Versuchsprotokoll
WS 93/94 / Do.1 / Platz 11

Frank Pilhofer, Andreas Friedel
Donnerstag, 18. November 1993
Elektronik - Praktikum / Analog - Teil

Differenzverstärker

Versuch 4

Inhaltsverzeichnis

Einleitung 2
Grundlagen 2
Einfacher Differenzverstärker 2
Konstantstromquelle 4
Differenzverstärker mit Konstantstromquelle 5
Differenzverstärker mit Stromgegenkopplung 6
Versuchsdurchführung 6
Einfacher Differenzverstärker 6
Differenzverstärker mit Konstantstromquelle 8
Differenzverstärker mit Stromgegenkopplung 8

Einleitung

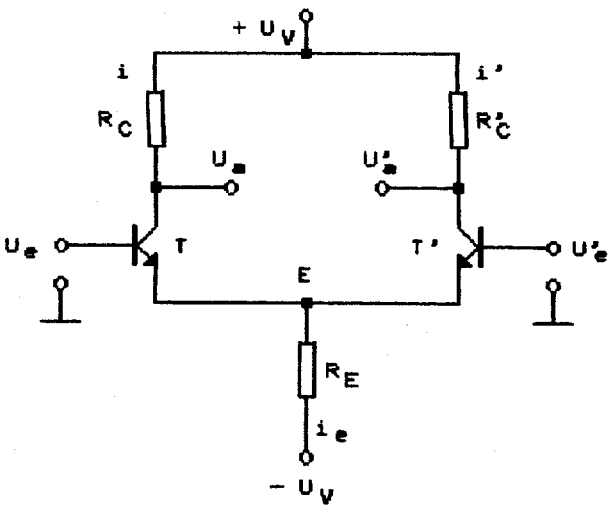
Nachdem im letzten Versuch bereits einfache Verstärker aus einzelnen Transistoren aufgebaut wurden, werden hier zwei Transistoren zu verschiedenen Differenzverstärkern zusammengeschaltet. Gegenüber ersteren sind die Differenzverstärker in Hinsicht auf Stabilität und Linearität deutlich überlegen.

Der Name Differenzverstärker verdeutlicht das wichtige Prinzip, daß Spannungsdifferenzen verstärkt werden. Eventuelle Störanteile, die auf beiden Eingängen liegen, werden unterdrückt.

Grundlagen

Einfacher Differenzverstärker

In der nebenstehenden Grafik ist der einfachste Aufbau eines Differenzverstärkers dargestellt, jedoch mit der Voraussetzung, daß eine symmetrische Spannungsversorgung (Erde sowie $\pm U_V$) vorhanden ist.



Grafik 1 - Differenzverstärker mit symm. Spannungsversorgung

Der Aufbau besitzt die beiden Eingänge u_e und u_e' sowie die Ausgänge u_a, u_a' (welche, wegen Überlagerung durch die geteilte Gleichspannung U_V über einen Kondensator abgegriffen werden sollten).

Es wird angenommen, daß die Transistoren identisch sind, also in allen Feinheiten gleiche Eigenschaften besitzen. Je besser diese Bedingung in der Praxis erfüllt ist, desto besser arbeitet der Verstärker.

An die BE-Strecke beider Transistoren ist, auch ohne Eingangssignal, eine Spannung angelegt, die den Transistor öffnet und wenn möglich am Arbeitspunkt hält. Wird nun z.B. an u_e eine positive Spannung angelegt, so wird sich zunächst der Basisstrom erhöhen; hierzu steigt der Kollektorstrom (zumindest idealerweise) der Kollektorstrom proportional: $I_C \approx \beta I_B$. Auf der einen Seite erhöht sich der Spannungsabfall an R_C und steuert unseren Ausgang; auf Emitterseite fällt über R_E ebenfalls mehr Spannung ab. Das Potential an E wird angehoben, wodurch sich U_{BE}' verringert und dementsprechend der Stromfluß I' am rechten Transistor sinkt. Daraus folgt natürlich wieder ein Anstieg des Potentials an E, weshalb U_{BE} und damit auch der Stromfluß wieder sinkt etc.

