



(19)  
Bundesrepublik Deutschland  
Deutsches Patent- und Markenamt

(10) **DE 699 26 587 T2** 2006.06.01

(12) **Übersetzung der europäischen Patentschrift**

(97) **EP 0 994 360 B1**

(51) Int Cl.<sup>8</sup>: **G01R 31/3183** (2006.01)

(21) Deutsches Aktenzeichen: **699 26 587.8**

(96) Europäisches Aktenzeichen: **99 118 411.0**

(96) Europäischer Anmeldetag: **16.09.1999**

(97) Erstveröffentlichung durch das EPA: **19.04.2000**

(97) Veröffentlichungstag

der Patenterteilung beim EPA: **10.08.2005**

(47) Veröffentlichungstag im Patentblatt: **01.06.2006**

(30) Unionspriorität:

**169421                      09.10.1998                      US**

(84) Benannte Vertragsstaaten:

**DE, FR, GB**

(73) Patentinhaber:

**Agilent Technologies, Inc. (n.d.Ges.d.Staates  
Delaware), Palo Alto, Calif., US**

(72) Erfinder:

**Ahrikencheikh, Cherif, Loveland, US; Browen,  
Rodney A., Loveland, US; Darbie, William P.,  
Longmont, US; McDermid, John E., Loveland, US;  
Lannen, Kay C., Fort Collins, US**

(74) Vertreter:

**Schoppe, Zimmermann, Stöckeler & Zinkler, 82049  
Pullach**

(54) Bezeichnung: **Verfahren und Vorrichtung zur Auswahl von Prüfpunkten in einer Schaltung mit beschränkter Zugänglichkeit**

Anmerkung: Innerhalb von neun Monaten nach der Bekanntmachung des Hinweises auf die Erteilung des europäischen Patents kann jedermann beim Europäischen Patentamt gegen das erteilte europäische Patent Einspruch einlegen. Der Einspruch ist schriftlich einzureichen und zu begründen. Er gilt erst als eingelegt, wenn die Einspruchsgebühr entrichtet worden ist (Art. 99 (1) Europäisches Patentübereinkommen).

Die Übersetzung ist gemäß Artikel II § 3 Abs. 1 IntPatÜG 1991 vom Patentinhaber eingereicht worden. Sie wurde vom Deutschen Patent- und Markenamt inhaltlich nicht geprüft.

**Beschreibung**

## Gebiet der Erfindung

**[0001]** Diese Erfindung bezieht sich allgemein auf ein Schaltungsplatinentesten. Insbesondere bezieht sich diese Erfindung auf die Identifikation von Herstellungsdefekten und fehlerhaften Komponenten auf einer Schaltungsplatine.

## Hintergrund der Erfindung

**[0002]** Im Allgemeinen besteht eine Schaltungsplatine auf zahlreichen verbundenen Komponenten, wie z.B. Halbleiterchips, Widerständen, Kondensatoren, Induktoren etc. Nachdem Schaltungsplatinen angeordnet wurden, aber bevor sie verwendet oder in angeordnete Produkte platziert werden können, müssen sie getestet werden. Das Testen verifiziert, dass die ordnungsgemäßen Komponenten verwendet wurden, dass jede Komponente innerhalb von Testgrenzen arbeitet, dass alle erforderlichen elektrischen Verbindungen ordnungsgemäß geschlossen wurden, und dass alle notwendigen elektrischen Komponenten an die Platine an der richtigen Position und mit der richtigen Ausrichtung angebracht wurden. Wenn eine Komponente nicht innerhalb der Testgrenzen arbeitet, wird sie als fehlerhaft bezeichnet.

**[0003]** Eine übliche Weise zum Testen von angeordneten gedruckten Schaltungsplatinen wird schaltungsintegriertes Testen genannt. Ein schaltungsintegriertes Testen umfasst das Sondieren individueller Platinenkomponenten durch ein sogenanntes „Nagelbett“ und das Verifizieren ihrer Existenz und Spezifikationen unabhängig von der umliegenden Schaltungsanordnung. Eine bekannte Reihe von Schaltungsplatinen-Testmaschinen für ein schaltungsintegriertes Testen ist die Modellfamilie HP-3070 der Hewlett-Packard Company aus Schaltungsplatinentestern. Die HP-3070-Familie aus Platinentestern wird vollständig beschrieben in dem HP-3070-Familie-Betriebs- und Wartungs-Handbuch, erhältlich von der Hewlett-Packard Company. Andere Familien von Schaltungsplatinen-Testmaschinen hergestellt von Hewlett-Packard sind die Reihen HP-3060 und HP-3065.

**[0004]** Um individuelle Platinenkomponenten zu testen, erfordert das schaltungsintegrierte Testen einen Zugriff auf jeden Knoten auf der Schaltungsplatine. Mit Durchgangsloch-Teilen ist ein Zugriff direkt verfügbar an Komponenten-Anschlussleitungen. Bei Oberflächenbefestigungs-Teilen wird ein Zugriff durch Durchkontaktierungen und Testanschlussflächen geschaffen, die auf der Schaltungsplatine platziert sind, wenn sie entworfen ist. Erhöhungen bei der Platinendichte haben jedoch zu einer Verringerung der Größe der Durchkontaktierungen geführt, was die Fähigkeit der Sondentechnik verringert hat, ein kleineres Ziel zu kontaktieren. Durchkontaktierungen sind jetzt oft hundert Mal kleiner in ihrem Bereich als Durchkontaktierungen, die nur vor wenigen Jahren verwendet wurden. Ferner benötigen Testanschlussflächen, die groß genug sind, um erfolgreich sondiert zu werden, einen wesentlichen Betrag an Platinenbereich, der anderweitig verwendet werden würde, um Komponenten zu platzieren und zu verbinden. Daher ist es auf vielen Schaltungsplatinen nicht mehr praktikabel oder wünschenswert, jeden Knoten auf der Platine zu sondieren.

