



Erfindungspatent für die Schweiz und Liechtenstein
Schweizerisch-liechtensteinischer Patentschutzvertrag vom 22. Dezember 1978

(12) PATENTSCHRIFT A5

(11)

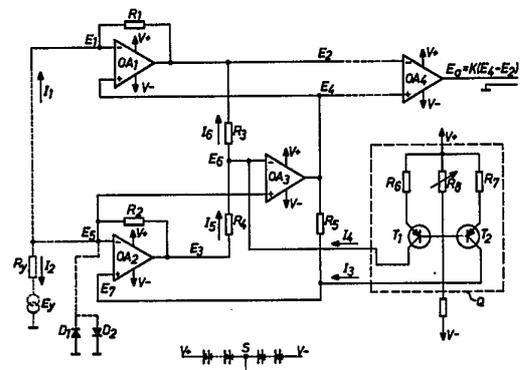
639 779

<p>(21) Gesuchsnummer: 6385/79</p> <p>(22) Anmeldungsdatum: 09.07.1979</p> <p>(30) Priorität(en): 21.08.1978 AT 6084/78</p> <p>(24) Patent erteilt: 30.11.1983</p> <p>(45) Patentschrift veröffentlicht: 30.11.1983</p>	<p>(73) Inhaber: AVL AG, Schaffhausen</p> <p>(72) Erfinder: George Fredericks, Graz (AT)</p> <p>(74) Vertreter: E. Blum & Co., Zürich</p>
---	---

(54) Schaltungsanordnung für eine elektrochemische Messeinrichtung.

(57) Die Messeinrichtung enthält eine aktive, polarisierte Elektrode, eine Bezugelektrode und eine Membran, welche die zu untersuchende Lösung vom Elektrolyten trennt, in welchem die Elektroden eingetaucht sind. Die Ausgangssignale aus der polarisierten Elektrode und aus der Bezugelektrode werden mit Hilfe einer Schaltungsanordnung verarbeitet. Die jeweilige Elektrode ist an einen der Eingänge (E1, E5) eines jeweiligen Operationsverstärkers (OA₁, OA₂) angeschlossen, die als Stromspannungswandler dienen. Die Ausgänge dieser Verstärker sind dann an einen dritten Operationsverstärker (OA₃) angeschlossen, welcher die allfällige Stromdifferenz in den Elektrodenströmen ermittelt und zur Kompensation dieser Stromdifferenz das Niveau des ersten und des zweiten Operationsverstärkers verschiebt.

Mit einer solchen Anordnung können alle Spannungen in einer allfälligen Leckschleife automatisch ausgeglichen werden, so dass der unerwünschte Leckstrom auf Null gehalten werden kann.



PATENTANSPRÜCHE

1. Schaltungsanordnung für eine elektrochemische Messeinrichtung mit einer aktiven, polarisierten Elektrode, einer Bezugelektrode und mit einer Membran, welche die zu untersuchende Lösung vom Elektrolyten trennt, in welchem die Elektroden eingetaucht sind, wobei die Schaltungsanordnung Mittel zur Erzeugung der Polarisationsspannung enthält, dadurch gekennzeichnet, dass die jeweilige Elektrode an einen der Eingänge eines jeweiligen Operationsverstärkers (OA₁, OA₂), die als Stromspannungswandler dienen, angeschlossen ist, dass die Ausgänge dieser Verstärker an einen dritten Operationsverstärker (OA₃) angeschlossen sind, welcher die allfällige Stromdifferenz in den Elektrodenströmen ermittelt und dessen Ausgang mit dem ersten und dem zweiten Operationsverstärker so verbunden ist, dass zur Kompensation dieser Stromdifferenz das Niveau dieser beiden Operationsverstärker verschoben wird.