Die Überlegung bestätigt, wohin die ganze Rückkopplung führen muß: Es stellt sich (bei Gleichheit der Transistoren) ein Gleichgewicht ein, in dem sich die Ströme I, I' leicht und entgegengesetzt aus dem Zustand $I = I'$ entfernt haben (für $u_e = u_e' = 0$).

Zusammengefaßt: Je mehr Strom auf der linken Seite der Schaltung fließt, desto weniger fließt rechts. Die Formeln bestätigen die Überlegungen, daß die Differenzströme gleichen Betrag aufweisen, d.h. $i + i' = 0$ ist. Jene Formeln besagen, daß für $S \approx S'$ die Ströme durch $i = \frac{S}{2}(u_e - u_e')$ und $i' = -\frac{S}{2}(u_e - u_e')$ gegeben sind.

Die differentiellen Spannungsänderungen u_a, u_a' am Ausgang sind natürlich über das Ohm'sche Gesetz über den differentiellen Stromfluß gegeben:

$$u_a = -iR_C = -\frac{SR_C}{2}(u_e - u_e') = -u_a' \qquad (1)$$

An dieser Gleichung erkennt man auch formelmäßig den Namen "Differenzverstärker", da die Differenz der Eingangsspannungen verstärkt wird.

Auch erkennt man die Wichtigkeit, daß beide Transistoren gleich sein sollen. Die oben angestellten Überlegungen, daß $i = -i'$ ist, sind bei unterschiedlichen Transistorparametern nicht mehr möglich. Ein Öffnen von T würde nun T' nicht mehr in der gleichen Weise schließen. Daher müssen sich die differentiellen Kollektorströme und ebenfalls die Spannungsabfälle über R_C unterscheiden, womit die Ausgangsspannungen natürlich auch unterschiedlich wären. Aufgrund der Rückkopplung der Schaltung werden sich bei Ändern eines Transistors die Ausgangsspannungen und damit auch die Verstärkungseigenschaften verändern.

Es soll hier ebenfalls überlegt werden, was bei einer Gleichtaktansteuerung der Eingänge geschieht. Nach Formel 1 scheint diese Überlegung zwar sinnlos (aus ihnen folgt $u_a = u_a' = V = 0$), doch darf nicht aus den Augen verloren werden, daß diese nur aufgrund einiger Abschätzungen zustande kam.

Bei gleichförmiger Ansteuerung erkennt man bereits, daß sich beide Transistoren gleich verhalten müssen. Zur Vereinfachung kann die rechte Seite des Parallelkreises (aus Grafik 1) herübergeklappt werden. Aus den Kollektorwiderständen wird $R_C'' = \frac{1}{2} R_C$, aus der gesamten Schaltung ein Emitterfolger. Der Emitterstrom wird wieder über den Eingang gesteuert und ist in sehr guter Näherung $i_E = \frac{u_{e,Gl}}{R_E}$. Dabei teilt sich der Strom auf beide Transistoren gleichmäßig auf, so daß

$$u_a = u_a' = -\frac{i_E R_C}{2} = -\frac{u_{e,Gl} R_C}{2R_E} \text{ ist.} \qquad (2)$$

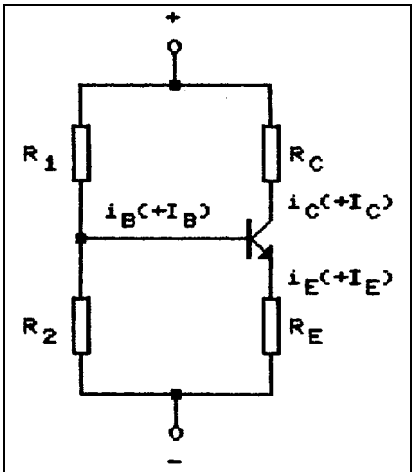
Über die Formeln 1 und 2 kann die Verstärkung $V = \frac{u_a}{u_e}$ bestimmt werden. Diese ist für die Differenzverstärkung $V_{Diff} = \frac{u_a}{\Delta u_e} = -S\frac{R_c}{2}$ und für den Gleichtaktbetrieb $V_{Gl} = \frac{u_a}{u_{e,Gl}} = -\frac{R_c}{2R_E}$. Der Quotient $G = \frac{V_{Diff}}{V_{Gl}} = SR_E$ wird Gleichtaktunterdrückung genannt und ist ein Maß für die Güte