**[0005]** HUANG J-L, Cheng K-T, „Analog Fault Diagnosis for Unpowered Circuit Boards“, Proceedings of the International Test Conference, 1-6 Nov. 1997, Seiten 640-648, offenbart ein Verfahren zur analogen Fehlerdiagnose für nicht mit Leistung versorgte Schaltungsplatinen. Das Verfahren besteht aus einer Testpunkt- und Stimuli-Auswahl für eine Diagnostiktesterzeugung, wobei die Auswahl von Testpunkten auf folgende Weise durchgeführt wird: (1) Finden der feinsten Zerlegung  $D$  aus dem Schaltungsgraphen, (2) Finden eines minimal zugreifbaren Satzes  $T$ , derart, dass eine Ein-Knoten-Fehlerdiagnostizierbarkeit erfüllt wird, (3) Berechnen der entsprechenden  $T_F$ -Äquivalenzklassen-Zerlegung  $D_T$ , (4) Vergleichen von  $D_T$  und  $D$ , um zu prüfen, ob  $D_T$  so fein ist wie  $D$ , (5) Stoppen des Algorithmus, wenn der vorangehende Zustand erfüllt wird, ansonsten, (6) Star-ten der Stufe des „Verfeinerns nichtwesentlicher Äquivalenzklassen“.

**[0006]** Dementsprechend besteht ein Bedarf in der Technik nach einer Test-Technik und einer -Vorrichtung, die individuelle Schaltungsplatinenkomponenten mit Toleranzen testen können, ohne einen Zugriff auf jeden Knoten auf der Schaltungsplatine zu benötigen. Eine solche Technik sollte so verallgemeinert werden, dass sie mit vielen unterschiedlichen Schaltungen und Toleranzbereichen verwendet werden kann. Ferner ist es wünschenswert, dass ein solches System auf einer existierenden schaltungsintegrierten Testhardware implementiert wird, um bestehende Kapital- und Verfahrens-Investitionen im Hinblick auf diese Hardware zu bewahren.

## Zusammenfassung der Erfindung

**[0007]** Bei einem bevorzugten Ausführungsbeispiel wählt die Erfindung zugreifbare Knoten aus einer größeren Gruppe von zugreifbaren Knoten als Testpunkte aus, um eine ausgewählte Gruppe von Komponenten zu testen, die zumindest einen nicht-zugreifbaren Knoten enthalten. Durch Auswählen eines Teilsatzes der größeren Gruppe von zugreifbaren Knoten wird die Komplexität des Testproblems reduziert. Ferner wird die Anzahl von Messungen und die notwendige Zeit zum Testen der ausgewählten Gruppe aus Komponenten reduziert. Die Erfindung ist allgemein an alle Arten von Schaltungen anwendbar und kann unter Verwendung einer existierenden Computer- und Tester-Hardware implementiert werden.

**[0008]** Nachdem die Komponenten zum Testen ausgewählt sind, werden sie in Äquivalenzklassen angeordnet unter Verwendung aller verfügbaren zugreifbaren Knoten. Zugreifbare Knoten, die nicht direkt mit den Komponenten verbunden sind, die getestet werden, werden einer nach dem anderen als zugreifbare Knoten entfernt, um zu sehen, ob sich die Äquivalenzklassen ändern. Wenn sich die Äquivalenzklassen ändern, wird der Knoten wieder als ein zugreifbarer Knoten hergestellt, da er als ein Testpunkt für die ausgewählte Gruppe von Komponenten notwendig ist. Wenn sich die Äquivalenzklassen nicht ändern, dann ist der Knoten als ein Testpunkt für die ausgewählte Gruppe von Komponenten nicht notwendig. Dieser Prozess beseitigt unnötige Knoten als Testpunkte, so dass die verbleibenden Knoten die Testpunkte für die ausgewählten Gruppen von Komponenten sind.

**[0009]** Andere Aspekte und Vorteile der vorliegenden Erfindung werden aus der nachfolgenden detaillierten Beschreibung in Verbindung mit den beiliegenden Zeichnungen offensichtlich, die beispielhaft die Prinzipien der Erfindung darstellen.

## Kurze Beschreibung der Zeichnungen

**[0010]** [Fig. 1](#) ist ein Blockdiagramm, das die Hauptkomponenten darstellt, die bei dem Beschränkter-Zugriff-Testen beteiligt sind, das einem Ausführungsbeispiel der vorliegenden Erfindung entspricht.

**[0011]** [Fig. 2](#) ist ein Flussdiagramm, das im Allgemeinen die Hauptschritte darstellt, die durch den Testprogrammgenerator unternommen werden, gemäß einem Ausführungsbeispiel der vorliegenden Erfindung.

**[0012]** [Fig. 3](#) ist ein schematisches Diagramm, das eine Schaltung darstellt, die durch eine vereinfachte Darstellung modelliert werden kann, das einem Ausführungsbeispiel der vorliegenden Erfindung entspricht.

**[0013]** [Fig. 4](#) ist ein schematisches Diagramm einer Schaltung, die verwendet wird, um beim Darstellen eines bevorzugten Ausführungsbeispiels zu helfen, das einem Ausführungsbeispiel der vorliegenden Erfindung entspricht.

**[0014]** [Fig. 5](#) ist eine Skizze der Spannungsänderung, wenn eine einzelne Komponente bei der Schaltung aus [Fig. 3](#) durch einen Wertebereich gewobbelt wird, der einem Ausführungsbeispiel der vorliegenden Erfindung entspricht.

**[0015]** [Fig. 6](#) ist ein Flussdiagramm, das die Schritte zum Optimieren der Zielfunktion darstellt, die verwendet wird, um Testgrenzen zu finden, die einem Ausführungsbeispiel der vorliegenden Erfindung entsprechen.

**[0016]** [Fig. 7](#) ist ein schematisches Diagramm eines Beispiels eines reduzierten Clusters gemäß einem Ausführungsbeispiel der vorliegenden Erfindung.

**[0017]** [Fig. 8](#) und [Fig. 9](#) sind schematische Diagramme des reduzierten Clusters aus [Fig. 7](#), die einen Stimulus an unterschiedlichen Positionen gemäß einem Ausführungsbeispiel der vorliegenden Erfindung zeigen.