2. Schaltungsanordnung nach Anspruch 1, dadurch gekennzeichnet, dass die Ausgänge des ersten und des zweiten Operationsverstärkers (OA₁ und OA₂) mittels eines Spannungsteilers (R₃, R₄) untereinander verbunden sind, dass die Verbindungsstelle dieser Widerstände (R₃, R₄) mit dem invertierenden Eingang (E₆) des dritten Operationsverstärkers (OA₃) verbunden ist, dass der nicht invertierende Eingang des dritten Operationsverstärkers (OA₃) mit dem invertierenden Eingang (E₅) des zweiten Operationsverstärkers (OA₂) verbunden ist, und dass der Ausgang des dritten Operationsverstärkers (OA₃) an den nicht invertierenden Eingang sowohl des ersten als auch des zweiten Operationsverstärkers (OA₁, OA₂) angeschlossen ist.

3. Schaltungsanordnung nach Anspruch 2, dadurch gekennzeichnet, dass die Mittel zur Erzeugung der Polarisationsspannung eine Doppelstromquelle (Q) aufweisen, deren erster Ausgang an den Eingang des dritten Operationsverstärkers (OA₃) und deren zweiter Ausgang mit dem nicht invertierenden Eingang des zweiten Operationsverstärkers (OA₂) und durch einen Widerstand (R₅) mit dem Ausgang des dritten Operationsverstärkers verbunden ist.

4. Schaltungsanordnung nach Anspruch 1, dadurch gekennzeichnet, dass ein Umwandler (OA₄) vorgesehen ist, welcher die vom ersten und dritten Operationsverstärker (OA₁, OA₃) gelieferte Differenzspannung in eine einpolige Spannung umwandelt.

5. Schaltungsanordnung nach Anspruch 1, dadurch gekennzeichnet, dass die Referenzelektrode über Spannungsbegrenzer (D₁, D₂) an der Masse oder an vorgewählter Sperrspannung liegt.

6. Schaltungsanordnung nach Anspruch 1, dadurch gekennzeichnet, dass ein Impedanzwandler (OA₅) vorgesehen ist, welcher den invertierenden Eingang des Operationsverstärkers (OA₂) und den nicht invertierenden Eingang des Operationsverstärkers (OA₃) speist.

Die vorliegende Erfindung betrifft eine Schaltungsanordnung für eine elektrochemische Messeinrichtung mit einer aktiven polarisierten Elektrode, einer Bezugelektrode und einer Membran, welche die zu untersuchende Lösung vom Elektrolyten trennt, in welchem die Elektroden eingetaucht sind, wobei die Schaltungsanordnung Mittel zur Erzeugung der Polarisationsspannung enthält.

Schaltungsanordnungen dieser Art sind bereits bekannt. Einige sind einfache Strommessgeräte mit zusätzlichem Mittel für die Erhaltung einer Polarisationsspannung mit Masse als Bezugspunkt. Solche Schaltungen funktionieren einwandfrei, solange der Membranisolationwiderstand sehr hoch ist.

Wenn dies nicht der Fall ist, können durch die Membran unerwünschte Ströme fließen, weil die zu untersuchende Lösung nicht unbedingt das gleiche Potential wie der Elektrolyt aufweist. Dazu kommt die Möglichkeit eines elektrochemischen Potentials am Interface zwischen Lösung und Elektrolyt innerhalb des Membranlecks. Die unerwünschten Ströme können den zu messenden Polarisationsstrom beeinflussen und die Messergebnisse verfälschen. Es gibt schon Methoden, solche Membranleckströme zu unterdrücken. Man kann z.B. die zu untersuchende Lösung von der Masse und allen anderen möglichen Stromsenken gut isolieren. Leider ist diese Massnahme in den meisten Fällen nur schwer durchführbar; besonders wenn sich andere Elektroden-Systeme in der gleichen Lösung befinden. Eine andere Methode liegt in der Isolierung der ganzen Messkette von Masse und anderen Stromsenken. Eine getrennte Versorgungsspannung für die Messkette ist notwendig und führt zu höheren Kosten.

