



(10) **DE 10 2018 114 432 B3** 2019.10.10

(12) **Patentschrift**

(21) Aktenzeichen: **10 2018 114 432.6**
 (22) Anmeldetag: **15.06.2018**
 (43) Offenlegungstag: –
 (45) Veröffentlichungstag
 der Patenterteilung: **10.10.2019**

(51) Int Cl.: **G01R 15/04 (2006.01)**
G01R 35/02 (2006.01)

Innerhalb von neun Monaten nach Veröffentlichung der Patenterteilung kann nach § 59 Patentgesetz gegen das Patent Einspruch erhoben werden. Der Einspruch ist schriftlich zu erklären und zu begründen. Innerhalb der Einspruchsfrist ist eine Einspruchsgebühr in Höhe von 200 Euro zu entrichten (§ 6 Patentkostengesetz in Verbindung mit der Anlage zu § 2 Abs. 1 Patentkostengesetz).

(73) Patentinhaber:
**Bundesrepublik Deutschland, vertreten durch das
 Bundesministerium für Wirtschaft und Energie,
 dieses vertreten durch den Präsidenten der
 Physikalisch-Technischen Bundesanstalt, 38116
 Braunschweig, DE**

(72) Erfinder:
Passon, Stephan, 38118 Braunschweig, DE

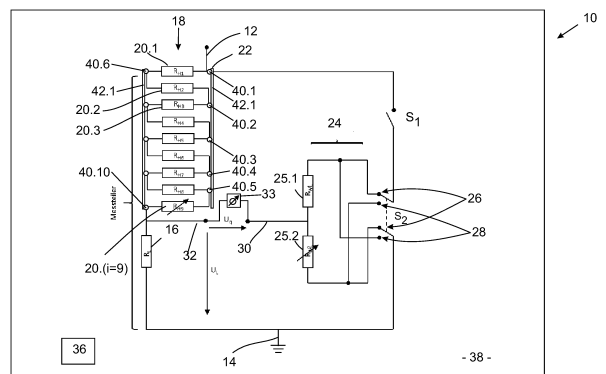
(74) Vertreter:
**Gramm, Lins & Partner Patent- und
 Rechtsanwälte PartGmbB, 38122 Braunschweig,
 DE**

(56) Ermittelter Stand der Technik:

US	3 377 555	A
US	3 886 448	A
US	2 803 799	A

(54) Bezeichnung: **Spannungsteiler**

(57) Zusammenfassung: Die Erfindung betrifft einen Spannungsteiler mit (a) einem Eingangsanschluss (12), (b) einem Ausgangsanschluss (14), (c) einem Bezugswiderstand (16) und (d) einer Widerstandskaskade (18). Erfindungsgemäß ist vorgesehen, dass (e) die Widerstandskaskade (18) (i) eine Mehrzahl an Kaskaden-Widerständen (20.i) aufweist, wobei zumindest ein Kaskaden-Widerstand (20.9) veränderbar ist, und (ii) zumindest eine Kontaktierungsvorrichtung (22) aufweist, mittels der die Kaskaden-Widerstände (R_{Hi}) in eine Reihenschaltung und in eine Parallelschaltung bringbar sind, und die (iii) mit dem Bezugswiderstand (16) zwischen dem Eingangsanschluss (12) und dem Ausgangsanschluss (14) in Reihe geschaltet ist, und dass (f) der Spannungsteiler (10) einen Hilfsteiler (24) hat, der (i) einen ersten Hilfsteiler-Eingang (26), der mit dem Eingangsanschluss (12) schaltbar verbindbar ist, (ii) einen zweiten Hilfsteiler-Eingang (28), der mit dem Eingangsanschluss (12) schaltbar verbindbar ist, (iii) einen ersten Hilfsteiler-Widerstand (25.1), (iv) einen veränderbaren zweiten Hilfsteiler-Widerstand (25.2), (v) einen Hilfsteiler-Ausgang (30), der zwischen dem ersten Hilfsteiler-Widerstand (25.1) und dem zweiten Hilfsteiler-Widerstand (25.2) liegt und (vi) einen Hilfsteiler-Schalter (S2) aufweist, mittels dem der Eingangsanschluss (12) alternierend mit dem ersten Hilfsteiler-Eingang (26) und dem zweiten Hilfsteiler-Eingang (28) verbindbar ist, (g) der Bezugswiderstand (16, R_L) und die Widerstandskaskade ...



Beschreibung

[0001] Die Erfindung betrifft einen Spannungsteiler mit (a) einem Eingangsanschluss, (b) einem Ausgangsanschluss, (c) einem Bezugswiderstand und (d) einer Widerstandskaskade. Gemäß einem zweiten Aspekt betrifft die Erfindung ein Verfahren zum Kalibrieren eines Spannungsteilers oder einer Spannungsteilvorrichtung.

[0002] Spannungsteiler werden verwendet, um hohe Spannungen möglichst genau messen zu können. Die SI-Einheit der Spannung wird durch ein Primärnormal dargestellt, das zumindest einen Josephson-Kontakt hat. Die von Josephson-Kontakten abgegebene Spannung ist sehr klein, sodass ein Vergleich mit dieser Spannung voraussetzt, dass die zu messende Mess-Spannung um mehrere Größenordnungen geteilt wird. Der Teilungsfaktor, der auch Maßstabsfaktor genannt wird, muss durch Kalibrierung ermittelt werden. Bei bekannten Spannungsteilern ist diese Kalibrierung sehr aufwendig.

[0003] Aus der US 2 803 799 A ist ein gattungsgemäßer Spannungsteiler bekannt, bei dem ein veränderbarer Widerstand verwendet wird, der zu einem Teil der Widerstandskaskade parallel geschaltet ist. Umfasst dieser Spannungsteiler eine Vielzahl an Kaskaden-Widerständen, so ist die Kalibrierung dieses Spannungsteilers sehr aufwändig.