**[0018]** [Fig. 10](#) ist ein Flussdiagramm, das einen Prozess zum Erzeugen eines Gütefaktors für verschiedene Stimuli gemäß einem Ausführungsbeispiel der vorliegenden Erfindung darstellt.

**[0019]** [Fig. 11A](#) ist ein Diagramm, das die nicht idealen Eigenschaften der Mess- und Stimulus-Hardware gemäß einem Ausführungsbeispiel der vorliegenden Erfindung darstellt.

**[0020]** [Fig. 11B](#) ist ein Diagramm, das die nicht idealen Eigenschaften der Mess- und Stimulus-Hardware darstellt, bei der der Stimulus durch sein Thevenin-Äquivalent gemäß einem Ausführungsbeispiel der vorliegenden

den Erfindung ersetzt wird.

**[0021]** [Fig. 12](#) ist ein Flussdiagramm, das einen Prozess zum Erzeugen von Clustern aus einer Platinentopologie gemäß einem Ausführungsbeispiel der vorliegenden Erfindung darstellt.

**[0022]** [Fig. 13](#) ist ein Flussdiagramm, das den Prozess zum Erzeugen von reduzierten Clustern aus einem Cluster gemäß einem Ausführungsbeispiel der vorliegenden Erfindung darstellt.

**[0023]** [Fig. 14](#) ist ein Flussdiagramm, das die Schritte darstellt, die unternommen werden, um ein Knoten-Ab-schneiden für ein reduziertes Cluster gemäß einem Ausführungsbeispiel der vorliegenden Erfindung auszuführen.

**[0024]** [Fig. 15](#) ist ein Flussdiagramm, das einen Prozess darstellt, der nicht ideale Eigenschaften der Mess- und Stimulus-Hardware gemäß einem Ausführungsbeispiel der vorliegenden Erfindung korrigiert.

**[0025]** [Fig. 16](#) ist ein Diagramm, das einen Topologie-Graphen gemäß einem Ausführungsbeispiel der vorliegenden Erfindung darstellt.

#### Detaillierte Beschreibung der bevorzugten Ausführungsbeispiele

**[0026]** Bezug nehmend auf [Fig. 1](#) wird eine Datenbank **102**, die auf einer Speichervorrichtung gekoppelt mit einem Computer gespeichert sein kann, verwendet, um ein Modell der zu testenden Schaltung zu einem Testprogrammgenerator **104** zuzuführen. Das Modell enthält die notwendigen Informationen zum Testen der Platine, einschließlich Komponententypen, Komponentenverbindungen, Komponentenwerte, Komponententoleranzen und eine Anzeige, welche Knoten zugreifbar sind. Der Testprogrammgenerator erzeugt ein Testprogramm, das die Operation der Messhardware **106** steuert, während es einen Stimulus an die Testschaltung **110** anwendet und Messungen an derselben durchführt. Die Ergebnisse dieser Messungen und Informationen, die durch den Testprogrammgenerator **104** geliefert werden, werden durch eine Fehleranalyseroutine **108** verwendet, um Erfolg/Fehlschlag und Diagnose-Information an der getesteten Schaltung zu erzeugen. Der Testprogrammgenerator und die Fehleranalyseroutine können Programme oder Routinen sein, die auf einem Computer ausgeführt werden.

**[0027]** Der Testprogrammgenerator **104** oder die Fehleranalyseroutine **108** können in einem Speicher auf einem Computer gespeichert sein, auf einer Platte gespeichert sein oder einem anderen computerlesbaren Medium. Sie können Teil eines einzelnen Stückes eines ausführbaren Codes sein, oder sie können separate Programme oder Routinen sein. Ferner können sie auf demselben Computer ausgeführt werden oder sie können auf unterschiedlichen Hardwareteilen betrieben werden. Die Hardware, die das Testsystem implementiert, das in [Fig. 1](#) gezeigt ist, kann eine Allzweck-Rechenvorrichtung sein, die mit der Messhardware gekoppelt ist und einen ausführbaren Code ausführt, oder sie kann kundenspezifische Hardware umfassen, wie z.B. eine anwendungsspezifische integrierte Schaltung, die eine oder mehrere der gezeigten Funktionen integriert.

**[0028]** [Fig. 2](#) zeigt die Hauptschritte, die durch den Testprogrammgenerator **108** unternommen werden, gemäß einem Ausführungsbeispiel der vorliegenden Erfindung. Bei einem Schritt **202** liest der Testprogrammgenerator das Schaltungsmodell und jegliche andere Eingabedaten, die notwendig sind, wie z.B. welche Knoten zugreifbar sind und die Komponententoleranzen. Bei einem Schritt **204** werden lose und kurzgeschlossene Komponenten aus dem Modell entfernt. Lose Komponenten sind jene, die nicht getestet werden können, da kein Weg zwischen jeglichen der zugreifbaren Knoten vorliegt, der durch diese Komponente verläuft. Bei einem Schritt **206** wird das Schaltungsmodell in Gruppen von Komponenten unterteilt, die elektrisch isoliert sind. Diese Gruppen von Komponenten werden „Cluster“ genannt. Ein Cluster ist als eine Gruppe von Komponenten definiert, die zu Testzwecken mit dem Rest der Schaltungsanordnung durch Null oder einen Knoten verbunden ist. Bei einem Schritt **208** wird jedes Cluster weiter in reduzierte Cluster unterteilt, und die Knoten, die zum Testen jedes reduzierten Clusters benötigt werden, werden abgeschnitten. Ein reduziertes Cluster ist eine Gruppe aus anvisierten Komponenten, die die Größe und Komplexität der Testserzeugungs-, Messungs- und Fehleranalyse-Probleme in aufeinanderfolgenden Stufen des Testprozesses reduziert. Der Prozess des Erzeugens „reduzierter“ oder „direkter“ Cluster und das Auswählen der „Testpunkte“ für jedes reduzierte Cluster wird detaillierter in einem anderen Teil dieses Dokuments beschrieben.