In einem pO₂-Elektroden-System, welches ein Beispiel eines derartigen Systems darstellt, muss man Ströme im Nano-Ampere-Bereich messen, um die Grundlagen für den zu messenden Wert zu erreichen. Ausserdem ist eine stabile Polarisationsspannung zwischen der aktiven Elektrode und der Referenzelektrode während der Messung aufrecht zu erhalten. Unter diesen schwierigen Bedingungen ist in solchen Elektroden-Systemen der unerwünschte Strom, der durch ein allfälliges Membranleck fließt, auszuschalten, denn falls sich der Isolationswiderstand der Membran in einer Sauerstoff-(pO₂) Elektrode infolge eines Lecks in ihrer Membran verschlechtert, können Messfehler infolge undefinierter Potentialdifferenzen zwischen den Elektroden eines solchen elektrischen Systems und der zu untersuchenden Lösung auftreten. Diese Potentialdifferenzen verursachen Ströme durch die Referenzelektrode und das Membranleck.

Die Aufgabe der hier beschriebenen Schaltungsanordnung ist:

Alle Spannungen in der Leckschleife automatisch auszugleichen und somit den unerwünschten Leckstrom auf Null zu halten.

Dies wird bei der erfindungsgemässen Schaltungsanordnung der genannten Art dadurch erreicht, dass die jeweilige Elektrode an einen der Eingänge eines jeweiligen Operationsverstärkers angeschlossen ist, dass die Ausgänge dieser Operationsverstärker an einen dritten Operationsverstärker angeschlossen sind, welcher eine eventuell auftretende Differenz zwischen den zwei Elektrodenströmen erfasst, und dessen Ausgang mit dem ersten und dem zweiten Operationsverstärker so verbunden ist, dass zur Kompensation dieser Stromdifferenz das Niveau dieser beiden Operationsverstärker verschoben wird.

Nachstehend werden Ausführungsbeispiele der vorliegenden Erfindung anhand der beiliegenden Zeichnungen näher erläutert. Es zeigt:

Fig. 1 schematisch die vorliegende Schaltungsanordnung und

Fig. 2 einen zusätzlichen Teil dieser Schaltungsanordnung.

Die Messeinrichtung, in welcher die vorliegende Schaltungsanordnung angewendet wird, enthält eine oder mehrere Elektrodensysteme, die einer an sich bekannten Art sind, so dass sie hier nicht näher beschrieben werden müssen.

Die jeweilige polarisierte Elektrode z.B. eine Sauerstoffelektrode (pO₂) und die jeweilige Referenzelektrode, sind an je einen Eingang der vorliegenden Schaltungsanordnung angeschlossen (Fig. 1). Die polarisierte Elektrode ist an einen ersten Operationsverstärker OA₁ angeschlossen, wobei diese Verbindungsstelle mit E₁ bezeichnet ist. Dieser Operationsverstärker OA₁ ist mittels eines ersten Widerstandes R₁ gegengekoppelt. Der Ausgang E₂ dieses Operationsverstärkers OA₁ wird dem invertierenden Eingang eines weiteren Operations-

verstärkers OA₄ zugeführt, dessen nicht invertierender Eingang mit dem nicht invertierenden Eingang des ersten Operationsverstärkers OA₁ verbunden ist.

Die Aufgabe dieses weiteren Operationsverstärkers OA₄ ist, das ihm zugeführte Differenzsignal in einen einpoligen Ausgang E_a umzuwandeln. Dieser Operationsverstärker OA₄ misst somit nur die Grösse der Differenz zwischen den Signalen an seinen Eingängen, und ist unabhängig vom Niveau der gesamten Schaltungsanordnung.