[0004] Aus der US 3 886 448 A ist ein Hochspannungsteiler bekannt, der ohne Widerstandskaskade auskommt.

[0005] Aus der US 3 377 555 A ist ein weiterer Hochspannungsteiler bekannt, dessen Widerstandskaskade keinen veränderbaren Kaskadenwiderstand aufweist.

[0006] Der Erfindung liegt die Aufgabe zugrunde, das Kalibrieren von Spannungsteilern zu vereinfachen.

[0007] Die Erfindung löst das Problem durch einen gattungsgemäßen Spannungsteiler, bei dem die Widerstandskaskade (i) eine Mehrzahl an Kaskaden-Widerständen aufweist, wobei zumindest ein Kaskaden-Widerstand veränderbar ist, und (ii) zumindest eine Kontaktierungsvorrichtung aufweist, mittels der die Kaskadenwiderstände in eine Reihenschaltung und in eine Parallelschaltung bringbar sind, wobei die Widerstandskaskade (iii) mit dem Bezugswiderstand zwischen den Eingangsanschluss und im Ausgangsanschluss in Reihe geschaltet ist. Der Spannungsteiler hat einen Hilfsteiler, der (i) einen ersten Hilfsteiler-Eingang, der mit dem Eingangsanschluss schaltbar verbindbar ist, (ii) einen zweiten Hilfsteiler-Eingang, der mit dem Eingangsanschluss schaltbar verbindbar ist, (iii) einen ersten Hilfsteiler-Widerstand, (iv) einen veränderbaren zweiten Hilfsteiler-Widerstand, (v) einen Hilfsteiler-Ausgang, der zwischen dem ersten Hilfsteiler-Widerstand und dem zweiten Hilfsteiler-Widerstand liegt und einen Hilfsteiler-Schalter aufweist, mittels dem wahlweise der erste Hilfsteiler-Eingang oder der zweite Hilfsteiler-Eingang mit dem Eingangsanschluss verbindbar ist. Der Betriebswiderstand und die Kaskaden-Widerstände sind in Reihe geschaltet und der Spannungsteiler hat einen Spannungsmesser-Anschluss, der zwischen der Widerstandskaskade und dem Bezugswiderstand liegt.

[0008] Die Erfindung löst das Problem zudem durch ein Verfahren zum Kalibrieren eines solchen Spannungsteilers mit den Schritten: (i) Schalten der Kaskaden-Widerstände in eine Parallelschaltung, (ii) Verbinden des ersten Hilfsteiler-Eingangs mit dem Eingangsanschluss mittels des Hilfsteiler-Schalters, (iii) Anlegen einer Prüfung-Spannung an den Eingangsanschluss, (iv) Angleichen des zweiten Hilfsteiler-Widerstands an den ersten Hilfsteiler-Widerstand, danach (v) Verändern des zumindest einen veränderbaren Kaskaden-Widerstands, bis eine Differenz-Spannung zwischen dem Hilfsteiler-Ausgang und dem Spannungsmesser-Anschluss unterhalb einer vorgegebenen Schwellenspannung, insbesondere unterhalb von 10 Mikrovolt, liegt, und (vi) Schalten der Kaskaden-Widerstände in eine Reihenschaltung.

[0009] Vorteilhaft an der Erfindung ist, dass die Kalibrierung des Spannungsteilers, insbesondere bei einer hohen Anzahl an Kaskaden-Widerständen, die sich in ihren elektrischen Widerständen kaum voneinander unterscheiden, einfach möglich ist. Insbesondere ist es entbehrlich, jeden einzelnen Kaskaden-Widerstand zu vermessen und daraus den Reihen-Kaskadenwiderstand zu bestimmen, den die Widerstandskaskade hat, wenn die Kaskaden-Widerstände in Reihe geschaltet sind.

[0010] Vorzugsweise weist die Kontaktierungsvorrichtung eine Mehrzahl an Metallstäben auf, mittels denen die Kaskaden-Widerstände in eine Parallelschaltung und alternativ dazu in eine Reihenschaltung gebracht werden können. Die Metallstäbe sind beispielsweise vergoldete Metallstäbe, insbesondere vergoldete Kupferstäbe. Auf diese Weise wird eine Oxidation und damit ein undefinierter Übergangswiderstand vermieden.

[0011] Günstig ist es, wenn die Kaskaden-Widerstände elektrische Widerstandswerte haben, die sich untereinander um höchstens 100 ppm unterscheiden. Je geringer die Schwankung der elektrischen Widerstandswerte untereinander ist, desto genauer lässt sich der Spannungsteiler abgleichen, wie unten gezeigt wird. Insbesondere sind die Kaskaden-Widerstände baugleich, das heißt, dass sie aus den gleichen Materialien auf gleiche Art und Weise hergestellt wurden.

[0012] Beispielsweise handelt es sich bei den Kaskaden-Widerständen um Dünnschichtwiderstände, die durch dünne Metallschichten auf einem Nichtleiter gebildet sind. Die Metallschichten haben eine bekannte Dicke sowie bekannte räumliche Abmaße. Beispielsweise sind die Kaskaden-Widerstände durch Herausätzen aus einer Metallbeschichtung auf einem nicht leitenden Substrat entstanden.

[0013] Vorzugsweise beträgt eine Widerstandsanzahl an Kaskaden-Widerständen zumindest 50, vorzugsweise zumindest 100. Die Widerstandsanzahl ist vorzugsweise kleiner als 10 000, vorzugsweise kleiner als 5000.

[0014] Günstig ist es, wenn der Spannungsteiler eine Temperier Vorrichtung zum Halten der Temperatur des Spannungsteilers innerhalb eines vorgegebenen Temperaturintervalls aufweist. Beispielsweise hat das Temperaturintervall eine Intervallbreite von 0,2 Kelvin. Derartige Temperier Vorrichtungen sind aus dem Stand der Technik bekannt und werden daher nicht weiter beschrieben.