**[0029]** Bei einem Schritt **210** werden Stimulus- und Mess-Knoten ausgewählt, um jede Komponente in jedem reduzierten Cluster zu testen. Einige Stimulus- und Mess-Knoten können ausgewählt sein, um mehr als eine Komponente zu testen. Der Stimulus und die Messungen können für Test-Durchsatz, Test-Abdeckung oder ei-

nen Kompromiss zwischen den beiden optimiert sein.

**[0030]** Bei einem Schritt **212** werden für jeden Stimulus entsprechende Mess-Knoten und eine gewünschte Anzahl von gleichzeitigen Fehlern, die getestet werden sollen, zumindest eine Äquivalenzklasse, U\*-Matrix, und ein Satz von Testgrenzen, erzeugt. Die Ausdrücke Äquivalenzklasse, U\*-Matrix etc. werden nachfolgend detaillierter erörtert. Vorerst ist es ausreichend zu sagen, dass diese Ausdrücke die Informationen darstellen, die später durch die Fehleranalyseroutine verwendet werden, um Erfolg/Fehlschlag- und Diagnose-Informationen zu liefern.

**[0031]** Bei einem bevorzugten Ausführungsbeispiel arbeitet der Prozess zum Erzeugen der Äquivalenzklassen, U\*-Matrizen, und Testgrenzen für jeden Stimulus und entsprechende Mess-Knoten auf einem reduzierten Cluster. Dieser Prozess kann jedoch an viel größere Gruppen von Komponenten angewendet werden, einschließlich an die gesamte Platine.

**[0032]** Wie bei vielen Testmethoden muss zuerst ein Modell der Testschaltung aufgebaut werden. Dies kann die gesamte Platine sein oder eine kleinere Anzahl von Komponenten, wie z.B. ein Cluster. Auf ähnliche Weise kann es mehr als einen Stimulus und jegliche Anzahl von Mess-Knoten umfassen. Der Einfachheit und der rechenstechnischen Effizienz halber verwendet ein bevorzugtes Ausführungsbeispiel jedoch ein Testschaltungsmodell, das die Komponenten von nur einem reduzierten Cluster und den Stimulus, der durch den Test angewendet wird, umfasst.

**[0033]** Das Testschaltungsmodell enthält Informationen über den Tester-Stimulus, die Komponenten und ihre Verbindung, so dass die Test-Methode ausreichend Informationen aufweist, um festzustellen, wenn eine Komponente fehlerhaft ist. Viele mögliche Schaltungsmodelle und Formulierungen existieren. Viele dieser Modelle und Formulierungen sind beschrieben in Computer Methods for Circuit Analysis and Design von Jiri Vlach und Kishore Singhal, Van Nostrand Reinhold Publishing, New York, New York, 1983 und Computer-Aided Analysis of Electronic Circuits, Algorithms and Computational Techniques von Leon O. Chua und Pen-Min Lin, Prentice-Hall, Englewood Cliffs, New Jersey, 1975.

**[0034]** Bei einem bevorzugten Ausführungsbeispiel wird ein vereinfachtes Darstellungs-Modell verwendet. Das vereinfachte Darstellungs-Modell ist gegeben durch Gleichung 1.

$$\begin{bmatrix} K_i & -K_v A^T \\ A & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} I_b \\ V_n \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} S \\ 0 \end{bmatrix} \quad \text{Gl. 1}$$

**[0035]** Wobei  $I_b$  ein Spaltenvektor ist, der die Verzweigungsströme darstellt,  $V_n$  ein Spaltenvektor ist, der die Knotenspannungen darstellt,  $A$  die reduzierte Einfallsmatrix ist,  $A^T$  die Transpositionierung der reduzierten Einfallsmatrix ist,  $K_i$  und  $K_v$  Matrizen sind, hergeleitet aus den Verzweigungs-Zustandsgleichungen, und  $S$  der Quellvektor ist, der den Wert der unabhängigen Quellen enthält. Üblicherweise sind die unabhängigen Quellen ein Ergebnis des Stimulus, der durch die Testerhardware angewendet wird. Zum Zweck dieser Erörterung ist  $n$  (nicht tiefgestellt) ausgewählt, um die Anzahl von Knoten in der Platine darzustellen und  $b$  (nicht tiefgestellt) ist ausgewählt, um die Anzahl von Verzweigungen darzustellen.

**[0036]** Die Regeln zum Erzeugen von  $K_i$  und  $K_v$  sind einfach und umfassen allgemein das Einstellen jedes Elements der  $K_i$ - und  $K_v$ -Matrizen gemäß einer Tabelle, die sich auf den Typ des Schaltungselements (d.h. Impedanz, Admittanz, Stromquelle, stromgesteuerte Spannungsquelle etc.) und seines Werts für die entsprechende Einträge in  $K_i$  und  $K_v$  bezieht.

**[0037]** Um darzustellen, wie  $K_i$  und  $K_v$  aufgebaut sein können, wird [Fig. 3](#) untersucht. [Fig. 3](#) zeigt eine einfache Schaltung mit  $n = 3$  Knoten und  $b = 4$  Verzweigungen gemäß einem Ausführungsbeispiel der vorliegenden Erfindung. Diese Schaltung kann die gesamte Platine, ein Cluster oder nur die Komponente eines reduzierten Clusters mit dem vom Tester angelegten Stimulus sein.  $I_b$  weist vier Ströme auf,  $I_1$ – $I_4$  und  $V_n$  weist zwei Knotenspannungen auf ( $V_{n1}$  und  $V_{n2}$ ). Es wird darauf hingewiesen, dass  $n - 1$  Knotenspannungen bei dem  $V_n$ -Vektor anstelle von  $n$  Knotenspannungen vorliegen, da die Knotenspannungen relativ zu einem Referenzknoten sind. Der Referenzknoten (üblicherweise Masse) ist häufig der Zahl 0 zugeordnet. Die Knotenspannung des Referenzknoten, in [Fig. 3](#)  $V_{n0}$ , ist laut Definition Null und muss somit nicht als eine der Knotenspannungen integriert werden.