einer Differenzverstärkerschaltung. *G* beschreibt die Fähigkeit der Schaltung, Gleichtaktsignale zu ignorieren und hilft daher, Störeinflüsse zu minimieren.

Konstantstromquelle

Um die Gleichtaktunterdrückung der Differenzverstärker zu verbessern, können einerseits neue Transistoren mit vergrößertem β (und damit größerer Steilheit) erfunden werden, andererseits kann der Emitterwiderstand vergrößert werden. Dabei wäre es jedoch zu einfach, diesen kurz entschlossen zehnfach zu vergrößern, denn dann würde auch der Emitterstrom und daher die Steilheit auf ein zehntel fallen, womit nichts gewonnen wäre.

Ein sinnvoller Lösungsansatz ist es, nicht den Widerstand an sich zu betrachten, sondern den differentiellen Widerstand. Wir wollen schließlich, daß durch R_E unabhängig von den Einzelströmen i, i' der Gesamtstrom konstant bleibt. Das wird erreicht, indem der differentielle Widerstand r_E sehr viel höher als R_E gewählt wird. Die bei der Gleichtaktansteuerung auftretenden Spannungsschwankungen an den Emittern würden so nur eine sehr kleine Änderung im Stromfluß bewirken.

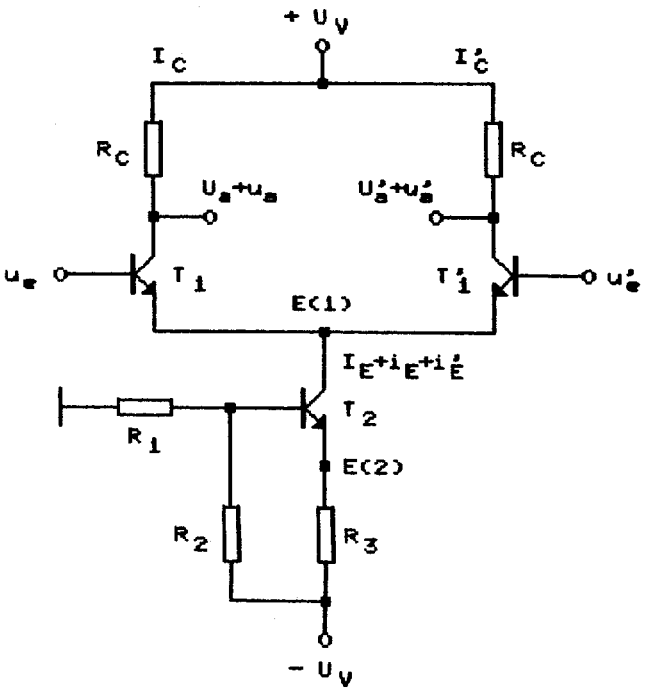


Grafik 2 - Konstantstromquelle

Das gewünschte wird über eine Konstantstromquelle erreicht, die in der nebenstehenden Grafik aufgezeichnet ist. Der Transistor verkörpert das gewünschte Bauteil mit hohem differentiellen Innenwiderstand, welcher über starke Stromgegenkopplung noch erhöht wird. Für den Transistor wird in der Standardgleichung des Kollektorstroms $i_C = \beta i_B + \frac{u_{CE}}{r_{CE}}$ ein wenig substituiert: $i_B = \frac{u_{BE}}{r_{BE}}$, $u_{BE} = -i_E R_E$, $i_E = i_B + i_C$. Nach Einsetzen kann der differentielle Innenwiderstand $r_i = \frac{u_{CE}}{I_C}$ bestimmt werden: $r_i = \beta r_{CE} \frac{1}{1+r_{BE}/R_E}$. Durch Einsetzen eines Beispiel merkt man, daß $r_i \rangle\rangle R_i$ ist, was genau die gewünschte Forderung war. Aus dieser Eigenschaft folgt auch der Name, der ja besagt, daß der Stromfluß weitgehend konstant bleibt.

