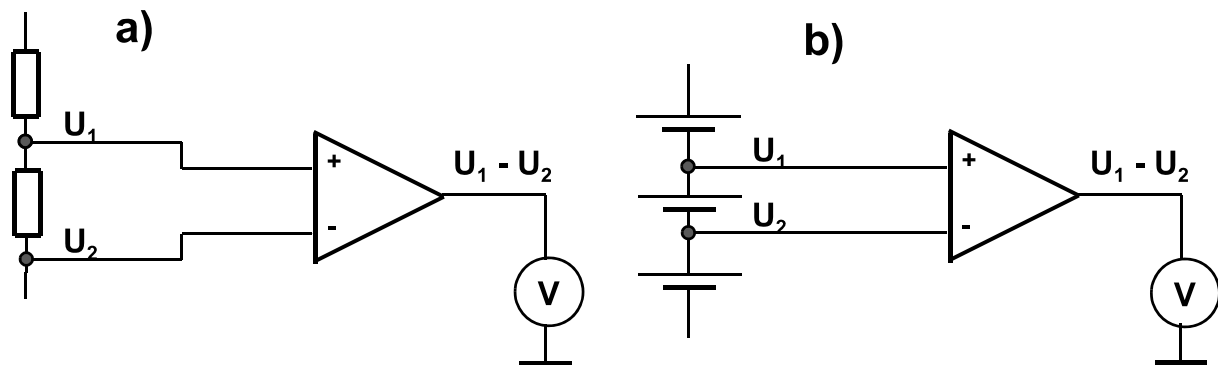


## 7. Differenzmeßverstärker (Instrumentation Amplifiers)

Oft steht die Aufgabe, x-beliebige Spannungswerte zu erfassen, um sie zu messen oder anderweitig weiterzuverarbeiten (Regelung, Analog-Digital-Wandlung usw.). Solche Messungen sind im Grunde Spannungsdifferenzmessungen (Abbildung 7.1), da die Messung gegen ein gemeinsames Bezugspotential (sprich: Masse) teils nicht möglich ist, teils viel zu ungenau wäre.



**Abb. 7.1** Elementare Spannungsdifferenzmessungen. a) Messung des Spannungsabfalls über einem stromdurchflossenen Widerstand. Anwendungsbeispiel: Strommessung. b) Messung an einer Spannungsquelle. Anwendungsbeispiele: Ausgangsspannungsmessung zu Regelungszwecken (Konstanthaltung), Speisespannungsüberwachung, Batteriekontrolle.

Entsprechende Meßverstärker haben folgenden Aufgaben:

- Verstärkung kleiner Differenzspannungen,
- Bereitstellung einer Meßspannung mit Bezug auf ein gemeinsames Nullpotential (Masse).

Wichtige Anforderungen:

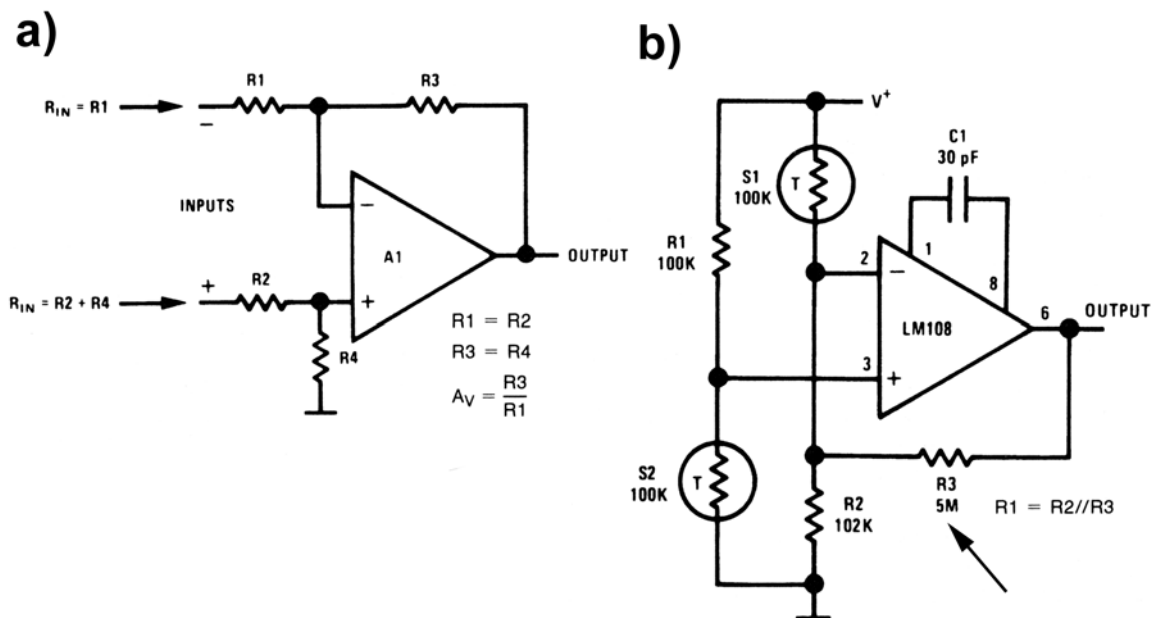
- Gleichtaktunterdrückung (gestattet es, die Eingänge hochzuhängen und unterdrückt eingekoppelte Störungen),
- hohe Eingangswiderstände (geringe Eingangsströme, geringe Belastung der Meßstellen),
- Linearität (konstanter Verstärkungsfaktor über den gesamten Eingangsspannungsbereich),
- Genauigkeit (gleichbleibende Verstärkung auch bei Speisespannungs-, Temperatur- und Lastschwankungen).