Die Referenzelektrode ist an den invertierenden Eingang eines zweiten Operationsverstärkers OA₂ angeschlossen, wobei diese Anschlussstelle mit E₅ bezeichnet ist. Dieser Operationsverstärker OA₂ ist mittels eines Widerstandes R₂ auch gegengekoppelt. Der Ausgang E₃ dieses zweiten Operationsverstärkers OA₂ ist über einen Widerstand R₄ an den invertierenden Eingang E₆ eines dritten Operationsverstärkers OA₃ angeschlossen. Der Eingang E₆ dieses dritten Operationsverstärkers OA₃ ist dann über einen Widerstand R₃ mit dem Ausgang E₂ des ersten Operationsverstärkers OA₁ verbunden. Der nicht invertierende Eingang des dritten Operationsverstärkers OA₃ ist mit dem Verbindungspunkt E₅ am Eingang des zweiten Operationsverstärkers OA₂ verbunden. Der Ausgang E₄ des dritten Operationsverstärkers OA₃ ist sowohl mit dem nicht invertierenden Eingang E₄ des ersten Operationsverstärkers OA₁ als auch mit dem nicht invertierenden Eingang E₇ des zweiten Operationsverstärkers OA₂ verbunden, wobei diese zuletzt genannte Verbindung unter Zwischenschaltung eines Widerstandes R₅ erfolgt.

Da für den Betrieb des gesamten Messsystems eine Polarisationsspannung zwischen der Referenzelektrode und der polarisierten Elektrode erforderlich ist, ist eine diesem Zweck dienende Doppelstromquelle Q in der vorliegenden Schaltung vorgesehen. Diese Quelle Q enthält zwei Transistoren T₁ und T₂, welche aus einer Speisequelle S gespeist werden. Die Speisequelle S kann auch als Speisequelle für den jeweiligen Operationsverstärker dienen. Zwischen den Anschlussklemmen V+ und V- der Doppelstromquelle Q ist ein Spannungsteiler mit einem veränderlichen Widerstand R₈ geschaltet, wobei die Emitter der Transistoren T₁ und T₂ über je einen Widerstand R₆ bzw. R₇ an einen Pol der Speisequelle S angeschlossen sind. Der Kollektor des ersten Transistors T₁ ist an den invertierenden Eingang E₆ des dritten Operationsverstärkers OA₃ angeschlossen. Der Kollektor des zweiten Transistors T₂ ist dagegen an den nicht invertierenden Eingang des zweiten Operationsverstärkers OA₂ angeschlossen. Diese Quelle Q, zusammen mit den Widerständen R₃ und R₅ erzeugt die genannte Polarisationsspannung, welche, für ein pO₂-System eine Grösse von etwa 700 mV aufweist, und welche auf den beschriebenen Wegen den Elektroden zugeführt wird. Die Grösse dieser Polarisationsspannung, gegeben durch die Ströme I₃ und I₄ und die Widerstände R₃ und R₅, lässt sich mit Hilfe des veränderlichen Widerstandes R₈ wahlweise einstellen. Die Quelle Q sorgt dafür, dass die einmal eingestellte Grösse der Polarisationsspannung gleich bleibt, und zwar unabhängig davon, wie gross der Strom ist, welcher aus dem Punkt E₅ am Eingang des zweiten Operationsverstärkers herausfliesst. Selbstverständlich können hier auch andere Arten von Stromquellen verwendet werden; z.B. Feldeffekt-Stromquellen, wenn sie die notwendige Stabilität über den Arbeitstemperaturbereich aufweisen.

Es ist auch zweckmässig, einen Spannungsbegrenzer bestehend aus umgekehrt gepolten Dioden D₁ und D₂ vorzusehen. Diese Spannungs- bzw. Potentialbegrenzer setzen die obere und untere Grenze der Spannung bzw. des Potentials fest, welche die Schaltungsanordnung während des Betriebes derselben einnehmen kann. Wenn erforderlich, kann dieser Potentialbereich durch mehrere Dioden in Serienschaltung oder durch eine Vorspannung in Sperrichtung an die Dioden vergrössert werden.

In Fig. 1 ist ein allfälliges Leck in der Membran eines Elektroden-Systems mit Hilfe einer Serienschaltung dargestellt, welche aus einem Widerstand R_y und einer Quelle E_y besteht. Diese Serienkombination ist an die Referenzelektrode einerseits angeschlossen.