[0015] Erfindungsgemäß ist zudem eine Spannungsteilvorrichtung mit einem erfindungsgemäßen Spannungsteiler und einem Spannungsmesser, der mit dem Spannungsmesser-Anschluss und dem Hilfsteiler-Ausgang verbunden ist. Auf diese Weise kann ein erfindungsgemäßes Verfahren direkt durchgeführt werden.

[0016] Im Rahmen eines erfindungsgemäßen Verfahrens ist die Prüf-Spannung vorzugsweise kleiner als 100 Volt und beträgt vorzugsweise höchstens 30 Volt. Als besonders geeignet haben sich 20 Volt herausgestellt. Die Prüfspannung wird an den Eingangsanschluss angelegt. Hierunter wird verstanden, dass die Spannung zwischen dem Eingangs- und dem Ausgangsanschluss anliegt. Der Ausgangsanschluss wird in der Regel geerdet. Selbstverständlich ist es auch möglich, dass der Eingangsanschluss geerdet und der Ausgangsanschluss ungeerdet ist oder dass keiner der beiden Anschlüsse geerdet ist.

[0017] Vorzugsweise umfasst der Schritt des Angleichens des zweiten Hilfsteiler-Widerstands an den ersten Hilfsteiler-Widerstand die folgenden Schritte: alternierendes Verbinden des Eingangsanschlusses mit dem ersten Hilfsteiler-Eingang und dem zweiten Hilfsteiler-Eingang und Verändern des veränderbaren zweiten Hilfsteiler-Widerstands, bis eine Differenz-Spannung zwischen dem Spannungsmesser-Anschluss und dem Hilfsteiler-Ausgang bis auf eine vorgegebene Toleranzspannung, die beispielsweise höchstens 15 Mikrovolt beträgt, unabhängig davon ist, ob der Eingangs-Anschluss mit dem ersten Hilfsteiler-Eingang oder dem zweiten Hilfsteiler-Eingang verbunden ist. Auf diese Weise ist der zweite elektrische Hilfsteiler-Widerstand in guter Näherung gleich dem ersten elektrischen Hilfsteiler-Widerstand.

[0018] Das alternierende Verbinden des Eingangs-Anschlusses mit dem ersten Hilfsteiler-Eingang und dem zweiten Hilfsteiler-Eingang bewirkt jeweils eine Umkehrung der Stromrichtung des Stroms, der durch den ersten Hilfsteiler-Widerstand und den zweiten Hilfsteiler-Widerstand fließt. Das alternierende Verbinden erfolgt mit dem Hilfsteiler-Schalter. In einer ersten Schalterstellung des Hilfsteiler-Schalters verläuft der Stromfluss vom ersten Hilfsteiler-Widerstand zum zweiten Hilfsteiler-Widerstand. In der zweiten Schalterstellung des Hilfsteiler-Schalters verläuft die Stromrichtung entsprechend vom zweiten Hilfsteiler-Widerstand zum ersten Hilfsteiler-Widerstand. Wenn das Umschalten keine Änderung der Spannung hervor bewirkt, sind die elektrischen Widerstandswerte des ersten Hilfsteiler-Widerstands und des zweiten Hilfsteiler-Widerstands gleich. Der Hilfsteiler hat dann ein Teilungsverhältnis von 2 zu 1.

[0019] Der Spannungsteiler funktioniert grundsätzlich für alle Spannungsbereiche, insbesondere für Spannungen von zumindest 20 kV und theoretisch auch für 5 MV und mehr. Insbesondere ist vorzugsweise der Spannungsteiler zum Anlegen einer Mess-Spannung von zumindest 100 Kilovolt, insbesondere zumindest 300 Kilovolt, ausgebildet.

[0020] Im Folgenden wird die Erfindung anhand der beigefügten Figuren näher erläutert. Dabei zeigt

Fig. 1 ein Schaltbild des erfindungsgemäßen Spannungsteilers und der erfindungsgemäßen Spannungsteilvorrichtung zum Durchführen eines erfindungsgemäßen Verfahrens.

[0021] Fig. 1 zeigt ein Schaltbild eines erfindungsgemäßen Spannungsteilers **10**, der einen Eingangsanschluss **12**, einen Ausgangsanschluss **14**, einen Bezugswiderstand **16** und eine Widerstandskaskade **18** aufweist. Die Widerstandskaskade **18** besitzt eine Mehrzahl an Kaskaden-Widerständen **20.i** ($i = 1, 2, \dots, n$).

[0022] Der Spannungsteiler **10** umfasst zudem eine Kontaktierungsvorrichtung **22**, mittels der die Kaskaden-Widerstände **20.i** entweder in eine Reihenschaltung oder eine Parallelschaltung bringbar sind.

[0023] Der Spannungsteiler **10** besitzt zudem einen Hilfsteiler **24**, der einen ersten Hilfsteiler-Eingang **26**, einen zweiten Hilfsteiler-Eingang **28**, sowie einen Hilfsteiler-Ausgang **30** aufweist. Der Hilfsteiler **24** besitzt zudem einen Hilfsteiler-Schalter **S2**, mittels dem der Eingangs-Anschluss **12** alternierend mit dem ersten Hilfsteiler-Eingang **26** und dem zweiten Hilfsteiler-Eingang **28** verbunden werden kann.

[0024] Mittels eines Zentralschalters **S1** kann der Hilfsteiler **24** vom Eingangs-Anschluss **12** getrennt werden. Der Zentralschalter **S1** wird geöffnet, wenn der Spannungsteiler **10** kalibriert ist und eine Mess-Spannung U_{mess} , die mit hoher Genauigkeit gemessen werden soll, an den Eingangsanschluss **12** angelegt wird. Der Ausgangsanschluss **14** ist in der Regel geerdet.