Eine naheliegende Lösung: ein Operationsverstärker, der als Differenzverstärker beschaltet wird. Diese Einfachlösung kommt aber bald an ihre Grenzen (Abbildung 7.2).

Charakteristische Nachteile der Differenzverstärkerschaltung:

- Die Eingänge haben nicht den gleichen Eingangswiderstand. Der Eingangswiderstand des invertierenden Eingangs ist besonders niedrig (=  $R_1$ ).

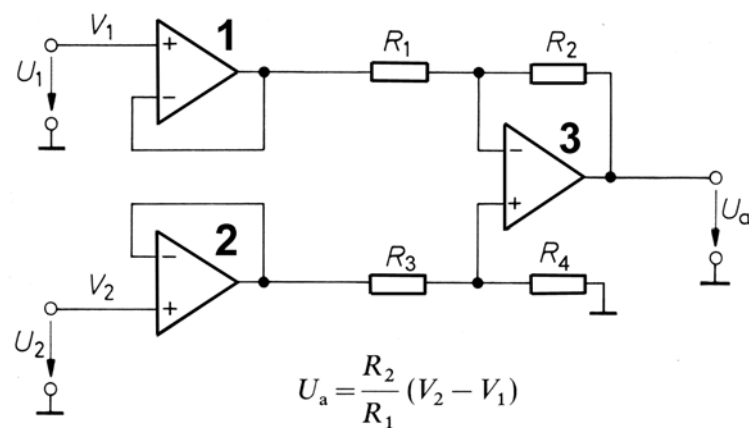
- Die Gleichtaktunterdrückung (CMRR) hängt von der tatsächlichen paarweisen Gleichheit der Widerstände ab (Resistor Matching;  $R_1 = R_2$ ,  $R_3 = R_4$ ). Beispiel: eine Abweichung von nur 1% (z. B.  $R_1 = 99\%$  von  $R_2$ ) ergibt folgende Werte der Gleichtaktunterdrückung: 46 dB bei Schleifenverstärkung = 1, 60 dB bei Schleifenverstärkung = 10 und 80 dB bei Schleifenverstärkung = 100. Um bei Schleifenverstärkung = 1 eine Gleichtaktunterdrückung von 86 dB<sup>1</sup> zu erreichen, dürfen sich die Widerstandswerte nur um 0,01% voneinander unterscheiden.
- Der Innenwiderstand der Meßstellen beeinflusst die paarweise Gleichheit der Widerstandswerte. Dieser Einfluß läßt sich nur verringern, indem man die Eingangswiderstände  $R_1$ ,  $R_2$  sehr hochohmig auslegt. Braucht man eine Verstärkung  $> 1$ , müssen die Widerstände  $R_3$ ,  $R_4$  dann extrem hochohmig sein (vgl.  $R_3$  in Abbildung 7.2b (Pfeil)). Beispiel:  $R_1 = R_2 = 1 \text{ M}\Omega$ . Verstärkung = 100 erfordert  $R_3 = R_4 = 100 \text{ M}\Omega$ . In dieser Größenordnung ist die paarweise Gleichheit kaum zu verwirklichen. Zudem wirken sich die Streukapazitäten stärker aus, so daß sich die Gleichtaktunterdrückung bei höheren Frequenzen verringert.



**Abb. 7.2** Der einfache Differenzverstärker als Meßverstärker (nach National Semiconductor). a) Grundschialtung, b) Einsatz in Brückenschaltung (z. B. mit Dehnungsmeßstreifen).

Abbildung 7.3 zeigt eine naheliegende Abhilfe.

1: 86 dB = 20000 : 1 = 1 mV Offsetspannung am Ausgang bei 20 V Gleichtaktspannung an den Eingängen.