Die beschriebene Schaltung hat die Eigenschaft, dass sie einen, zwischen den Punkten E₅ und E₁ fliessenden Strom I₁ messen kann. Falls die analysierte Flüssigkeit – beispielsweise Blut – keinen Sauerstoff enthält, so ist der Strom I₁ gleich Null. Mit der zunehmenden Konzentration von Sauerstoff nimmt auch die Grösse des Stromes I₁ zu.

Falls die Membran kein Leck aufweist, ist der Widerstand R_y unendlich gross. Dies hat zur Folge, dass kein Strom I₂ durch den Widerstand R_y fliesst. Infolgedessen ist die Grösse des Stromes I₁, welcher aus E₅ ausfliesst der Grösse des Stromes I₁ gleich, welcher in den Punkt E₁ am Eingang des ersten Operationsverstärkers OA₁ einfliesst. Man kann auch so sagen, dass die Grösse des Stromes in den Punkten E₁ und E₅ gleich ist. Der Strom fliesst also von der Klemme V+ am Operationsverstärker OA₂ durch diesen, durch den Gegenkoppplungs-Widerstand R₂, durch den Punkt E₅, durch die Referenzelektrode, die polarisierte Elektrode, den Punkt E₁, den Widerstand R₁, den Operationsverstärker OA₁ bis zur Klemme V- am ersten Operationsverstärker.

Falls die Membran ein Leck aufweist, dann fliesst dadurch ein Leckstrom I₂, der sich mit dem aus dem Punkt E₅ ausfliessenden Strom I₁ summiert. Die Grösse der Ströme im Punkt E₁ und E₅ ist in einem solchen Falle nicht mehr gleich. Diese Ungleichheit erzeugt eine Differenzspannung an den Eingängen des dritten Operationsverstärkers OA₃. Am Ausgang des dritten Operationsverstärkers OA₃ erscheint ein sehr verstärktes Korrektursignal, welches den nicht invertierenden Eingängen des ersten und zweiten Operationsverstärkers OA₁ und OA₂ zugeführt wird. Dies bewirkt, dass das Potential der gesamten Schaltung so eingestellt wird, dass unter Berücksichtigung der Spannung E_y ein Leckstrom verhindert wird. Man kann es auch so sagen. Eine Differenz in den Elektrodenströmen kann nur vorkommen, wenn ein Leckstrom I₂ fliesst. Ein Leckstrom I₂ ist nur möglich, wenn die Summe aller Spannungen in der Leckschleife nicht Null ist. Der dritte Operationsverstärker OA₃ sorgt dafür, dass das Potentialniveau des Elektrolytes so eingestellt ist, dass die Summe aller Spannungen in der Leckschleife gleich Null ist. Die einstellbare Doppelstromquelle Q zusammen mit den zwei Widerständen R₃ und R₅, erzeugt zwischen den zwei Elektroden eine einstellbare Spannungsdifferenz, eine Polarisationsspannung.

Aus Erfahrung weiss man, dass die Spannung E_y in den meisten Fällen im Intervall von 0 bis 100 mV liegt. Das Intervall der Niveau-Unterschiede, welches eine solche Schaltungsanordnung während ihres Betriebes einnehmen kann, ist bei einer Membran ohne Leck jedoch viel grösser. In einem solchen Fall könnte das jeweilige Potential-Niveau sehr unterschiedliche Werte haben. Die Durchlassspannungen der Dioden D₁ und D₂ setzen die Grenzen für die des Potential-Niveaus der Schaltungsanordnung fest, wobei sich das Niveau innerhalb, eines Spannungsunterschiedes bei ungefähr 1 V bewegen kann. Auch wenn in der Membran ein Leck vorhanden ist, erreicht die Spannung E_y, wie gesagt, praktisch höchstens 100 mV, was innerhalb der durch die Dioden D₁ und D₂ festgesetzten Grenzen mit Sicherheit liegt. Wenn erforderlich, kann dieser Potentialbereich trotzdem durch die Schaltung von mehreren Dioden in Serie oder durch eine Vorspannung in Sperrichtung an die Dioden vergrössert werden.