Differenzverstärker mit Konstantstromquelle

In dieser, in Grafik 3 dargestellten Schaltung werden die Kenntnisse von eben angewandt. Der vorher verwendete Emitterwiderstand wird durch die Konstantstromquelle ersetzt.



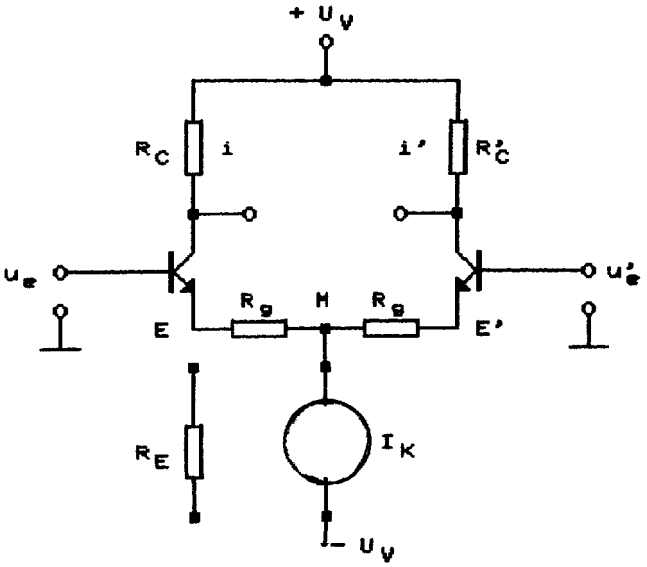
Grafik 3 - Differenzverstärker mit Konstantstromquelle

Trotz erheblicher Verbesserung der Gleichtaktunterdrückung ist das Ergebnis immer noch nicht ideal. Die Nachteile der zwei Transistoren beginnen hier, sich bemerkbar zu machen. Alle Ansätze beruhen darauf, daß sich beide nur minimal oder noch weniger unterscheiden.

Die Schaltung kann also noch so gut aufgebaut sein: Das Ergebnis wird durch die Differenz der Transistorparameter nach oben beschränkt.

Eine leichte Verbesserung ist an dieser Stelle jedoch immer noch möglich. So kann z.B. der Widerstand R_2 durch eine passende Zenerdiode ersetzt werden. Solange die negative Versorgungsspannung dann einen gewissen Wert nicht unterschreitet, wird über die Diode immer die Durchbruchspannung abfallen (der Rest fällt dann über den Vorwiderstand R_1 ab). Die Schaltung wird so gegenüber Versorgungsspannungsschwankungen immun. Dank der Zenerdiode wird die Steuerspannung U_{BE} des Transistors konstant gehalten, so daß der gewünschte Strom konstant aus dem Kollektor quellen kann.

Differenzverstärker mit Stromgegenkopplung



Grafik 4 - Differenzverstärker mit Stromgegenkopplung

Um die eben angesprochenen Nachteile zu verkleinern, wird zum Schluß noch der sogenannte Differenzverstärker mit Stromgegenkopplung behandelt. Hierfür wird die Schaltung der Konstantstromquelle übernommen (hier durch eine ideale Stromquelle symbolisiert), nur hinter den Emittern werden gleiche Widerstände R_G eingebaut. Dadurch werden die Steuerspannungen, die über unterschiedliche Potentiale an E entstehen, um den entsprechenden Faktor R_G gemindert. So wird die Verstärkung von den Transistoreigenschaften, insbesondere der Steilheit S, weitgehend unabhängig: $V_{Diff} \approx -\frac{R_C}{2R_G}$.