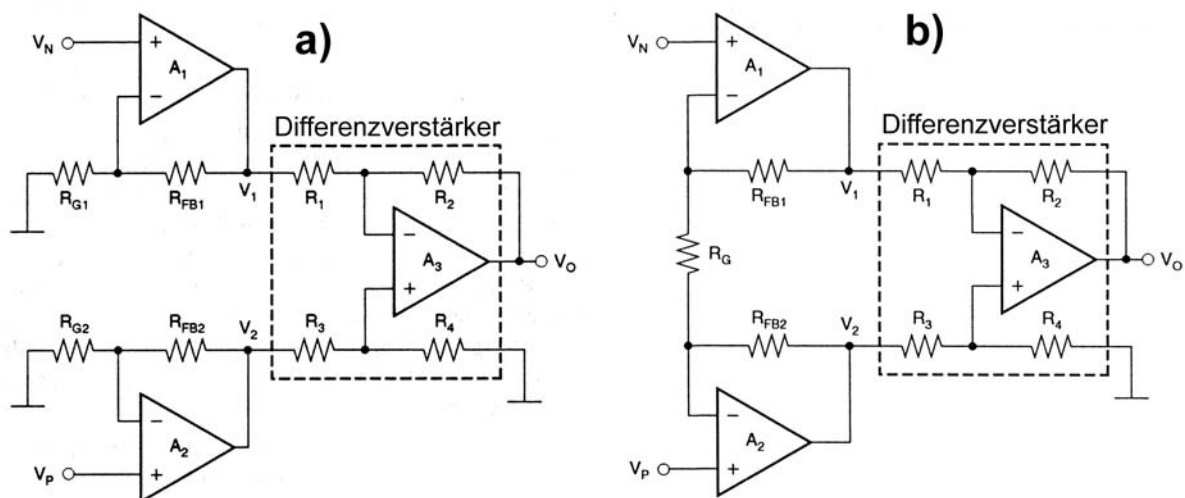


**Abb. 7.3** Der Differenzverstärker wird vom Einfluß der Meßstellen isoliert (nach: Tietze/Schenk). 1, 2 - Impedanzwandler; 3 - Differenzverstärker.

Der Differenzverstärker 3 sieht an seinen Eingängen nur die (gleichbleibenden) Innenwiderstände der Impedanzwandler 1, 2. Somit können die Widerstände  $R_1$ ,  $R_2$  niederohmiger ausgelegt werden.

Bei hoher Verstärkung unterscheiden sich aber nach wie vor  $R_1$  und  $R_2$  beträchtlich voneinander ( $R_2 = \text{Verstärkung} \cdot R_1$ ). Beispiel: Verstärkung = 100,  $R_1 = 10 \text{ k}\Omega$ ,  $R_2 = 1 \text{ M}\Omega$ . Somit ist es immer noch problematisch, die paarweise Gleichheit mit geringer Toleranz zu verwirklichen.

Ein Ausweg: Wir verlagern zumindest einen Teil der  $V$ verstärkung in die Vorstufen 1, 2, die somit aus Impedanzwandlern zu nichtinvertierenden Verstärkern werden (Abbildung 7.4). Im Extremfall übernehmen die Vorstufen die gesamte Verstärkung, und der Differenzverstärker hat eine Verstärkung von Eins (Abbildung 7.5). Dann gilt  $R_1 = R_2 = R_3 = R_4$ , so daß alle vier Widerstände auf exakt gleichen Wert zu bringen sind. Das ist eine fertigungstechnisch eher zu beherrschende Aufgabe.



**Abb. 7.4** Der klassische Differenzmeßverstärker (Instrumentation Amplifier; nach Burr-Brown).

- a) Eine naheliegende, aber typischerweise ungünstige Lösung. Die Gleichtaktunterdrückung hängt von der Gleichheit der Widerstandsverhältnisse der Vorstufen ab:  $R_{FB1} : R_{G1} = R_{FB2} : R_{G2}$ .

Gegentaktverstärkung der Vorstufen:

$$G_{DIFF} = \frac{V_N(1 + \frac{R_{FB1}}{R_{G1}}) - V_P(1 + \frac{R_{FB2}}{R_{G2}})}{V_N - V_P}$$

Gleichtaktverstärkung der Vorstufen:

$$G_{CM} = \frac{R_{FB1}}{R_{G1}} - \frac{R_{FB2}}{R_{G2}}$$

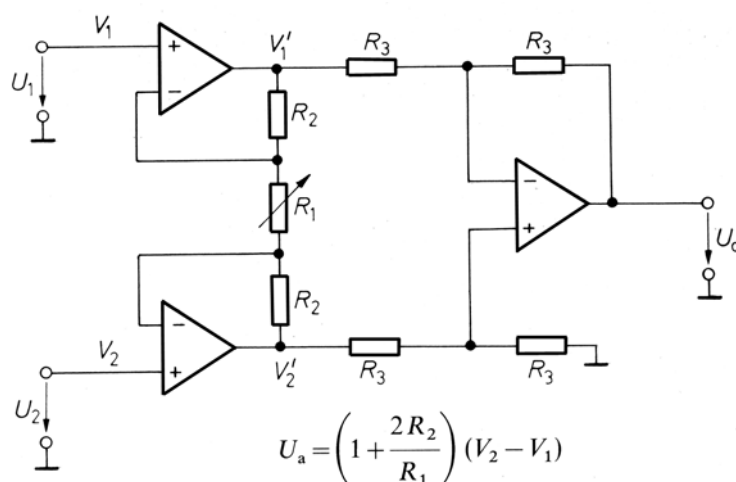
- b) Die allgemein übliche Lösung. Die Gleichtaktunterdrückung ist unabhängig von der Gleichheit der Widerstandsverhältnisse in den Vorstufen.