Eine derartige Schaltungsanordnung sorgt dafür, dass die allfälligen Leckströme durch die Membran unterdrückt werden. Sie erlaubt somit die Messung des eigentlichen Polarisationsstromes der aktiven Elektrode, sowie die Einstellung und die Aufrechterhaltung der jeweils erforderlichen Polarisations-

spannung. Die Lebensdauer der Membran kann verlängert werden, weil man zuverlässige Messergebnisse bekommt, bis die Membran so schlecht wird, dass eine beträchtliche Menge der Lösung durch das Leck fließt. Dieser Zustand ist jedoch leicht erkennbar, denn es treten dann beim Eichen der Elektroden Instabilität und Drift auf. Das bisher notwendige periodische Prüfen des Membran-Isolationswiderstandes ist bei Anwendung der vorliegenden Schaltungsanordnung nicht mehr erforderlich.

Die Wirkungsweise der beschriebenen elektronischen Schaltungsanordnung kann anhand folgender Berechnungen noch verdeutlicht werden.

I_1 ist, wie gesagt, der Strom, der auszuwerten ist und der durch die Polarisationsspannung zwischen E_5 und E_1 in Abhängigkeit von der Ionenkonzentration in der Messlösung bewirkt wird.

I_2 ist, wie gesagt, der unerwünschte Strom, der durch die unbekannte Spannung E_y verursacht wird und der durch einen unbekanntem Widerstand R_y fließt, dessen Wert praktisch zwischen 0 und unendlich liegen kann.

Die beiden Ausgangsspannungen E_2 und E_4 stellen einen Differenzgang dar und sie speisen den Verstärker OA_4 , der einen Differenz-Eingang und eine hohe Gleichtaktunterdrückung besitzt. Die eigentliche Schaltung dieses Verstärkers ist nicht wichtig, denn er muss nur die Übertragungsfunktion $E_a = K(E_4 - E_2)$ aufweisen, wobei K eine Konstante ist.

Unter Berücksichtigung der negativen Rückkopplung und der hohen Leerlaufverstärkungen der Operationsverstärker OA_1 , OA_2 und OA_3 kann man die folgenden Gleichungen schreiben:

$$E_1 = E_4 \quad (1)$$

$$E_5 = E_6 = E_7 \quad (2)$$

$$I_4 + I_5 = I_6 \quad (3)$$

$$E_4 = E_7 - I_3 R_5 \quad (4)$$

$$E_2 = E_1 - I_1 R_1 \quad (5)$$

$$E_3 = E_5 + R_2(I_1 + I_2) \quad (6)$$

$$I_5 = \frac{E_3 - E_6}{R_4} \quad (7)$$

$$I_6 = \frac{E_6 - E_2}{R_3} \quad (8)$$

Aus (2) und (7) erhält man:

$$I_5 = \frac{E_3 - E_5}{R_4}$$

Ersetzen wir darin E_3 durch die Gleichung (6) erhalten wir

$$I_5 = \frac{E_5 + R_2(I_1 + I_2) - E_5}{R_4} = \frac{R_2(I_1 + I_2)}{R_4} \quad (9)$$

Aus (1) und (5) ergibt sich:

$$E_2 = E_4 - I_1 R_1$$

Aus (2) und (4) erhält man:

$$E_4 = E_5 - I_3 R_5 \quad \text{und}$$

4

somit ergibt sich:

$$E_2 = E_5 - I_3 R_5 - I_1 R_1 \quad (10)$$

5

Aus (2) und (8) ergibt sich:

$$I_6 = \frac{E_5 - E_2}{R_3}$$

10

Ersetzen wir darin E_2 durch (10):

$$I_6 = \frac{E_5 - E_5 + I_3 R_5 + I_1 R_1}{R_3} = \frac{I_3 R_5 + I_1 R_1}{R_3} \quad (11)$$