Allerdings fällt das Ergebnis der Gleichtaktunterdrückung zur Last. Mit dieser Schaltung lassen sich nicht mehr so hohe Differenzverstärkungen erreichen, wohingegen die Gleichtaktverstärkung nahezu unverändert klein bleibt, so daß der Quotient ebenfalls kleiner wird.

Versuchsdurchführung

Einfacher Differenzverstärker

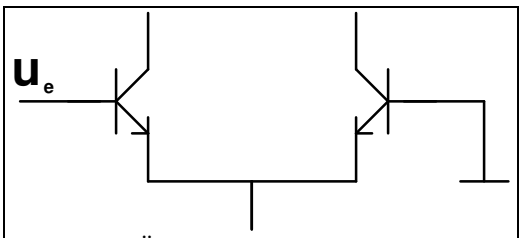
Zunächst wird ein Differenzverstärker mit symmetrischer Spannungsversorgung wie in Grafik 1 aufgebaut. Eine der wichtigsten Tätigkeiten ist es, zwei möglichst gleiche Transistoren zu finden. Hierfür werden mehrere Transistoren wie in Versuch 3 mit dem Kennlinienschreiber durchgemessen. Zunächst wurde qualitativ (optischer Vergleich der Kennlinien) aussortiert, danach wurde die Auswahl quantitativ (Bestimmung von β) verfeinert. Im Endeffekt fanden wir zwei Transistoren, zwischen denen auf dem Oszillographen keine Unterschiede bezüglich des Kurvenverlaufs zu finden waren.

Beide Transistoren hatten damit einen Stromverstärkungsfaktor von $\beta = 400$. Alle Widerstände wurden mit $R_C = R'_C = R_E = 1k\Omega$ dimensioniert. Alle Messungen werden mit harmonischen (Sinus-) Schwingungen durchgeführt. Alle Spannungswerte sind, auch bei nicht mitgeschriebenem "Dach", als Amplitudenspannungen zu verstehen.

Als erster Meßwert sollte die Differenzverstärkung der Schaltung bestimmt werden. An den einen Eingang wurde die Spannung gelegt, der andere wurde geerdet. Es wurde darauf geach-

tet (kurzes Umschalten des Oszillographen in den XY-Betrieb), daß der Verstärker nicht übersteuert wird. Bei einer Eingangsspannung von $\hat{U}_E = 25mV$ war die Ausgangsspannung $\hat{U}_A = 2,2V$, die Differenzverstärkung ist also $V_{Diff} = 88$. Um die Aussteuerbarkeit der Schaltung zu testen, wurde die Eingangsspannung so lange erhöht, bis die Übertragung nichtlinear wurde. Dies war ungefähr bei $\hat{U}_E = 40mV$ und $\hat{U}_A = 3,5V$; der Wert $V_{Diff} = 87,5$ an diesem Punkt zeigt, daß die Aussteuerungsgrenze gut getroffen wurde.

Als nächstes sollte die Spannung an den Emittern $u_{Em} = 16mV$ gemessen und mit der Signalspannung $u_e = 30mV$ verglichen werden. Das ist ein logisches Ergebnis, was an Grafik 5 gezeigt werden kann. In der Waagerechten liegt links die differentielle Eingangsspannung an, der rechte Eingang ist geerdet, liegt also auf 0. Der aufgezeichnete Ausschnit stellt natürlich mit den zwei Transistoren einen Spannungsteiler dar. Aufgrund der Gleichheit wird an beiden Transistoren die gleiche Spannung abfallen, so daß in der Mitte, also am Emitter, die Hälfte der Eingangsspannung zu finden ist, was ja auch gemessen wurde.



Grafik 5 - Überlegung zur Emitterspannung

Nun soll die Gleichtaktverstärkung des Verstärkers gemessen werden. Hierzu wird der rechte Eingang von der Erde befreit und mit der Eingangsspannung kurzgeschlossen, so daß beide Transistoren gleich angesteuert werden. Bei einer Eingangsspannung von $\hat{u}_e = 80mV$ war die Ausgangsspannung $\hat{u}_a = 37mV$, also ist $V_{Gl} = 0,463$.

