wie der Emitterwiderstand bei einer Emitterschaltung. Es gilt:

$$r_{eGL} = r_{BE} + ((1 + \beta) \cdot 2 \cdot r_k) \approx 2\beta \cdot r_k.$$

## ZUSAMMENFASSUNG

Im Kapitel **Transistoren** wurden die wichtigsten Transistortypen anhand vereinfachter Strukturbilder vorgestellt und die grundlegenden Mechanismen zur Steuerung erklärt. Den Beginn bildete eine Betrachtung der bipolaren Transistoren. Danach wurde der Sperrschicht-Feldeffekttransistor und der MOSFET besprochen. Die Beschreibung der einzelnen Transistoren mittels Kennlinien wurde gezeigt und die wesentlichen Parameter, die aus den Kennlinien ablesbar sind, definiert. Überlegungen zum Temperaturverhalten der verschiedenen Transistoren bildeten den Abschluss dieses Abschnittes.

Der nächste Teil des Kapitels beschäftigte sich mit der Wahl und der Einstellung des **Arbeitspunktes**. Hier wurden die auftretenden Fragestellungen und deren Lösung am Beispiel der bipolaren Transistoren gezeigt. Basierend auf der Arbeitspunkteinstellung wurden Überlegungen zum so genannten Kleinsignalverhalten der drei Grundschaltungen durchgeführt. Wir haben uns dabei auf den bipolaren Transistor beschränkt, die analogen Überlegungen können jedoch für die Feldeffekttransistoren angestellt werden. Da im Fall der Feldeffekttransistoren nur ein minimaler (Leck-)Strom am Eingang fließt, der häufig vernachlässigt werden kann, sind die Berechnungen für FETs im Allgemeinen leichter durchzuführen. Der interessierte Leser sei an dieser Stelle auf die Fachliteratur [27], [39] verwiesen, wobei das bereits erworbene Grundwissen den Einstieg in diese weiterführende Literatur wesentlich vereinfachen wird.

Den letzten Teil dieses Kapitels bildeten ausgewählte **Transistorschaltungen**. Der Vergleich einer bipolaren Stromsenke mit einer FET-Stromsenke zeigte den Unterschied in der Berechnung des Kleinsignalverhaltens bei diesen beiden Transistortypen. Durch die Berechnung konnte gezeigt werden, dass eine Stromgegenkopplung im Falle der Verwendung von FETs einen wesentlich größeren Ausgangswiderstand als bei bipolaren Transistoren ermöglicht. Einen weiteren Punkt bildete die Besprechung verschiedener **Stromspiegelschaltungen**, beginnend von einem einfachen bis hin zum Wilson-Stromspiegel. Als letzte, aber sehr wichtige Grundschaltung mit Transistoren wurde der **Differenzverstärker** betrachtet. Die wichtigsten Begriffe wie Gleichtakt- und Gegentaktaussteuerung sowie die Gleichtaktunterdrückung wurden vorgestellt. Des Weiteren wurde die Übertragungskennlinie gezeigt. Die Vorteile des Differenzverstärkers gegenüber dem einstufigen Transistorverstärker wie zum Beispiel der größere Eingangsaussteuerbereich und die Möglichkeit, Gleichspannungen zu verstärken, wurden erklärt.



# Operationsverstärker

<b>5.1 Idealer Operationsverstärker</b> .....	233
<b>5.2 Realer Operationsverstärker</b> .....	237
<b>5.3 Grundsaltungen mit Operationsverstärkern</b> .....	248
<b>5.4 Komparatoren</b> .....	271
<b>Zusammenfassung</b> .....	272

5

ÜBERBLICK

## Einleitung

» In der Anfangszeit digitaler Rechenwerke reichte deren Geschwindigkeit für viele zeitkritische Berechnungen nicht aus. Ein typisches Beispiel ist eine Regelstrecke, bei der die Berechnung einer Regelabweichung und die Bestimmung der neuen Stellgröße innerhalb einer Zeit erfolgen muss, die sehr klein im Vergleich zur Reaktionszeit der zu regelnden Strecke ist.

Zur Lösung dieser Probleme wurden so genannte Analogrechner verwendet. Man erstellte ein elektrisches Modell, das dieselbe mathematische Beschreibung hatte wie das zu lösende Problem. Aus den Strömen und Spannungen innerhalb dieser elektrischen Nachbildung konnte man die gesuchten Lösungen ablesen. Die Rechenoperationen innerhalb dieser analogen Rechenschaltungen wurden durch Operationsverstärker durchgeführt und gaben diesem Verstärkerbaustein seinen Namen. «