Gegentaktverstärkung der Vorstufen:

$$G_{DIFF} = \frac{R_{FB1} + R_{FB2} + R_G}{R_G}; \text{ mit } R_{FB1} = R_{FB2} = R_{FB}$$

$$G_{DIFF} = 1 + \frac{2R_{FB}}{R_G} \text{ (vgl. Abbildung 7.5). Die Verstärkung hängt somit von einem einzigen Widerstand } (R_G) \text{ ab.}$$

Die Gleichtaktverstärkung der Vorstufen liegt nahe bei Null (Idealfall:  $G_{CM} = 0$ ).

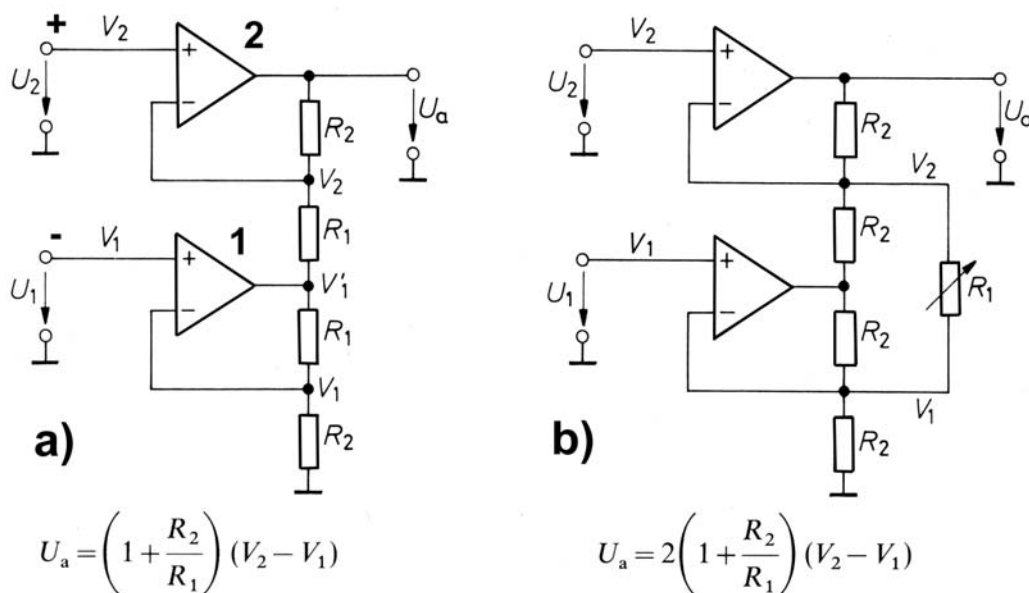


**Abb. 7.5** Mit dieser Dimensionierung liegt die Verstärkung ausschließlich in den Vorstufen (nach Tietze/Schenk).

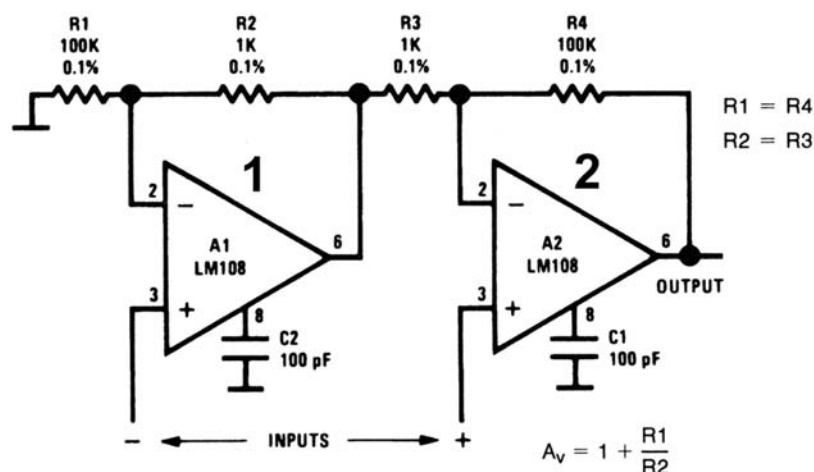
Die Gleichtaktunterdrückung der Gesamtanordnung wird praktisch von der Gleichtaktunterdrückung der Differenzverstärkerstufe bestimmt, also letzten Endes von der Gleichheit der Widerstände  $R_3$ .

Die Verstärkung der Gesamtanordnung ergibt sich als Produkt der Verstärkungen der Vorstufe und der Differenzverstärkerstufe.

Die Abbildungen 7.6 und 7.7 zeigen eine Schaltungslösung, die mit zwei Operationsverstärkern auskommt.



**Abb. 7.6** Differenzmeßverstärker mit zwei Operationsverstärkern (nach Tietze/Schenk). a) mit fester, b) mit einstellbarer Verstärkung.