**[0038]**  $K_i$ , auch bekannt als die Impedanzmatrix, für das Netzwerk aus [Fig. 3](#) kann folgendes sein:

$$K_i = \begin{bmatrix} 1 & & & \\ & R_2 & & \\ & & 1 & \\ & & & 1 \end{bmatrix} \quad \text{Gl. 2}$$

$K_v$ , auch bekannt als die Admittanz-Matrix, ist für das Netzwerk aus [Fig. 3](#) und  $K_i$  aus Gleichung 2:

$$K_v = \begin{bmatrix} 0 & & & \\ & 1 & & \\ & & sC_3 & \\ & & & G_4 \end{bmatrix} \quad \text{Gl. 3}$$

wobei  $s$  die Laplace-Transformationsvariable ist. Es wird darauf hingewiesen, dass durch Eingeben der Kapazität in Admittanzform beim Erzeugen von  $K_i$  und  $K_v$  die  $s$ -Variable im Zähler gehalten wird. Um die Mathematik zu vereinfachen, wenn nur passive Komponenten vorhanden sind, können  $K_i$  und  $K_v$  derart aufgebaut sein, dass  $K_i$  die Identitätsmatrix ist. Dies ist wie folgt in den Gleichungen 4 und 5 gezeigt:

$$K_i = \begin{bmatrix} 1 & & & \\ & 1 & & \\ & & 1 & \\ & & & 1 \end{bmatrix} \quad \text{Gl. 4}$$

$$K_v = \begin{bmatrix} 0 & & & \\ & 1/R_2 & & \\ & & sC_3 & \\ & & & G_4 \end{bmatrix} \quad \text{Gl. 5}$$

**[0039]** Abschließend ist die Einfallsmatrix  $A$ , die die Verbindung der Komponenten für [Fig. 3](#) definiert, folgendes:

$$A = \begin{bmatrix} -1 & 1 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & -1 & 1 \end{bmatrix} \quad \text{Gl. 6}$$

**[0040]** Es wird darauf hingewiesen, dass diese Einfallsmatrix derart aufgebaut wurde, dass ein Verzweigungsstrom, der in einen Knoten fließt, derart definiert ist, dass er ein negatives Vorzeichen hat, und ein Verzweigungsstrom, der aus einem Knoten fließt, derart definiert ist, dass ein Positives Vorzeichen aufweist. Diese Definitionen könnten umgekehrt werden.

**[0041]** Durch Einsetzen von Gleichungen 4–6 in Gleichung 1 wird die vereinfachte Darstellung für das Netzwerk, gezeigt in [Fig. 3](#), erhalten:

$$\begin{bmatrix}
 1 & & & & \vdots & 0 & 0 \\
 & 1 & & & \vdots & -\frac{1}{R_2} & 0 \\
 & & 1 & & \vdots & -sC_3 & sC_3 \\
 & & & 1 & \vdots & 0 & -G_4 \\
 \dots & \dots & \dots & \dots & \vdots & \dots & \dots \\
 -1 & 1 & 1 & 0 & \vdots & 0 & 0 \\
 0 & 0 & -1 & 1 & \vdots & 0 & 0 \\
 & & & & \vdots & & 
 \end{bmatrix}
 \begin{bmatrix}
 I_1 \\
 I_2 \\
 I_3 \\
 I_4 \\
 V_{n1} \\
 V_{n2}
 \end{bmatrix}
 =
 \begin{bmatrix}
 J_1 \\
 0 \\
 0 \\
 0 \\
 0 \\
 0
 \end{bmatrix}
 \quad \text{Gl. 7}$$

**[0042]** Gleichung 7 kann nach einem bestimmten Wert von  $s$  aufgelöst werden, um die Knotenspannungen und Verzweigungsströme zu bestimmen. Das Auflösen von Gleichung 7 kann per Hand unter Verwendung von Matrixverfahren durchgeführt werden oder durch eine Anzahl von computerisierten Mathe-Paketen oder -Verfahren.

**[0043]** Eine der Möglichkeiten, wie eine Darstellungsgleichung nach den Verzweigungsströmen ( $I_b$ ) und Knotenspannungen ( $V_n$ ) aufgelöst werden kann, ist das Berechnen der Umkehrung der Darstellung. Im Hinblick auf den verallgemeinerten Fall, gegeben in [Fig. 1](#), wäre dies:

$$\begin{bmatrix} I_b \\ V_n \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} K_i & -K_v A^T \\ A & 0 \end{bmatrix}^{-1} \begin{bmatrix} S \\ 0 \end{bmatrix} \quad \text{Gl. 8}$$

**[0044]** Diese Umkehrung kann derart partitioniert werden, dass eine Teilmatrix, die nur jene Ausdrücke enthält, die die Knotenspannungen ( $V_n$ ) beeinflussen, extrahiert werden kann. Darstellend:

$$\begin{bmatrix} I_b \\ V_n \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} K_i & -K_v A^T \\ A & 0 \end{bmatrix}^{-1} \begin{bmatrix} S \\ 0 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \vdots \\ \dots & \vdots & \dots \\ Z & \vdots \end{bmatrix} \begin{bmatrix} S \\ 0 \end{bmatrix} \quad \text{Gl. 9}$$

**[0045]** Die Z-Matrix besteht aus  $n - 1$  Zeilen und  $b$  Spalten, wobei wiederum  $n$  die Anzahl von Knoten in der Schaltung ist und  $b$  die Anzahl von Verzweigungen ist. Die Extrahierung der Z-Matrix ermöglicht die Verwendung der nachfolgenden einfachen Gleichung, um Knotenspannungen auf angewendete unabhängige Quellen zu beziehen:

$$V_n = ZS \quad \text{Gl. 10}$$

**[0046]** Wenn jede Schaltungsverzweigung in dem Modell nur eine Komponente aufweist, ist eine Eigenschaft der Z-Matrix, dass ihre Spalten eine Eins-zu-Eins-Korrespondenz zu jeder der Komponenten aufweisen. Dieses bedeutet, dass zusammengesetzte Komponenten, wie z.B. ein Induktor, der sowohl einen Reihenwiderstand als auch eine ideale Induktivität aufweist, in mehrere Verzweigungen gespalten werden sollte, um diese Eins-zu-Eins-Beziehung beizubehalten. (Das heißt, eine Verzweigung für den Widerstand und eine Verzweigung für die Induktivität). Z.B. wenn die Spalten der Einfallsmatrix  $A$  den Komponenten in [Fig. 3](#) wie folgt entsprechen (es wird darauf hingewiesen, dass, da jede Verzweigung eine einzelne Komponente ist, die Ausdrücke Komponente und Verzweigung austauschbar verwendet werden können.):