[0025] Fig. 1 zeigt, dass der Bezugswiderstand **16** und die Widerstandskaskade **18** in Reihe geschaltet sind. Zwischen dem Bezugswiderstand **16** und der Widerstandskaskade **18** ist ein Spannungsmesser-Anschluss **32** vorhanden. Der Spannungsmesser-Anschluss kann beispielsweise eine Buchse sein oder alternativ lediglich durch einen freiliegenden Leiter gebildet sein.

[0026] Fig. 1 zeigt, dass die Kontaktierungsvorrichtung **22** eine Mehrzahl an Metallstäben **34.j** ($j = 1, 2, \dots, n-1$) aufweist, um, wie oben beschrieben, die Kaskaden-Widerstände **20.i** sowohl in eine Parallelschaltung als auch eine Reihenschaltung bringen zu können.

[0027] Schematisch ist eine Temperiervorrichtung **36** eingezeichnet, die beispielsweise eine schematisch eingezeichnete Grundstruktur, auf dem der Spannungsteiler **10** aufgebaut ist, auf einer vorgegebenen Temperatur T_{Soll} hält.

[0028] Der elektrische Widerstand R_L des Bezugswiderstands **16** ist mit hoher Genauigkeit bekannt. Beispielsweise ist der elektrische Widerstand R_L mit einer Messunsicherheit von höchstens 100 ppm bekannt.

[0029] Zunächst werden gemäß in einem Schritt (i) die Kaskaden-Widerstände **20.i** in eine Parallelschaltung gebracht. In der Parallelschaltung der Kaskaden-Widerstände **20.i** gilt für die den Parallel-Kaskadenwiderstand

R_H der Widerstandskaskade **18** $\frac{1}{R_H} = \sum_{i=1}^n \frac{1}{R_{Hi}}$. Danach wird der erste Hilfsteiler-Eingang **26** mittels des Hilfsteiler-Schalters **S2** mit dem Eingangsanschluss **12** verbunden. In einem weiteren Schritt (ii) wird eine Prüf-Spannung $U_{\text{prüf}}$ an den Eingangsanschluss **12** angelegt.

[0030] In einem nachfolgenden Schritt (iii) werden die beiden elektrischen Hilfsteiler-Widerstände R_{W2} und R_{W1} der Hilfsteiler-Widerstände **25.1** und **25.2** dadurch aneinander angeglichen, dass alternierend der erste Hilfsteiler-Eingang und der zweite Hilfsteiler-Eingang **26** bzw. **28** mit dem Eingangsanschluss **12** verbunden werden.

[0031] Ist der erste Hilfsteiler-Eingang **26** mit dem Eingangsanschluss **12** verbunden, so fließt der Strom gemäß der technischen Stromrichtung abhängig vom Vorzeichen der Prüfspannung $U_{\text{prüf}}$ beispielsweise vom ersten Hilfsteiler-Widerstand **25.1** zum zweiten Hilfsteiler-Widerstand **25.2** und von dort zum Ausgangsanschluss. Wird der Hilfsteiler-Schalter **S2** umgeschaltet, so fließt der Strom vom Eingangsanschluss **12** zunächst zum zweiten Hilfsteiler-Widerstand **25.2**, dann zum ersten Hilfsteiler-Widerstand **25.1** und danach zum Ausgangsanschluss **14**. Der zweite Hilfsteiler-Widerstand **25** wird so verändert, dass eine Differenzspannung U_q zwischen dem Hilfsteiler-Ausgang **30** und dem Spannungsmesser-Anschluss **32**, die mit einem Spannungsmesser **33** gemessen wird, unabhängig von der Stellung des Hilfsteiler-Schalters **S2** ist. In diesem Fall sind die elektrischen Hilfsteiler-Widerstände R_{W1} und R_{W2} gleich groß.

[0032] Für den Gesamtwiderstand R_{ges} der Schaltung aus Bezugswiderstand R_L und Widerstandskaskade R_H gilt bei geöffnetem Zentralschalter S_1 :

$$R_{ges} = R_L + R_H = R_L + \frac{1}{\sum_{i=1}^n \frac{1}{R_{Hi}}}$$

[0033] Durch das Angleichen des zweiten elektrischen Hilfsteiler-Widerstands R_{W2} an den ersten elektrischen Hilfsteiler-Widerstand R_{W1} gilt $R_{W1} = R_{W2}$.

[0034] Nun wird in einem Schritt (v) der elektrischer Widerstand $R_{H(i=n)}$ des veränderbaren Kaskaden-Widerstands (**20.n**), im vorliegenden Fall also des Kaskaden-Widerstands **20.9** so verändert, dass $U_q = 0V$ gilt.

[0035] Dann gilt $\frac{R_{W2}}{R_{W1}} = \frac{R_H}{R_L}$ und damit

$$\frac{R_{W2}}{R_{W1}} = 1 = \frac{\left(\sum_{i=1}^n \frac{1}{R_{Hi}}\right)^{-1}}{R_L} = \frac{1}{R_L \left(\sum_{i=1}^n \frac{1}{R_{Hi}}\right)} \Leftrightarrow \frac{1}{R_L} = \sum_{i=1}^n \frac{1}{R_{Hi}}$$