15

Aus (3), (9) und (11) ergibt sich dann:

$$I_4 + \frac{R_2(I_1 + I_2)}{R_4} = \frac{I_3 R_5 + I_1 R_1}{R_3}$$

20

Diese Gleichung kann man umwandeln in:

$$I_1(R_2 R_3 - R_1 R_4) = I_3 R_4 R_5 - I_2 R_2 R_3 - I_4 R_3 R_4$$

25

Setzen wir jetzt $R_2 R_3 = R_1 R_4$ dann verschwindet I_1 und wir haben:

$$I_2 R_2 R_3 = R_4(I_3 R_5 - I_4 R_3)$$

30

Setzen wir jetzt $I_3 R_5 = I_4 R_3$ muss I_2 gleich 0 sein. Die letzte Voraussetzung kann man schreiben:

$$\frac{I_3}{I_4} = \frac{R_3}{R_5}$$

35

Für parallele Stromquellen kann man im allgemeinen schreiben:

$$\frac{I_3}{I_4} = \frac{R_6}{R_7}$$

40

Es können aber Fehler durch Ungleichheit bzw. Nichtlinearität der zwei Transistoren vorkommen. Trotzdem, wenn wir ein integriertes Transistorpaar verwenden und gleichzeitig

45

$$I_4 = I_3$$

50

voraussetzen, ist die Schaltung sehr genau und stabil, da auch die beiden Kollektorspannungen immer gleich bleiben (siehe Gleichung 2).

Damit ist deutlich geworden, dass die Schaltung unter den Voraussetzungen

$$R_7 = R_6$$

55

$$R_3 = R_5$$

$$R_2 R_3 = R_1 R_4$$

60

den Strom I_2 auf 0 hält, unabhängig vom Wert von I_1 und der Spannung E_y . Natürlich darf E_y nicht ausserhalb der Gleichtaktspannungsbereiche der Operationsverstärker liegen.

Aus den Gleichungen (1), (2) und (4) sehen wir, dass die Polarisationsspannung

65

$$E_5 - E_1 = I_3 R_5$$

konstant bleibt, unabhängig von den anderen Spannungs- und

Stromwerten. Diese Spannung lässt sich auch durch den regelbaren Widerstand R_3 , der I_3 und I_4 steuert, einstellen.

Aus den Gleichungen (1) und (5) sehen wir, dass die Differenzausgangsspannung

$$E_4 - E_2 = I_1 R_1$$

proportional dem Polarisationsstrom I_1 ist, unabhängig von den anderen Variablen.

Wenn der Membranisolationswiderstand (R_y in der Schaltung), sehr hoch ist, ist das Spannungsniveau der Schaltung undefiniert, da eine Steuerung fehlt. Die hochohmigen Dioden D_1 und D_2 begrenzen, wie gesagt, den Spannungsbereich und dienen gleichzeitig als Eingangsschutz.

In diesen Berechnungen wurde angenommen, dass die drei Operationsverstärker OA_1 , OA_2 und OA_3 eine sehr hohe Eingangsimpedanz aufweisen; d.h. dass die Eingangsströme im Verhältnis zu den zu messenden Strömen sehr klein sind. Operationsverstärker mit sehr hoher Eingangsimpedanz sind jedoch teuer. Es ist möglich, mit noch einem Operationsver-

stärker OA_5 (Fig. 2) eine wirtschaftlichere Schaltungsanordnung zu erreichen. Die Referenzelektrode ist an den nicht invertierenden Eingang dieses Operationsverstärkers OA_5 angeschlossen. Der Ausgang desselben ist mit dem invertierenden Eingang des zweiten Operationsverstärkers OA_2 und auch mit seinem eigenen invertierenden Eingang unmittelbar verbunden. Das andere Ende des Widerstandes R_2 ist diesmal an den nicht invertierenden Eingang des Operationsverstärkers OA_5 angeschlossen.