$$\begin{matrix} & J_1 & R_2 & C_3 & G_4 \\ A = & \begin{bmatrix} -1 & 1 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & -1 & 1 \end{bmatrix} \end{matrix}$$

dann würde die Z-Matrix, die dieselbe  $(n - 1) \times b$ -Abmessung aufweist wie die A-Matrix, die selbe Korrespondenz zwischen ihren Spalten aufweisen. Zur Darstellung:

$$Z = \begin{bmatrix} J_1 & R_2 & C_3 & G_4 \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \end{bmatrix}$$

**[0047]** Das vereinfachte Darstellungsmodell, das jegliche Schaltung beschreibt, deren Komponenten jede einen einzelnen vordefinierten Wert aufweisen, ist in verallgemeinerter Weise durch Gleichung 1 gegeben. Wenn Komponentenwerte verändert werden (z.B. dadurch, dass sie eine Toleranz anstelle eines Einzelwerts aufweisen oder dadurch, dass sie fehlerhaft sind), kann die Schaltung unter Verwendung dieser Gleichung beschrieben werden:

$$\begin{bmatrix} K_i & - (K_v + \Delta K_v) A^T \\ A & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} I_b + \Delta I_b \\ V_n + \Delta V_n \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} S \\ 0 \end{bmatrix} \quad \text{Gl. 11}$$

**[0048]** Gleichung 11 zeigt, dass eine Änderung bei der Admittanz-Matrix  $K_v$  um einen Betrag  $\Delta K_v$  zu Änderungen  $\Delta I_b$  und  $\Delta V_n$  bei den Verzweigungsstrom- bzw. Knotenspannungs-Vektoren für den selben Stimulus  $S$  führt. Um die Mathematik zu vereinfachen, wird  $K_i$  konstant gehalten durch Wählen, alle Änderungen bei Komponentenwerten als Änderungen bei der Admittanz-Matrix  $K_v$  zu beschreiben. Wenn z.B. der Nennwert des Widerstands in [Fig. 3](#)  $R_2$  ist und sich von diesem Nennwert um 100 Ohm erhöht, dann:

$$\Delta K_v = \begin{bmatrix} 0 & & & \\ & \left( \frac{1}{R_2} - \frac{1}{R_2 + 100} \right) & & \\ & & 0 & \\ & & & 0 \end{bmatrix} \quad \text{Gl. 12}$$

**[0049]** In dem allgemeinen Fall ergibt das Subtrahieren von Gleichung 1 von Gleichung 11:

$$\begin{bmatrix} K_i & - K_v A^T \\ A & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \Delta I_b \\ \Delta V_n \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \Delta K_v A^T (V_n + \Delta V_n) \\ 0 \end{bmatrix} \quad \text{Gl. 13}$$

woraus sich ergibt:

$$\begin{bmatrix} \Delta I_b \\ \Delta V_n \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} K_i & - K_v A^T \\ A & 0 \end{bmatrix}^{-1} \begin{bmatrix} \Delta K_v A^T (V_n + \Delta V_n) \\ 0 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \vdots \\ \dots \\ Z \\ \vdots \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \Delta K_v A^T (V_n + \Delta V_n) \\ 0 \end{bmatrix} \quad \text{Gl. 14}$$

**[0050]** Das Extrahieren der Teile aus Gleichung 14, die  $\Delta V_n$  beeinflussen, ergibt:

$$\Delta V_n = Z \Delta K_v A^T (V_n + \Delta V_n) \quad \text{Gl. 15}$$

**[0051]** Bei einem bevorzugten Ausführungsbeispiel sind nicht alle der Knoten einer getesteten Schaltung für die Messhardware zugreifbar. Daher können nicht alle Knotenspannungen gemessen werden. Die Zeilen der Matrizen in Gleichung 15 können erneut angeordnet und in Änderungen in Knotenspannungen, die beobachtet werden können, und Änderungen, die nicht beobachtet werden können, wie folgt partitioniert werden:

$$\begin{bmatrix} \Delta V_{(n,ac)} \\ \Delta V_{(n,nac)} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} Z_{(ac)} \\ Z_{(nac)} \end{bmatrix} \Delta K_v A^T (V_n + \Delta V_n) \quad \text{Gl. 16}$$

wobei „ac“ den Satz aus Knoten bezeichnet, die für die Messhardware zugreifbar sind, und „nac“ die nicht-zugreifbaren Knoten bezeichnen.

**[0052]** Dementsprechend ergibt die folgende Gleichung nur die beobachtbaren Änderungen bei den Knotenspannungen:



$$\Delta V_{(n,ac)} = Z_{(ac)} \Delta K_v A^T (V_n + \Delta V_n)$$

Gl. 17

**[0053]** Bei einem bevorzugten Ausführungsbeispiel werden die Ausdrücke dieser Gleichung verwendet, um Äquivalenzklassen,  $U^*$ -Matrizen und Testgrenzen zu erzeugen. Der Prozess zum Erzeugen der Äquivalenzklassen und  $U^*$ -Matrizen folgt vorzugsweise dem Prozess, der bei dem herkömmlichen  $T_F$ -Äquivalenzklassen-Lösungsansatz unternommen wird. Zusätzliche Informationen im Hinblick auf den  $T_F$ -Äquivalenzklassen-Lösungsansatz sind enthalten in „The  $T_F$ -Equivalence Class Approach to Analog Fault Diagnosis Problems“ von Togawa, Matsumoto, und Arai, IEEE TRANSACTIONS ON CIRCUITS AND SYSTEMS, Band cas-33 Nr. 10, Oktober 1986.