[0036] Da die R_{Hi} sich kaum unterscheiden, kann jeder Widerstand R_{Hi} geschrieben werden als kleine Abweichung von einem Mittelwert $\overline{R_H}$:

$$R_{Hi} = \overline{R_H} \left(1 + \frac{\Delta R_{Hi}}{R_H}\right)$$

[0037] Daraus folgt

$$\begin{aligned} \frac{1}{R_L} &= \sum_{i=1}^n \frac{1}{R_{Hi}} = \sum_{i=1}^n \frac{1}{\overline{R_H} \left(1 + \frac{\Delta R_{Hi}}{R_H}\right)} = \frac{1}{\overline{R_H}} \sum_{i=1}^n \frac{1}{\left(1 + \frac{\Delta R_{Hi}}{R_H}\right)} = \\ &= \frac{1}{\overline{R_H}} \sum_{i=1}^n \left(1 - \frac{\Delta R_{Hi}}{R_H} + 0 \left[\left(\frac{\Delta R_{Hi}}{R_H}\right)^2\right]\right) \end{aligned}$$

$$\frac{1}{R_L} = n \frac{1}{\overline{R_H}} + \underbrace{\frac{1}{\overline{R_H}} \sum_{i=1}^n \frac{\Delta R_{Hi}}{R_H}}_{\text{geht für große } n \text{ gegen null}} + \underbrace{\sum_{i=1}^n 0 \left[\left(\frac{\Delta R_{Hi}}{R_H}\right)^2\right]}_{\text{zu vernachlässigen}}$$

[0038] Wird für die Abweichung eine Normalverteilung angenommen, so strebt der Term $\frac{1}{\overline{R_H}} \sum_{i=1}^n \frac{\Delta R_{Hi}}{R_H}$ für große n gegen null. Dann folgt

$$R_H \approx n R_L$$

[0039] In einem nachfolgenden Schritt (vi) werden die Kaskaden-Widerstände **20.1** in eine Reihenschaltung gebracht. Dazu werden Metallstifte **40.1**, **40.2**, ...**40.10** entfernt, die bislang eine elektrische Verbindung mit zwei Verbindungsleitern **42.1**, **42.2** herstellen, was die Kaskaden-Widerstände **20.1** parallel schaltete.

[0040] Der Gesamtwiderstand nach dem Bringen der Widerstandskaskade in eine Reihenschaltung ist $R_{ges} = R_L + R_H = (1 + n) R_L$.

[0041] Ist die Widerstandskaskade in Parallelschaltung, so gilt:

$$R_{ges} = R_L + R_H = R_L + \frac{1}{n \frac{1}{R_H} + \frac{1}{R_H \sum_{i=1}^n \frac{\Delta R_{Hi}}{R_H}}} =$$

geht für große n gegen null

$$R_L + \frac{1}{n \frac{1}{R_L}} = R_L + \frac{R_H}{n}$$

[0042] Durch das Umwandeln der Widerstandskaskade aus der Parallelschaltung in die Reihenschaltung um den Faktor

$$F = \frac{(1+n)R_L}{R_L + \frac{R_H}{n}} = \frac{1+n}{1 + \frac{R_H}{nR_L}} = (1+n) \left(1 - \frac{R_H}{nR_L} \right) = 1 - \frac{R_H}{nR_L} + n - \frac{R_H}{R_L}$$

[0043] Wenn, was bevorzugt ist, $\overline{R_H} \approx R_L$ gilt,

$$F \approx n - \frac{\overline{R_H}}{nR_L}.$$

Für große n folgt $F \approx n$.

[0044] Nachfolgend wird der Zentralschalter **S1** geöffnet und der Spannungsteiler ist betriebsbereit.

[0045] Die obige Berechnung lässt sich inhaltlich auch über den folgenden Weg herleiten. So ergibt sich für 2 Widerstände

$$\frac{1}{R_{LV} \cdot \varepsilon} = \frac{1}{R + \Delta R_1} + \frac{1}{R + \Delta R_2}$$

$$\frac{1}{R_{LV} \cdot \varepsilon} = \frac{(R + \Delta R_2) + (R + \Delta R_1)}{(R + \Delta R_1) \cdot (R + \Delta R_2)}$$

$$\frac{1}{R_{LV} \cdot \varepsilon} = \frac{2R + \Delta R_1 + \Delta R_2}{R^2 + R \cdot \Delta R_2 + R \cdot \Delta R_1 + \Delta R_1 \cdot \Delta R_2}$$

$$\frac{1}{R_{LV} \cdot \varepsilon} = \frac{2R + \Delta R_1 + \Delta R_2}{R^2 + R \cdot (\Delta R_1 + \Delta R_2) + \Delta R_1 \cdot \Delta R_2}$$

$$\overset{\Delta R_i^2 \ll R}{\Rightarrow} \frac{1}{R_{LV} \cdot \varepsilon} = \frac{2R + \Delta R_1 + \Delta R_2}{R^2 + R \cdot (\Delta R_1 + \Delta R_2)} = \frac{2R}{R^2} \cdot \frac{1 + \frac{1}{2R} \cdot (\Delta R_1 + \Delta R_2)}{1 + \frac{1}{R} \cdot (\Delta R_1 + \Delta R_2)}$$

$$\frac{1}{R_{LV} \cdot \varepsilon} = \frac{2}{R} \cdot \frac{1 + \frac{1}{2R} \cdot (\Delta R_1 + \Delta R_2)}{1 + \frac{1}{R} \cdot (\Delta R_1 + \Delta R_2)}$$

[0046] Darin ist ε die Abweichung vom wahren Wert.