**Abb. 7.7** Ein dimensioniertes Beispiel (nac: National Semiconductor).

Die Verstärkeranordnung ist unsymmetrisch. Verstärker 1 ist nichtinvertierend. Er hat eine geringe Verstärkung. Im Beispiel (Abbildung 7.7):  $= 1 + 1k/100k = 1,01$ . Verstärker 2 wird vom Ausgang des Verstärkers 1 angesteuert. Verstärker 2 übernimmt die Differenzbildung. Führen

beide Eingänge den gleichen Spannungspegel, so ergibt sich eine Differenz von 0V. Es wird also nur die Differenzspannung zwischen beiden Eingängen verstärkt, nicht aber die Gleichtaktspannung. In unserem Beispiel ist die Differenzverstärkung = 1,01.

Beide Verstärker 1, 2 sind als nichtinvertierende Verstärker geschaltet. Damit ergeben sich hohe Eingangswiderstände für beide Eingangssignale.

Die Anordnung ist ebenso empfindlich gegen Abweichungen von der paarweisen Gleichheit der Widerstände (Resistor Matching;  $R_1 = R_2$ ,  $R_3 = R_4$ ) wie der Differenzverstärker in Abbildung 7.2a. Die Widerstände sind aber vergleichsweise niederohmig, so daß ein entsprechender Abgleich einfacher ist.

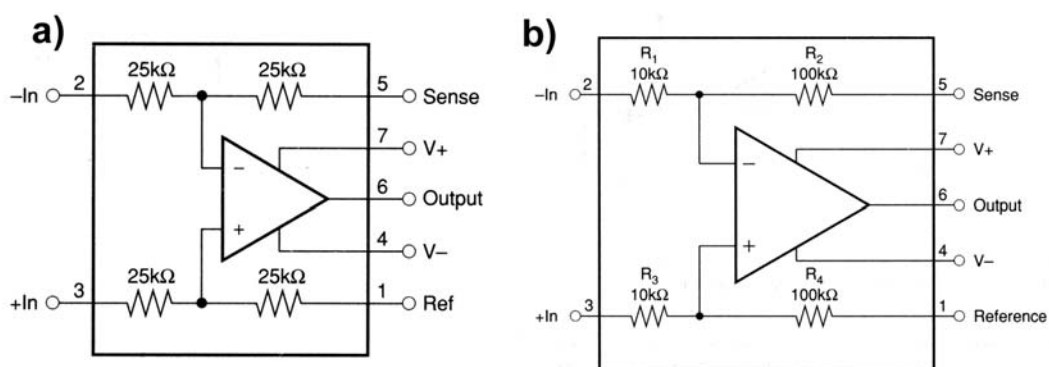
Zum Frequenzverhalten der Gleichtaktunterdrückung:

- Wegen der Niederohmigkeit wirken sich die Streukapazitäten nicht so stark aus.
- Nachteilig ist, daß das Signal am invertierenden Eingang erst den Verstärker 1 durchlaufen muß, bevor es an Verstärker 2 zur Wirkung kommt (Verzögerung = Phasenverschiebung gegenüber dem Signal am nichtinvertierenden Eingang). Abhilfe:
  - Kondensator parallel zu  $R_1$  (um die Verstärkung des Verstärkers 1 bei höheren Frequenzen anzuheben).
  - Wenn nur eine geringe Bandbreite erforderlich ist: Verstärker 2 so beschalten, daß der Amplitudengang eher abfällt (Frequenzgangkorrektur). Die Schaltung wird so unempfindlicher gegen höherfrequente Gleichtaktsignale.

Nach wie vor beeinträchtigt aber der Temperaturegang des Verstärkers 1 die Gleichtaktunterdrückung.

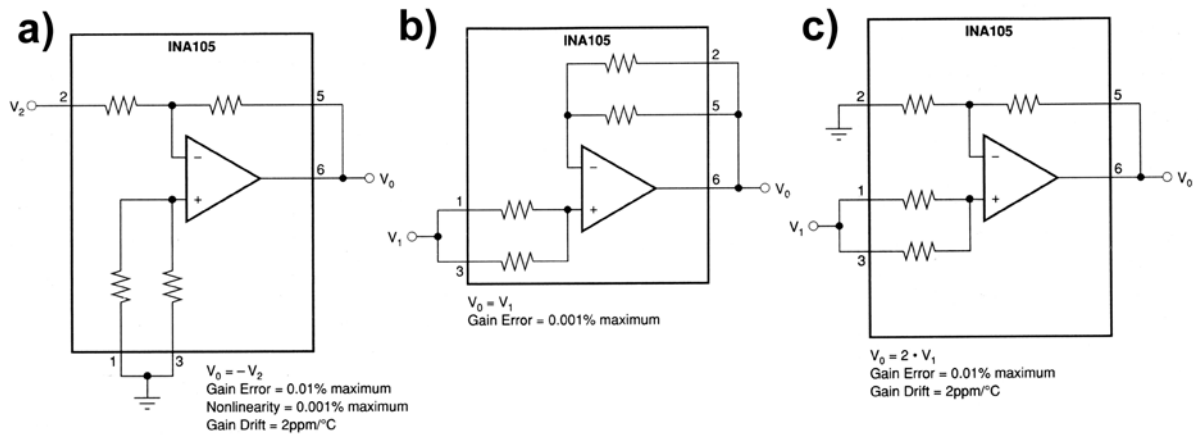
### Differenzmeßverstärkerschaltkreise

Die Abbildungen 7.7 bis 7.13 geben einen kleinen Einblick in das einschlägige Angebot an integrierten Schaltkreisen.