**[0054]** Eine exakte mathematische Beschreibung des  $T_F$ -Äquivalenzklassen-Lösungsansatzes ist gegeben in dem vorangehend erwähnten Dokument von Togawa, The  $T_F$ -Equivalence Class Approach to Analog Fault Diagnosis Problems, IEEE TRANSACTIONS ON CIRCUITS AND SYSTEMS, Band cas-33 Nr. 10 (1986). Ein einfaches Beispiel basierend auf der Schaltung, die in [Fig. 4](#) gezeigt ist, entsprechend einem Ausführungsbeispiel der vorliegenden Erfindung wird verwendet, um einige Konzepte des  $T_F$ -Äquivalenzklassen-Lösungsansatzes darzustellen. Die Schaltung aus [Fig. 4](#) weist nur Widerstände zusätzlich zu einem Quellen-Stimulus auf. Die selben grundlegenden Verfahren des  $T_F$ -Äquivalenzklassen-Lösungsansatzes können jedoch angewendet werden, wenn Komponenten komplexe Impedanzen aufweisen.

**[0055]** Es sei angenommen, dass die Komponenten in [Fig. 4](#) Nennwerte aufweisen, wie in der Figur gezeigt ist. Es sei ferner angenommen, dass die einzigen zugreifbaren Knoten zusätzlich zu dem Referenzknoten,  $V_{n0}$ ,  $V_{n1}$  und  $V_{n2}$  sind. Wenn jede der Komponenten außer Einer konstant auf ihren Nennwert gehalten wird, dann wird diese eine Komponente durch einen großen Wertebereich gewobbelt, sie erzeugt eine Linie, wenn  $\Delta V_{n2}$  über  $\Delta V_{n1}$  gezeichnet wird.  $\Delta V_{n2}$  und  $\Delta V_{n1}$  sind die Änderungen bei  $V_{n1}$  und  $V_{n2}$  von ihren Nennwerten. Wenn dies für jede Komponente abwechselnd ausgeführt wird, ergibt sich die Zeichnung aus [Fig. 5](#), die konsistent mit einem Ausführungsbeispiel der vorliegenden Erfindung ist. In [Fig. 5](#) ist jede Linie mit der Komponente markiert, die abgeändert wurde.

**[0056]** Diese Skizze hilft beim Darstellen der Äquivalenzklassen aus [Fig. 4](#). Es wird z.B. der Fall genommen, in dem angenommen wird, dass alle Komponenten auf ihrem Nennwert sind, außer einer. Zuerst werden  $V_{n1}$  und  $V_{n2}$  an der getesteten Schaltung gemessen, um  $\Delta V_{(n1,test)}$  und  $\Delta V_{(n2,test)}$  zu erhalten, die dann auf [Fig. 5](#) gezeichnet werden. Wenn die Position dieses Punkts auf die Linien für  $R_1$ ,  $R_2$  oder  $R_3$  fallen würde, würde dies anzeigen, dass die entsprechende Komponente die Komponente ist, die nicht auf ihrem Nennwert ist. Wenn die Position des Punkts auf die Linie für  $R_4$  und  $R_5$  fallen würde, dann würde sie anzeigen, dass einer oder beide von  $R_4$  oder  $R_5$  nicht auf ihrem Nennwert sind und dass der Rest der Komponenten auf ihren Nennwerten sind. Ferner, wenn der Punkt nicht auf einer dieser Linien liegt, dann kann gefolgert werden, dass eine Kombination von mehr als einer Komponente, die nicht auf ihrem Nennwert sind, aufgetreten ist (abgesehen davon, dass  $R_4$  und  $R_5$  beide nicht auf ihrem Nennwert sind).

**[0057]** Wie in [Fig. 5](#) gezeigt ist, überlappen die Linien für  $R_4$  und  $R_5$ . Im Allgemeinen ist es dann unmöglich, zwischen dem Fall, wenn  $R_4$  nicht nominal ist, und dem Fall, wenn  $R_5$  nicht nominal ist, zu unterscheiden, ausschließlich durch Betrachten der Spannungen an den zugreifbaren Knoten  $V_{n1}$  und  $V_{n2}$ . Diese Komponenten werden dann derart betrachtet, dass sie in der selben Äquivalenzklasse liegen.

**[0058]** Die Verfahren des  $T_F$ -Äquivalenzklassen-Lösungsansatzes sind an größere Abmessungen anwendbar. Das heißt, um größere Schaltungen mit mehr zugreifbaren Knoten einzuschließen, um komplexe sowie echte Spannungsmessungen einzuschließen, um mehrere Komponenten, die nicht nominal sind, mehrere Stimuli und mehrere Stimulus-Frequenzen einzuschließen. Das vorangehende Beispiel wurde auf nur zwei Dimensionen beschränkt, und jeweils eine nicht nominale Komponente, so dass es ohne weiteres visualisiert und auf einer zweidimensionalen Skizze gezeigt werden könnte.

**[0059]** Bei einem bevorzugten Ausführungsbeispiel können die Äquivalenzklassen unter Verwendung der Elemente der  $Z_{(ac)}$ -Matrix aus Gleichung 17 bestimmt werden. Der Aufbau der  $Z_{(ac)}$ -Matrix und der Äquivalenzklassen wird üblicherweise durchgeführt durch den Testprogrammgenerator **104** basierend auf den Informationen, die von der Datenbank **102** erhalten werden, nach dem Partitionieren der Schaltung in Cluster. Für den Fall, bei dem nur zwei Knoten zugreifbar sind ( $V_{n1}$  und  $V_{n2}$ ), ist die  $Z_{(ac)}$ -Matrix für die Schaltung, die in [Fig. 3](#) gezeigt ist:

$$Z_{(ac)} = \begin{bmatrix} 1000 & 1000 & 500 & 125 & 375 \\ 0 & 500 & -250 & 187,5 & 562,5 \end{bmatrix} \quad \text{Gl. 18}$$