[0047] Für 3 Widerstände ergibt sich:

$$\frac{1}{R_{LV} \cdot \varepsilon} = \frac{1}{R + \Delta R_1} + \frac{1}{R + \Delta R_2} + \frac{1}{R + \Delta R_3}$$

$$\frac{1}{R_{LV} \cdot \varepsilon} = \frac{(R + \Delta R_2) \cdot (R + \Delta R_3) + (R + \Delta R_1) \cdot (R + \Delta R_3) + (R + \Delta R_1) \cdot (R + \Delta R_2)}{(R + \Delta R_1) \cdot (R + \Delta R_2) \cdot (R + \Delta R_3)}$$

$$\frac{1}{R_{LV} \cdot \varepsilon} = \frac{R^2 + R \cdot (\Delta R_2 + \Delta R_3) + \Delta R_2 \cdot \Delta R_3 + R^2 + R \cdot (\Delta R_1 + \Delta R_3) + \Delta R_1 \cdot \Delta R_3 + R^2 + R \cdot (\Delta R_1 + \Delta R_2) + \Delta R_1 \cdot \Delta R_2}{R^3 + R^2 \cdot \Delta R_3 + R^2 \cdot \Delta R_2 + R \cdot \Delta R_2 \cdot \Delta R_3 + R^2 \cdot \Delta R_1 + R \cdot \Delta R_1 \cdot \Delta R_3 + R \cdot \Delta R_1 \cdot \Delta R_2 + \Delta R_1 \cdot \Delta R_2 \cdot \Delta R_3}$$

$$\frac{1}{R_{LV} \cdot \varepsilon} = \frac{3R^2 + 2R \cdot (\Delta R_1 + \Delta R_2 + \Delta R_3) + \Delta R_1 \cdot \Delta R_2 + \Delta R_1 \cdot \Delta R_3 + \Delta R_2 \cdot \Delta R_3}{R^3 + R^2 \cdot (\Delta R_1 + \Delta R_2 + \Delta R_3) + R \cdot (\Delta R_1 \cdot \Delta R_2 + \Delta R_1 \cdot \Delta R_3 + \Delta R_2 \cdot \Delta R_3) + \Delta R_1 \cdot \Delta R_2 \cdot \Delta R_3}$$

$$\stackrel{\Delta R_i^2 \ll R}{\Rightarrow} \frac{1}{R_{LV} \cdot \varepsilon} = \frac{3R^2 + 2R \cdot (\Delta R_1 + \Delta R_2 + \Delta R_3)}{R^3 + R^2 \cdot (\Delta R_1 + \Delta R_2 + \Delta R_3)} = \frac{3R^2}{R^3} \cdot \frac{1 + \frac{2}{3R} \cdot (\Delta R_1 + \Delta R_2 + \Delta R_3)}{1 + \frac{1}{R} \cdot (\Delta R_1 + \Delta R_2 + \Delta R_3)}$$

$$\frac{1}{R_{LV} \cdot \varepsilon} = \frac{3}{R} \cdot \frac{1 + \frac{2}{3R} \cdot (\Delta R_1 + \Delta R_2 + \Delta R_3)}{1 + \frac{1}{R} \cdot (\Delta R_1 + \Delta R_2 + \Delta R_3)}$$

[0048] Für n Widerstände folgt daraus:

$$\begin{aligned} \frac{1}{R_{LV} \cdot \varepsilon} &= \frac{n}{R} \cdot \frac{1 + \frac{n-1}{n \cdot R} \cdot \sum_{i=1}^n \Delta R_i}{1 + \frac{1}{R} \cdot \sum_{i=1}^n \Delta R_i} = \frac{1}{R} \cdot \frac{n + (n-1) \cdot \sum_{i=1}^n \frac{\Delta R_i}{R}}{1 + \sum_{i=1}^n \frac{\Delta R_i}{R}} \Leftrightarrow R_{LV} \\ &= R \cdot \frac{1 + \sum_{i=1}^n \frac{\Delta R_i}{R}}{n + (n-1) \cdot \sum_{i=1}^n \frac{\Delta R_i}{R}} \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
R=n \cdot R_{LV} &\Rightarrow R_{LV} \cdot \varepsilon = n \cdot R_{LV} \cdot \frac{1 + \sum_{i=1}^n \frac{\Delta R_i}{R}}{n + (n-1) \cdot \sum_{i=1}^n \frac{\Delta R_i}{R}} = R_{LV} \cdot \frac{1 + \sum_{i=1}^n \frac{\Delta R_i}{R}}{1 + \left(1 - \frac{1}{n}\right) \cdot \sum_{i=1}^n \frac{\Delta R_i}{R}} \\
\Rightarrow \varepsilon &= \frac{1 + \sum_{i=1}^n \frac{\Delta R_i}{R}}{1 + \left(1 - \frac{1}{n}\right) \cdot \sum_{i=1}^n \frac{\Delta R_i}{R}} = \frac{1 + n \cdot \frac{\overline{\Delta R}}{R}}{1 + \left(1 - \frac{1}{n}\right) \cdot n \cdot \frac{\overline{\Delta R}}{R}} = \frac{1 + n \cdot \frac{\overline{\Delta R}}{R}}{1 + (n-1) \cdot \frac{\overline{\Delta R}}{R}} \\
\varepsilon=1+\delta R_{Soll} &\Rightarrow 1 + \delta R_{Soll} = \frac{1 + n \cdot \frac{\overline{\Delta R}}{R}}{1 + (n-1) \cdot \frac{\overline{\Delta R}}{R}} = \frac{1 + (n-1) \cdot \frac{\overline{\Delta R}}{R} + \frac{\overline{\Delta R}}{R}}{1 + (n-1) \cdot \frac{\overline{\Delta R}}{R}} = 1 + \frac{\frac{\overline{\Delta R}}{R}}{1 + (n-1) \cdot \frac{\overline{\Delta R}}{R}} \\
\Rightarrow \delta R_{Soll} &= \frac{\frac{\overline{\Delta R}}{R}}{1 + (n-1) \cdot \frac{\overline{\Delta R}}{R}}
\end{aligned}$$

mit

$$\frac{\overline{\Delta R}}{R} = \frac{1}{n} \cdot \sum_{i=1}^n \frac{\Delta R_i}{r} \Leftrightarrow \sum_{i=1}^n \frac{\Delta R_i}{r} = n \cdot \frac{\overline{\Delta R}}{R}.$$

[0049] Es ist zu erkennen, dass unter der Voraussetzung $\Delta R_i^2 \ll R$ Anteile höherer Potenzen von R_i verschwinden. Die Formel lässt sich soweit vereinfachen, dass für die Abweichung vom Sollwert nur die Anzahl der Widerstände und der Mittelwert der Abweichungen benötigt werden.