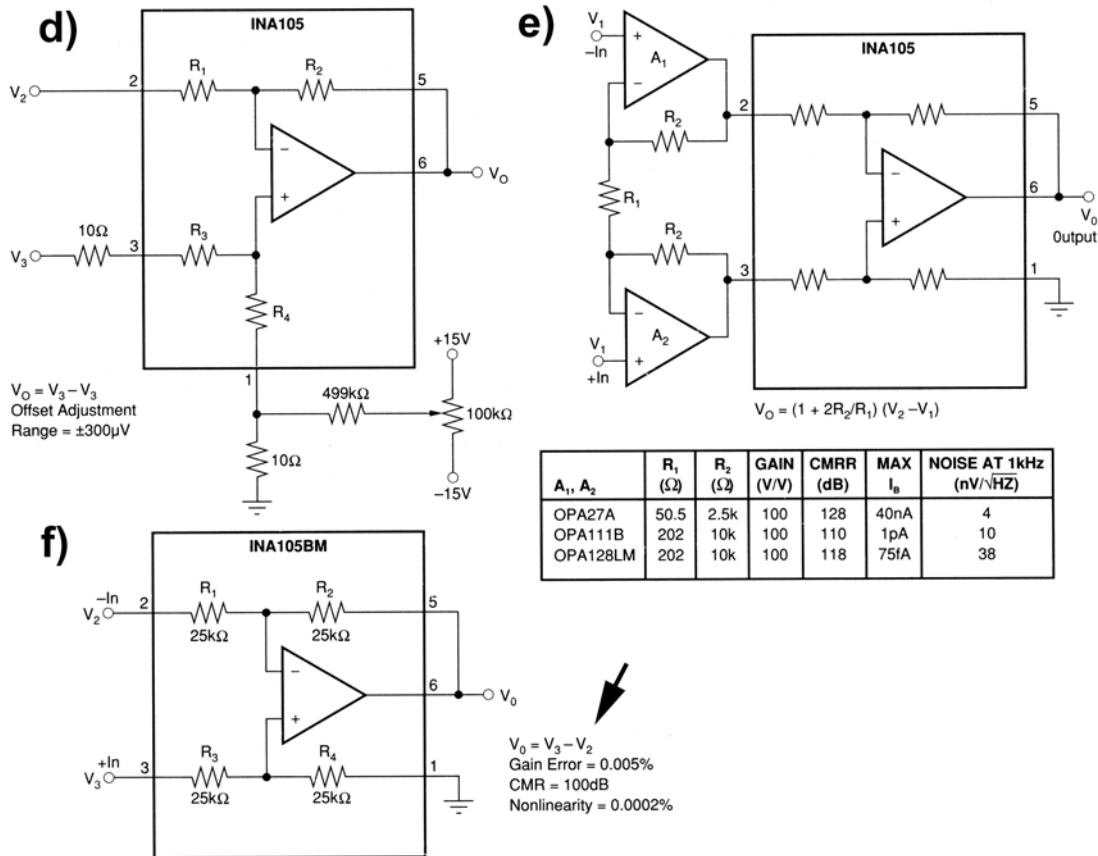


**Abb. 7.8** Manchmal muß es gar nicht so kompliziert sein... (nach Burr-Brown).  
a) Differenzverstärker mit Verstärkung 1; b) Differenzverstärker mit Verstärkung 10 (vgl. die Dimensionierung der Widerstände)

Entscheidend ist, daß sich Verstärker und Präzisionswiderstände (mittels Laser abgeglichen) auf demselben Schaltkreis befinden.. Die folgenden beiden Abbildungen zeigen einige Einsatzbeispiele.



**Abb. 7.9** Präzisions-Differenzverstärker mit fester Verstärkung (nach Burr-Brown). Einsatzbeispiele (1). Erklärung im Anschluß an Abbildung 7.9.

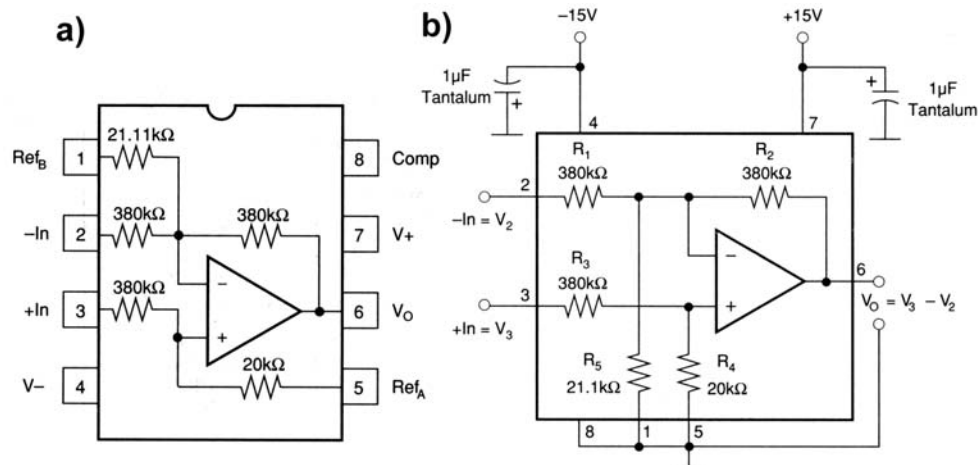


**Abb. 7.10** Präzisions-Differenzverstärker mit fester Verstärkung (nach Burr-Brown). Einsatzbeispiele (2).

Die Beispiele in den Abbildungen 7.9 und 7.10:

- a) Invertierender Verstärker mit Verstärkung = 1.
- b) Puffer (Impedanzwandler).