Operationsverstärker können zum Addieren, Subtrahieren, Multiplizieren, aber auch zum Differenzieren und Integrieren verwendet werden. Auch Funktionsnetzwerke zur Berechnung der Exponentialfunktion, des Logarithmus oder für Sinus- und Cosinusfunktionen wurden verwendet. Abgesehen von Sonderfällen werden diese Berechnungen heute von digitalen Rechenwerken durchgeführt. Die Anwendung der Operationsverstärker wandelte sich vom Lösen des gesamten Problems hin zur Signalvorverarbeitung beziehungsweise Anpassung des Signals an den Eingangsspannungsbereich der Analog/Digital-Umsetzer. Diese erzeugen ein digitales Abbild der analogen Größen, führen die digitale Signalverarbeitung durch und stellen mithilfe von Digital/Analog-Umsetzern wieder ein analoges Ergebnis zur Verfügung. Der häufig mit Operationsverstärkern realisierte Schaltungsteil zwischen Sensor und Analog/Digital-Umsetzer wird meist als Sensor-Interface bezeichnet.

### LERNZIELE

- Konzept des idealen Operationsverstärkers
- Rückkopplung – Mitkopplung – Gegenkopplung
- Realer Operationsverstärker und Kenndaten
- Frequenzgangkorrektur und Stabilität von Operationsverstärkerschaltungen
- Ausgewählte Grundsaltungen mit Operationsverstärkern

## 5.1 Idealer Operationsverstärker

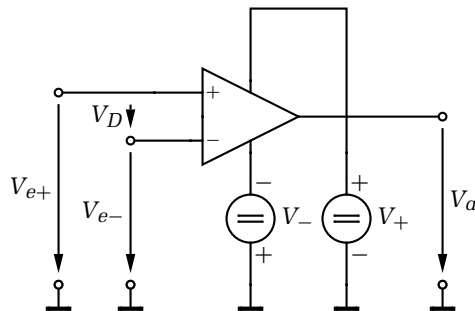


Abbildung 5.1: Idealer Operationsverstärker

In ►Abbildung 5.1 ist ein idealer Operationsverstärker mit den auftretenden Spannungen und seiner Spannungsversorgung dargestellt. Während klassische Operationsverstärkerschaltungen häufig mit erdsymmetrischen Spannungen von  $\pm 15\text{ V}$  oder sogar  $\pm 18\text{ V}$  betrieben wurden, geht der Trend bei modernen Operationsverstärkern zur Versorgung mit wesentlich kleineren Spannungen. Derzeit übliche Möglichkeiten sind die symmetrische Versorgung mit  $\pm 2,5\text{ V}$  oder die Versorgung mit einer unsymmetrischen Spannung von zum Beispiel  $5\text{ V}$  bezogen auf Masse. Die Versorgung kann auch mit unterschiedlich großen positiven und negativen Spannungen erfolgen, wenn diese aus irgendeinem Grund schon verfügbar sind.

Während bei den ersten Operationsverstärkern sowohl am Eingang als auch am Ausgang deutliche Abstände der Signalspannung zu den Versorgungsspannungen notwendig waren, findet man bei modernen Operationsverstärkertypen die Schlagwörter *Input and Output Rail to Rail*. Das bedeutet, dass diese Strukturen sowohl am Eingang als auch am Ausgang mit Spannungen arbeiten können, die sich nur minimal von der Versorgungsspannung unterscheiden. Es gibt auch Varianten, die nur eine Versorgungsspannung am Ausgang erreichen können oder bei denen die Eingangsspannung gleich einer Versorgungsspannung sein darf. Bei diesen Bausteinen findet man im Datenblatt zum Beispiel den Hinweis *Input includes negative rail* oder *Output includes positive rail*.

Der Operationsverstärker besteht – wie wir noch sehen werden – aus einem Differenzverstärker am Eingang, einer Verstärkerstufe (*Gain Stage*) und einem Ausgangstreiber. Seine Eingänge werden nach ihrer Phasenbeziehung zum Ausgang als invertierender ( $-$ ) und als nicht invertierender Eingang ( $+$ ) bezeichnet. Bei einem idealen Operationsverstärker fließt in die Eingänge kein Strom. Die Differenzspannung zwischen den beiden Eingängen wird im Idealfall mit einer  $\infty$  großen Verstärkung  $A_D$  verstärkt. Es gilt:

$$V_a = (V_+ - V_-) \cdot A_D.$$

Typische Werte der Differenzverstärkung  $A_D$  liegen bei realen Operationsverstärkern in der Größenordnung von einer Million oder 120 dB. Diese so genannte Leerlaufverstärkung oder *Open Loop Gain* ist eine Funktion der Frequenz. Sie besitzt das in ►Abbildung 5.2 dargestellte Tiefpassverhalten erster Ordnung. Die Grenzfrequenz liegt bei wenigen Hertz.