Bezugszeichenliste

10	Spannungsteiler
12	Eingangsanschluss
14	Ausgangsanschluss
16	Bezugswiderstand
18	Widerstandskaskade
20	Kaskaden-Widerstand
22	Kontaktierungsvorrichtung
24	Hilfsteiler
25	Hilfsteiler-Widerstand
26	erster Hilfsteiler-Eingang
28	zweiter Hilfsteiler-Eingang
30	Hilfsteiler-Ausgang
32	Spannungsmesser-Anschluss
33	Differenzspannungsmesser
34	Metallstab
36	Temperiervorrichtung
38	Substrat
40	Metallstab
ε	Abweichung vom wahren Wert

n	Zahl der Kaskaden-Widerstände
R_H	Parallel-Kaskadenwiderstände
S2	Hilfsteiler-Schalter
S1	Zentralschalter
T_{soll}	Temperatur
U_{mess}	Mess-Spannung
U_{prüf}	Prüf-Spannung
U_q	Differenz-Spannung

Patentansprüche

1. Spannungsteiler mit
 - (a) einem Eingangsanschluss (12),
 - (b) einem Ausgangsanschluss (14),
 - (c) einem Bezugswiderstand (16) und
 - (d) einer Widerstandskaskade (18),**dadurch gekennzeichnet**, dass
 - (e) die Widerstandskaskade (18)
 - (i) eine Mehrzahl an Kaskaden-Widerständen (20.i) aufweist, wobei zumindest ein Kaskaden-Widerstand (20.9) veränderbar ist, und
 - (ii) zumindest eine Kontaktierungsvorrichtung (22) aufweist, mittels der die Kaskaden-Widerstände (R_{Hi}) in eine Reihenschaltung und in eine Parallelschaltung bringbar sind, und die
 - (iii) mit dem Bezugswiderstand (16) zwischen dem Eingangsanschluss (12) und dem Ausgangsanschluss (14) in Reihe geschaltet ist, und dass
 - (f) der Spannungsteiler (10) einen Hilfsteiler (24) hat, der
 - (i) einen ersten Hilfsteiler-Eingang (26), der mit dem Eingangsanschluss (12) schaltbar verbindbar ist,
 - (ii) einen zweiten Hilfsteiler-Eingang (28), der mit dem Eingangsanschluss (12) schaltbar verbindbar ist,
 - (iii) einen ersten Hilfsteiler-Widerstand (25.1),
 - (iv) einen veränderbaren zweiten Hilfsteiler-Widerstand (25.2),
 - (v) einen Hilfsteiler-Ausgang (30), der zwischen dem ersten Hilfsteiler-Widerstand (25.1) und dem zweiten Hilfsteiler-Widerstand (25.2) liegt und
 - (vi) einen Hilfsteiler-Schalter (S2) aufweist, mittels dem der Eingangsanschluss (12) alternierend mit dem ersten Hilfsleiter-eingang (26) und dem zweiten Hilfsleiter-Eingang (28) verbindbar ist,
 - (g) der Bezugswiderstand (16) und die Widerstandskaskade (18) in Reihe geschaltet sind, und dass
 - (h) der Spannungsteiler (10) einen Spannungsmesser-Anschluss (32) hat, der zwischen der Widerstandskaskade (18) und dem Bezugswiderstand (16) liegt.
2. Spannungsteiler nach Anspruch 1, **dadurch gekennzeichnet**, dass die Kontaktierungsvorrichtung (22) eine Mehrzahl an Metallstäben (34) umfasst.
3. Spannungsteiler nach einem der vorstehenden Ansprüche, **dadurch gekennzeichnet**, dass die Kaskaden-Widerstände (20) elektrische Widerstandswerte (R_{Hi}) haben, die sich untereinander um höchstens 100 ppm unterscheiden.
4. Spannungsteiler nach einem der vorstehenden Ansprüche, **dadurch gekennzeichnet**, dass eine Widerstandsanzahl (n) an Kaskaden-Widerständen (20) zumindest 50 beträgt und/oder höchstens 1 000 000 beträgt.
5. Spannungsteiler nach einem der vorstehenden Ansprüche, **gekennzeichnet durch** eine Temperier Vorrichtung (36) zum Halten der Temperatur (T_{soll}) des Spannungsteilers (10) innerhalb eines vorgegebenen Temperaturintervalls.
6. Spannungsteilvorrichtung mit
 - (a) einem Spannungsteiler (10) nach einem der vorstehenden Ansprüche und
 - (b) einem Spannungsmesser, der mit dem Spannungsmesser-Anschluss (32) und dem Hilfsteiler-Ausgang(30) verbunden ist.

7. Verfahren zum Kalibrieren einer Spannungsteilvorrichtung nach Anspruch 6, **gekennzeichnet durch** die Schritte:

- (i) Schalten der Kaskaden-Widerstände (20.i) in eine Parallelschaltung,
- (ii) Verbinden des ersten Hilfsteiler-Eingangs (26) mit dem Eingangsanschluss (12),
- (iii) Anlegen einer Prüf-Spannung ($U_{\text{prüf}}$) an den Eingangsanschluss (12),
- (iv) Angleichen des zweiten elektrischen Hilfsteiler-Widerstands (25.2) an den ersten Hilfsteiler-Widerstand (25.1), danach
- (v) Verändern des zumindest einen veränderbaren Kaskaden-Widerstands (20.9), bis eine Differenz-Spannung (U_q) zwischen dem Hilfsteiler-Ausgang (30) und dem Spannungsmesser-Anschluss (32) unterhalb einer vorgegebenen Schwellenspannung, insbesondere unterhalb von 10 Mikrovolt, liegt, und
- (vi) Schalten der Kaskaden-Widerstände (20.i) in eine Reihenschaltung.