Damit ist die Gleichtaktunterdrückung $G = \frac{V_{Diff}}{V_{Gl}} = 190$. Mit diesem Wert können weitere interessante Daten gewonnen werden, wie z.B. die Steilheit. Nach $G = SR_E$ ist $S = \frac{G}{R_E} = 190mS$. Weiter wird der differentielle Innenwiderstand $r_{BE} = \frac{\beta}{S} = 2080\Omega$ bestimmt. Der Wert für $U_T = \frac{U_V}{2V} = 85,2mV$ ist zwar nicht gerade schön, liegt jedoch durchaus noch im Bereich des zumutbaren.

Zum Vergleich wurden auch noch die Widerstände, die alle mit $1k\Omega$ vorbelegt wurden, zunächst verdoppelt und dann halbiert. Bei $R_x = 2k\Omega$ war die (Differenz-) Verstärkung $V_{Diff} = \frac{3,9V}{40mV} = 97,5$, bei $R_x = 470\Omega$ betrug die Verstärkung hingegen nur noch $V_{Diff} = \frac{2,7}{0,04} = 66$.

Auch wurde die Abhängigkeit der Verstärkung von der Versorgungsspannung untersucht. Die Eingangsspannung wurde hierfür nicht verändert, d.h. $\hat{u}_e \approx 40mV$. Auf ein Herabsetzen der positiven Versorgungsspannung reagierte die Schaltung zunächst nicht. Erst als diese unter 11V fiel, setzte eine starke Verzerrung ein. Da der Stromfluß am Kollektor durch den Basisstrom bestimmt wird (U_{BE} bleibt zunächst gleich), ändern sich die Spannungsabfälle an den Kollektorwiderständen nicht. Dadurch sinkt die Spannung U_{CE}; die Transistoren werden sich immer weiter vom Arbeitspunkt wegbewegen und irgendwann in den nichtlinearen Betrieb übergehen.

Bei Absenken der negativen Versorgungsspannung (d.h. gegen Erde laufen lassen) hingegen sank die Verstärkung (laut Auge) über einen weiten Bereich proportional ohne zu verzerren. Da zunächst noch der gleiche Strom durch den Emitterwiderstand fließt, wird sich der Spannungsabfall auch hier erhöhen, das Emitterpotential E wird angehoben. Damit sinkt allerdings auch die Steuerspannung U_{BE} der Transistoren, was sich in einem kleineren Kollektorstrom und geringerem Spannungsabfall am Kollektorwiderstand bemerkbar macht. Das Spannungsgefälle verschiebt sich also über die gesamte Schaltung, wobei U_{CE} nahezu konstant bleibt und den Transistor am Arbeitspunkt festhält.

Differenzverstärker mit Konstantstromquelle

Der Emitterwiderstand aus Grafik 1 wird nun durch eine aus einem Transistor bestehende Konstantstromquelle (Grafik 2) ersetzt, was sich logischerweise zu Grafik 3 addiert. Für die Widerstände R_1, R_2 werden wieder $1k\Omega$ verwendet, $R_3 = \frac{1}{2} R_C$ wird, da keine $0{,}5k\Omega$-Widerstände vorhanden waren, einfach über zwei parallel geschaltete $1k\Omega$ erreicht.

In diesem Fall war die Differenzverstärkung $V_{Diff} = \frac{1{,}25}{12{,}5 \cdot 10^{-3}} = 100$, die Gleichtaktverstärkung $V_{Diff} = \frac{10 \cdot 10^{-3}}{1} = 0{,}01$ und damit die Gleichtaktunterdrückung $G = \frac{100}{0{,}01} = 1 \cdot 10^4$. Der dynamische Innenwiderstand ist damit $r_i = \frac{G}{S} = 52{,}6k\Omega$ ($S = 190mS$, s.o.).