- c) Differenzverstärker mit Verstärkung = 2.  
 d) Differenzverstärker mit Offsetkompensation.  
 e) Differenzmeßverstärker (durch Zusatzbeschaltung mit zwei weiteren Operationsverstärkern; die Tabelle enthält einige Dimensionierungsbeispiele).  
 f) Differenzverstärker-Grundschiung. Beachte die Datenwerte (Pfeil).



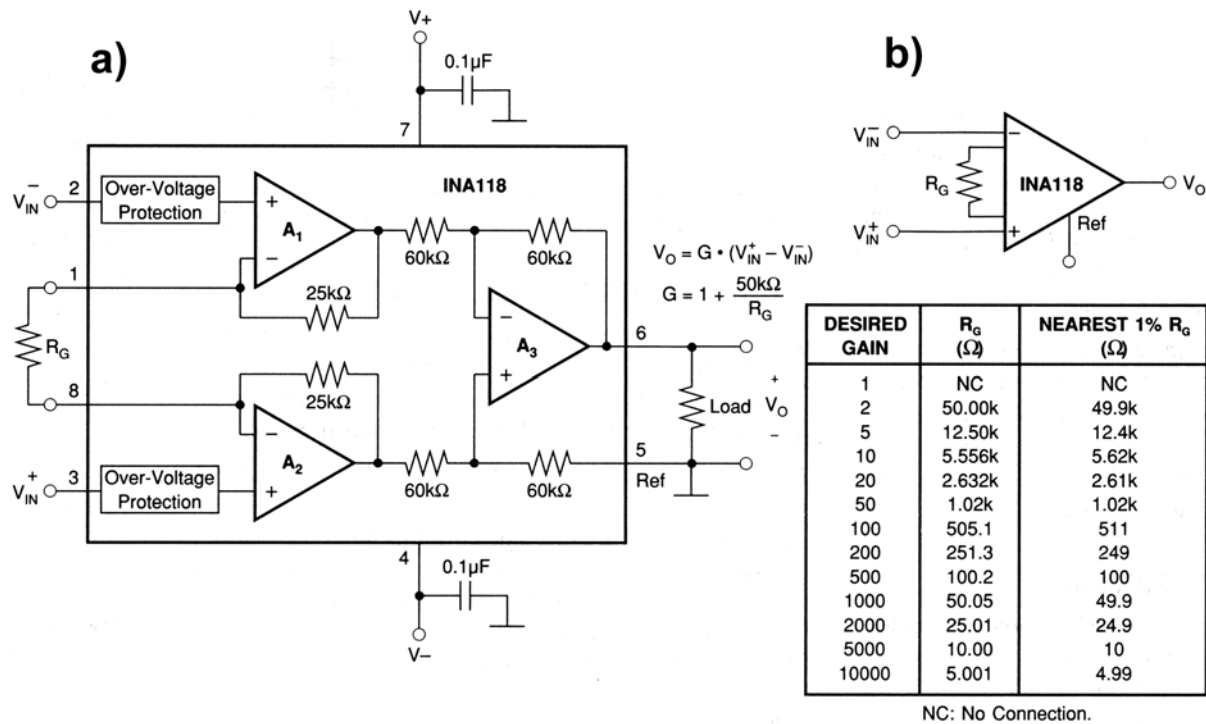
**Abb. 7.11** Dieser Differenzverstärker verträgt Gleichtaktspannungen bis  $\pm 200$  V (nach Burr-Brown). a) der Inhalt des Schaltkreises, b) eine typische Anwendungsschaltung. Verstärkung = 1.

Bei Betrieb mit  $\pm 15$  V Speisespannung kann der eigentliche Verstärker mit einer Differenzspannung von maximal  $\pm 10$  V angesteuert werden. Die eingebauten zusätzlichen Widerstände von 20 und 21,1 kΩ ermöglichen es, Spannungsteiler für höhere Eingangsspannungen aufzubauen. Teilverhältnis:  $400 \text{ k}\Omega$  zu  $20 \text{ k}\Omega = 20 : 1$ . Damit entsprechen 200 V am Schaltkreiseingang 10 V am Eingang des Operationsverstärkers.