8. Verfahren nach Anspruch 7, **dadurch gekennzeichnet**, dass der Schritt (iv) des Angleichens des zweiten Hilfsteiler-Widerstands (25.2) an den ersten Hilfsteiler-Widerstand (25.1) die folgenden Schritte umfasst:

- alternierendes Verbinden des Eingangsanschlusses (12) mit dem ersten Hilfsteiler-Eingang (26) und dem zweiten Hilfsteiler-Eingang (28) und
- Verändern des veränderbaren zweiten Hilfsteiler-Widerstands (25.2), bis eine Differenz-Spannung (U_q) zwischen dem Spannungsmesser-Anschluss (32) und dem Hilfsteiler-Ausgang (30) bis auf eine vorgegebene Toleranz unabhängig davon ist, ob der Eingangsanschluss (12) mit dem ersten Hilfsteiler-Eingang (26) oder dem zweiten Hilfsteiler-Eingang (28) verbunden ist (sodass der zweite Hilfsteiler-Widerstand (25.2) in guter Näherung dem ersten Hilfsteiler-Widerstand (25.1) entspricht).

9. Verfahren nach Anspruch 7 oder 8, **gekennzeichnet durch** die Schritte

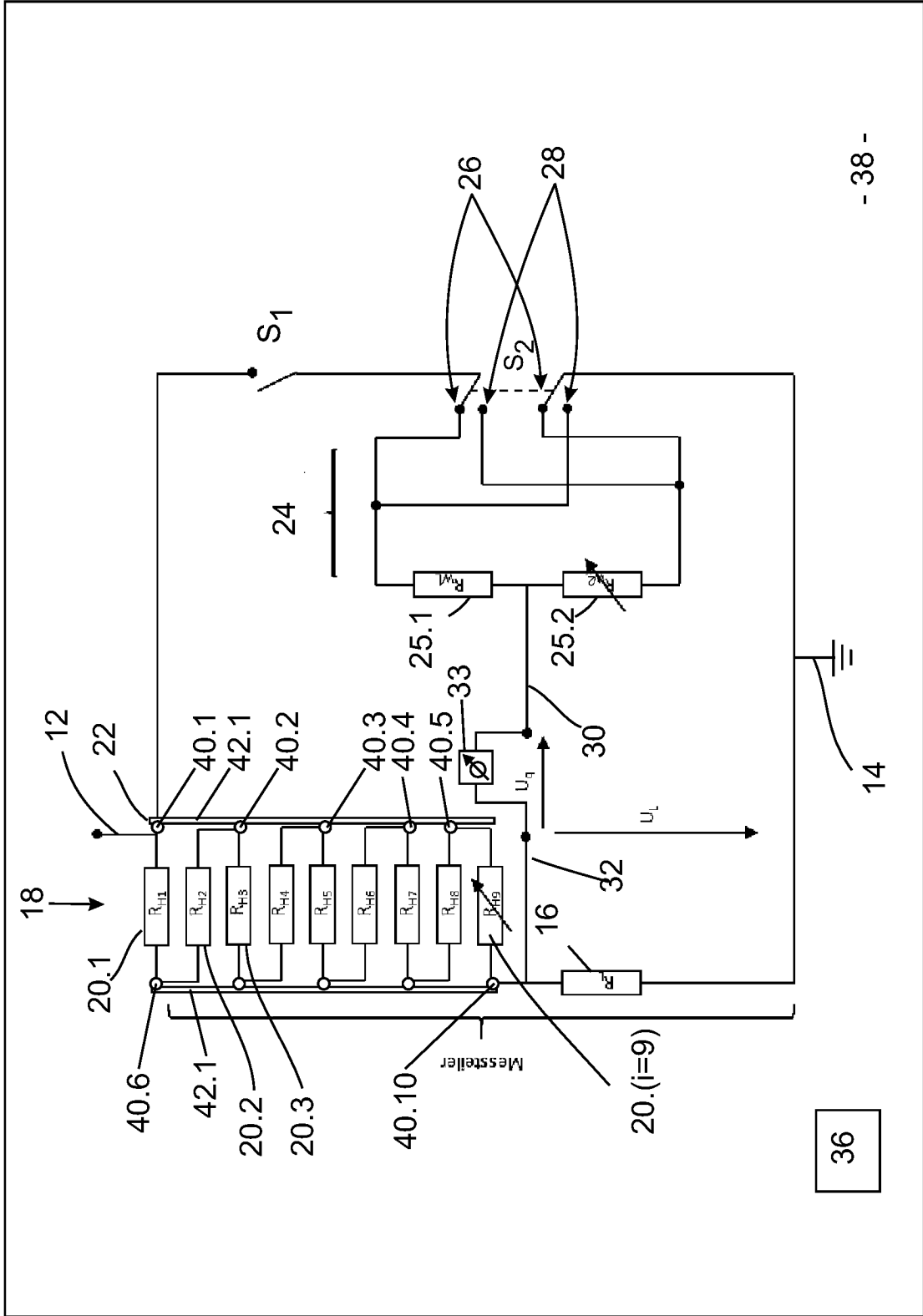
- Anlegen einer zu messenden Mess-Spannung (U_{mess}) an den Eingang,
- Messen einer Teil-Spannung, die über dem Bezugswiderstand (16) abfällt, und
- Bestimmen der Mess-Spannung (U_{mess}) aus der Teil-Spannung.

10. Verfahren nach einem der Ansprüche 7 bis 9, **dadurch gekennzeichnet**, dass die Prüf-Spannung ($U_{\text{prüf}}$) höchstens 100 Volt beträgt und dass die Mess-Spannung (U_{mess}) zumindest 100 kV beträgt.

Es folgt eine Seite Zeichnungen

Anhängende Zeichnungen

10



- 38 -

Fig. 1