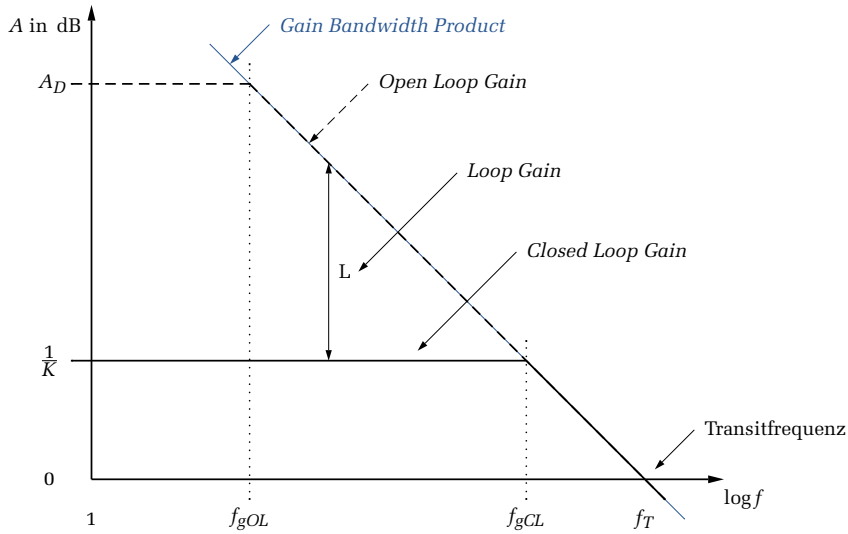


Abbildung 5.2: *Open Loop Gain* – *Closed Loop Gain* – *Loop Gain*

Durch eine Gegenkopplung wird die Verstärkung auf praktisch einsetzbare Werte reduziert, die Grenzfrequenz wird jedoch erhöht. Man nennt die verbleibende Verstärkung mit Gegenkopplung auch *Closed Loop Gain*. Wir erinnern uns – unter einer Gegenkopplung versteht man ein Rückführen des Ausgangssignals auf den Eingang, so dass es dem Eingangssignal entgegenwirkt. Die Frequenz, bei der die Verstärkung auf den Faktor 1 beziehungsweise 0 dB zurückgegangen ist, wird als Transitfrequenz  $f_T$  bezeichnet. Das Produkt aus Verstärkung und Bandbreite (*Gain Bandwidth Product*) ist konstant und ein Maß dafür, bis zu welcher Frequenz der jeweilige Operationsverstärker eingesetzt werden kann. Es gilt:

$$A_{D1} \cdot f_{gOL} = \frac{1}{K} \cdot f_{gCL} = 1 \cdot f_T.$$

Diese Beziehung entspricht der blauen Linie in Abbildung 5.2. Unter der Bandbreite eines Verstärkers wird jener Frequenzbereich verstanden, in dem eine näherungsweise konstante Verstärkung vorliegt. Er liegt beim Operationsverstärker zwischen der Frequenz Null und der von der Verstärkung abhängigen Grenzfrequenz. Ein weiterer wichtiger Begriff, die Schleifenverstärkung (*Loop Gain*), kann ebenfalls aus Abbildung 5.2 abgelesen werden. Sie ist der Unterschied zwischen der Leerlaufverstärkung und der durch die Gegenkopplung eingestellten Verstärkung und gibt damit an, wieviel Verstärkungsüberschuss der Operationsverstärker zum Ausregeln

# Copyright

Daten, Texte, Design und Grafiken dieses eBooks, sowie die eventuell angebotenen eBook-Zusatzdaten sind urheberrechtlich geschützt. Dieses eBook stellen wir lediglich als **persönliche Einzelplatz-Lizenz** zur Verfügung!

Jede andere Verwendung dieses eBooks oder zugehöriger Materialien und Informationen, einschließlich

- der Reproduktion,
- der Weitergabe,
- des Weitervertriebs,
- der Platzierung im Internet, in Intranets, in Extranets,
- der Veränderung,
- des Weiterverkaufs und
- der Veröffentlichung

bedarf der **schriftlichen Genehmigung** des Verlags. Insbesondere ist die Entfernung oder Änderung des vom Verlag vergebenen Passwort- und DRM-Schutzes ausdrücklich untersagt!

Bei Fragen zu diesem Thema wenden Sie sich bitte an: **info@pearson.de**

## Zusatzdaten

Möglicherweise liegt dem gedruckten Buch eine CD-ROM mit Zusatzdaten oder ein Zugangscode zu einer eLearning Plattform bei. Die Zurverfügungstellung dieser Daten auf unseren Websites ist eine freiwillige Leistung des Verlags. **Der Rechtsweg ist ausgeschlossen.** Zugangscodes können Sie darüberhinaus auf unserer Website käuflich erwerben.

## Hinweis

Dieses und viele weitere eBooks können Sie rund um die Uhr und legal auf unserer Website herunterladen:

**<https://www.pearson-studium.de>**