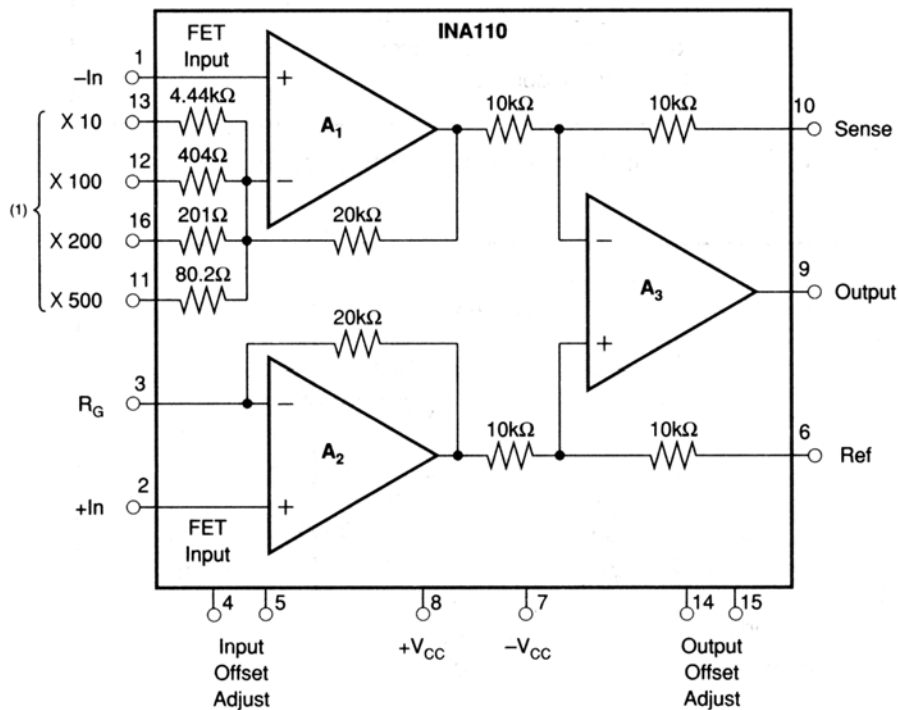
*Hinweis:*

Um die Gleichtaktunterdrückung (Datenblattwert: 86 dB) aufrecht zu erhalten, müssen die Eingänge an Spannungsquellen niedriger Impedanz angeschlossen werden (wie das z. B. bei Strommessungen typischerweise der Fall ist). Beispiel: ein Widerstand von 75 Ω in Reihe mit einem der Eingänge vermindert die Gleichtaktunterdrückung auf 72 dB. (Diese Tatsache steht naheliegenden Überlegungen entgegen, durch Vorschalten von Widerständen die Gleichtaktspannung weiter zu erhöhen.)

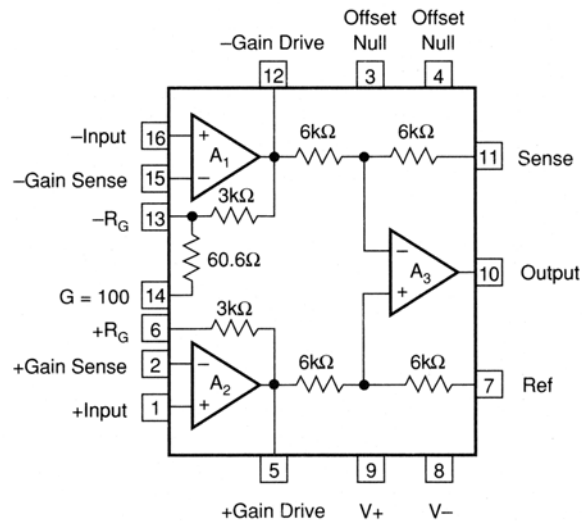




**Abb. 7.12** Ein Differenzmeßverstärker (Instrumentation Amplifier) mit drei Operationsverstärkern (nach Burr-Brown). Diese Schaltkreis kann durch einen außen anzuschließenden Widerstand  $R_G$  auf eine beliebige Verstärkung eingestellt werden. a) Grundschaltung; b) Schaltsymbol und Verstärkungstabelle.



**Abb. 7.13** Differenzmeßverstärker mit wählbarer Verstärkung (nach Burr-Brown). Dieser Schaltkreis hat eingebaute Widerstände zur Verstärkungseinstellung. Verstärkungsauswahl: einen der Widerstandsanschlüsse mit Pin 3 verbinden. Verstärkungsumschaltung im laufenden Betrieb: über Analogschalter.



**Abb. 7.14** Ein weiterer Differenzmeßverstärker (nach Burr-Brown).

Die Verstärkerschaltkreise unterscheiden sich u. a. in den Vorkehrungen zur Verstärkungseinstellung (eingebaute Widerstände für feste Verstärkung, eingebaute, aber von außen zugängliche Widerstände, außen anzuschließende Widerstände). Der hier vorgestellte Schaltkreis hat eingebaute Widerstände, die es gestatten, wahlweise eine Verstärkung von 1 oder von 100 einzustellen. Ansonsten können beliebige Verstärkungswerte durch Außenbeschaltung realisiert werden. Zudem sind Anschlüsse zum ausgangsseitigen Offsetabgleich vorgesehen.