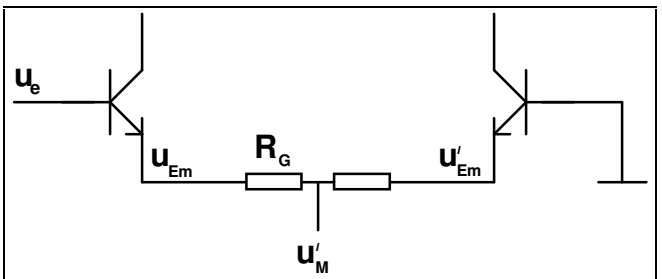
Der Differenzverstärker kann auch so umgebaut werden, daß er immun gegenüber Schwankungen der Versorgungspannung ist. Auf positiver Seite ist nichts zu tun. Wie oben gesehen, ändert sich die Verstärkung in einem weiten Bereich nicht. Ein Problem ist noch die negative Versorgungsspannung, von der die Verstärkung abhängt. Hier hilft die Idee weiter, die schon in den Grundlagen der Schaltung erwähnt wurde. Der Widerstand R_2 wird ausgebaut und einfach durch eine Zenerdiode mit der Durchbruchspannung 7V ersetzt. Auf diese Weise wird am Transistor T_2 immer dann eine konstante BE-Spannung anliegen, wenn die Zenerdiode geöffnet ist. In diesem Fall ist der Kollektorstrom natürlich ebenso konstant, was ja unser Anliegen ist.

Wird nach Aufbau der Schaltung die negative Versorgungsspannung variiert, bleibt die Verstärkung tatsächlich konstant. Erst wenn sie unter $\approx 7{,}8V$ fällt, bricht die Schaltung zusammen. Der Transistor sperrt, das Emitterpotential des Verstärkers gleicht sich der Eingangsspannung an, d.h. $U_{BE} = 0$. Ebenso schließen daher die Transistoren des Verstärkers, am Ausgang liegt die volle positive Versorgungsspannung an, wobei u_a ebenfalls 0 ist.

Differenzverstärker mit Stromgegenkopplung

Es soll ein Verstärker nach Schaltung 4 mit Differenzverstärkung $V_{Diff} = -10$ aufgebaut werden. Wegen $V_{Diff} = -\frac{R_C}{2R_G}$ werden die Kollektorwiderstände $R_C = 2k\Omega$ beibehalten und $R_G = \frac{R_C}{20} = 100\Omega$ dimensioniert.

Bei $\hat{u}_E = 15mV$ und $\hat{u}_A = 137,5mV$ ist die Verstärkung jedoch nur $V_{Diff} = 9,2$, was jedoch leicht durch unterschiedliche Transistoren und unterschiedliche Widerstände erklärt werden kann. Die Bedingung $SR_G = 19 >> 1$ ist zwar gut, aber immer noch nicht sehr gut erfüllt. Dafür ist der Verstärker jedoch besser aussteuerbar. Über einen weiten Eingangssignalbereich blieb die Verstärkung konstant, erst oberhalb von $u_e = 0,64V$ traten Verzerrungen auf; und selbst diese kamen nur sehr langsam zum tragen. In gewissem Sinne ist der genannte Wert willkürlich, da an der Signalkurve kein Knick, sondern nur ein langsames "in die Kurve gleiten" zu sehen.



Grafik 6 - Überlegung zu den Emittersignalen

Analog zu einer Messung am einfachen Differenzverstärkers sollen auch hier die Signale an den einzelnen Emittern und am gemeinsamen Mittelpunkt gemessen werden. Es ist $\hat{u}_e = 200mV$, $\hat{u}'_e = 0V$, $\hat{u}_{Em} = 8,5mV$, $\hat{u}'_{Em} = 190mV$ und $\hat{u}_M = 100mV$. Es wird die gleiche Überlegung angestellt wie vorhin, nur daß die ehem. Grafik 5 ein wenig modifiziert wird. Auch hier haben wir wieder eine symmetrische Spannungsteilerschaltung, bei der das Signal in der Mitte gleich der Hälfte des Eingangssignals ist. Da die Transistoren jedoch unterschiedlich angesteuert werden und $i \neq i'$ ist, fallen über den Widerständen R_G natürlich auch verschiedene differentielle Spannungen $u_G \neq u'_G$ ab.