Der Operationsverstärker OA_5 weist eine sehr hohe Eingangsimpedanz auf und ist als Impedanzwandler (Spannungsfollower) eingesetzt. Wegen der sehr niedrigen Ausgangsimpedanz dürfen die zwei Operationsverstärker OA_2 und OA_3 durch ihre Eingänge etwas Strom aufnehmen. Zwei teure Operationsverstärker werden somit durch einen teuren und zwei billige ersetzt. Die vorstehenden Berechnungen behalten jedoch ihre Gültigkeit, weil die Spannungen auch für diese Ausführung der Schaltungsanordnung am Eingang und am Ausgang des Operationsverstärkers OA_5 immer gleich sind.

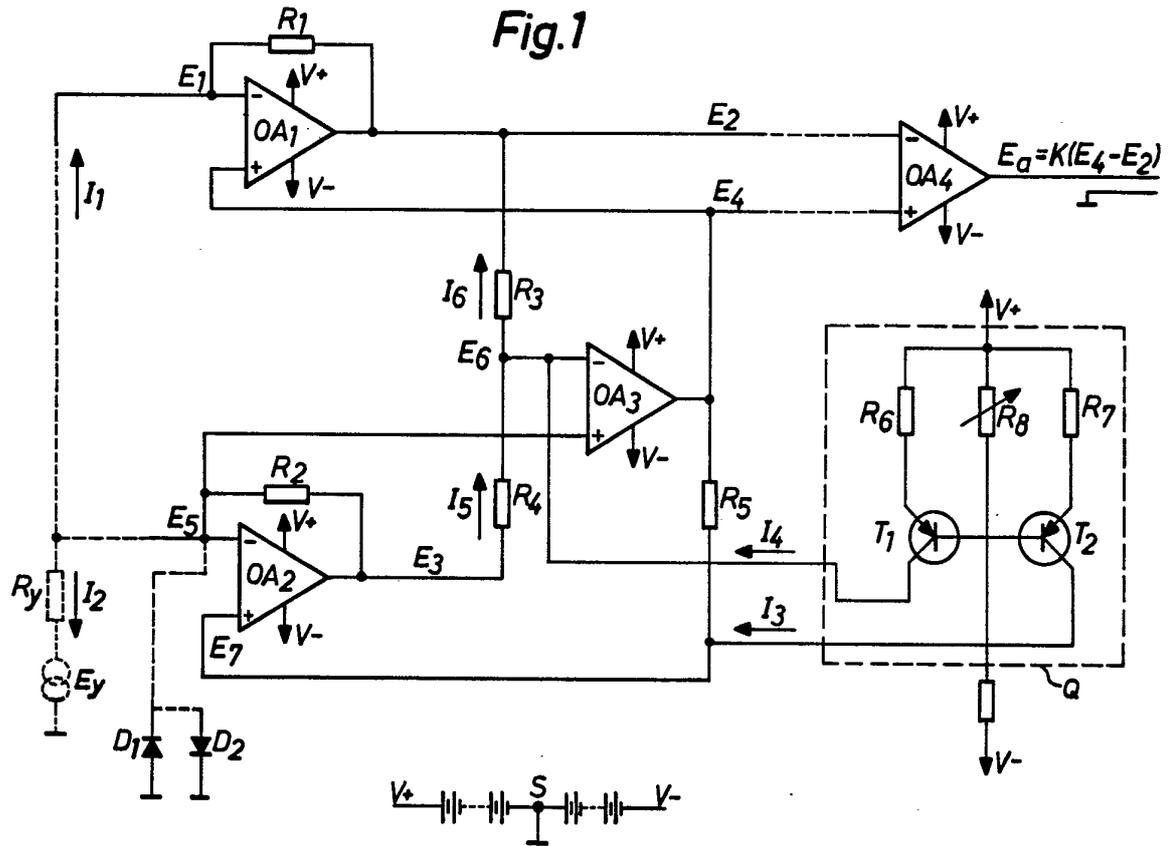


Fig. 2