wobei  $Z_{(ac)}$  eine Spaltenordnung aufweist, die  $R_1, R_2, R_3, R_4$  bzw.  $R_5$  entspricht. Eine vollständige Liste aller Äquivalenzklassen kann aufgebaut werden durch Prüfen, ob jede Kombination aus Elementen und Gruppen von Elementen zu der selben Äquivalenzklasse gehört, und dann entsprechendes Gruppieren derselben. Im Allgemeinen gehören zwei Gruppen von Komponenten zu der selben Äquivalenzklasse, wenn es unmöglich ist, den Fall, wenn eine Gruppe nicht nominale Komponenten aufweist, von dem zu unterscheiden, wenn die andere Gruppe nicht nominale Komponenten aufweist, einfach durch Betrachten der Spannungen an den zugreifbaren Knoten. Genauer gesagt kann das nachfolgende Verfahren verwendet werden, um zu bestimmen, ob zwei Komponenten oder Gruppen von Komponenten zu der selben Äquivalenzklasse gehören. Die zwei Gruppen von Komponenten werden als  $f1$  bzw.  $f2$  bezeichnet und jede kann aus einer oder mehreren Komponenten bestehen, die nicht nominal sind.

1. Anordnen einer Matrix aus den Spalten der  $Z_{(ac)}$ -Matrix, die der ersten Gruppe entspricht ( $Z_{(ac,f1)}$ ). Berechnen ihres Rangs,  $\text{rank}(Z_{(ac,f1)})$ .
2. Anordnen einer Matrix aus den Spalten der  $Z_{(ac)}$ -Matrix, die der zweiten Gruppe entspricht ( $Z_{(ac,f2)}$ ). Berechnen ihres Rangs,  $\text{rank}(Z_{(ac,f2)})$ .
3. Anordnen einer Matrix aus den Spalten der  $Z_{(ac)}$ -Matrix, die der Vereinigung der ersten Gruppe und der zweiten Gruppe entspricht ( $Z_{(ac,f1 \cup f2)}$ ). Berechnen ihres Rangs,  $\text{rank}(Z_{(ac,f1 \cup f2)})$ .
4. Wenn, und nur wenn  $\text{rank}(Z_{(ac,f1)}) = \text{rank}(Z_{(ac,f2)}) = \text{rank}(Z_{(ac,f1 \cup f2)})$ , dann gehören die Gruppen  $f1$  und  $f2$  zu der selben Äquivalenzklasse.

**[0060]** Unter Verwendung von  $f1 = \{R_1\}$  und  $f2 = \{R_2\}$  als Beispiel:

1.

$$Z_{(ac,f1)} = \begin{bmatrix} 1000 \\ 0 \end{bmatrix} \text{rank}(Z_{(ac,f1)}) = 1$$

2.

$$Z_{(ac,f2)} = \begin{bmatrix} 1000 \\ 500 \end{bmatrix} \text{rank}(Z_{(ac,f2)}) = 1$$

3.

$$Z_{(ac,f1 \cup f2)} = \begin{bmatrix} 1000 & 1000 \\ 0 & 500 \end{bmatrix} \text{rank}(Z_{(ac,f1 \cup f2)}) = 2$$

4. Da  $\text{rank}(Z_{(ac,f1 \cup f2)}) \neq \text{rank}(Z_{(ac,f1)}) = \text{rank}(Z_{(ac,f2)})$ , dann gehören  $R_1$  und  $R_2$  nicht zu der selben Äquivalenzklasse.

**[0061]** Ein anderes Beispiel, diesmal mit  $f1 = \{R_1, R_4\}$  und  $f2 = \{R_1, R_5\}$ :

1.

$$Z_{(ac,f1)} = \begin{bmatrix} 1000 & 125 \\ 0 & 187.5 \end{bmatrix} \text{rank}(Z_{(ac,f1)}) = 2$$

2.

$$Z_{(ac,f2)} = \begin{bmatrix} 1000 & 375 \\ 0 & 562.5 \end{bmatrix} \text{rank}(Z_{(ac,f2)}) = 2$$

3.

$$Z_{(ac,f1 \cup f2)} = \begin{bmatrix} 1000 & 125 & 1000 & 375 \\ 0 & 187.5 & 0 & 562.5 \end{bmatrix} \text{rank}(Z_{(ac,f1 \cup f2)}) = 2$$

4. Da  $\text{rank}(Z_{(ac,f1)}) = \text{rank}(Z_{(ac,f2)}) = \text{rank}(Z_{(ac,f1 \cup f2)})$  gehören die Gruppen  $f1 = \{R_1, R_4\}$  und  $f2 = \{R_1, R_5\}$  zu der selben Äquivalenzklasse.

**[0062]** Bei einem bevorzugten Ausführungsbeispiel wird ein mathematisch und rechentechnisch vorteilhaftes Verfahren zum Prüfen, ob ein Punkt in dem Raum einer Äquivalenzklasse in einer zufälligen Anzahl von Di-

mensionen liegt, verwendet. Dies ermöglicht, dass ein Satz von Messungen an dem zugreifbaren Knoten verwendet wird, um zu bestimmen, welche Äquivalenzklasse die Komponente oder Komponenten enthält, die nicht nominal für eine zufällige Anzahl von zugreifbaren Knoten sind.

**[0063]** Das Verfahren zum Finden der Äquivalenzklassen (falls vorhanden), die nicht nominale Komponenten enthalten, die auch durch den  $T_F$ -Äquivalenzklassen-Lösungsansatz verwendet werden, wird wie folgt zusammengefasst:

1. Auswählen eines Bestandteils einer Äquivalenzklasse. Der Klarheit halber stellt  $f1$  die Gruppe von Komponenten in dem Teil der Äquivalenzklasse dar,  $J$  stellt die Äquivalenzklasse dar. Daher ist  $f1$  ein Teil von  $J$ . Anordnen einer Matrix aus den Spalten der  $Z_{(ac)}$ -Matrix, die den Komponenten in dieser Gruppe entsprechen ( $Z_{(ac,f1)}$ ).
2. Verwenden der Singulärer-Wert-Zersetzung („SVD“; SVD = Singular Value Decomposition), um die Matrix aus Schritt 1 in drei Ausdrücke zu faktorisieren.  $SVD(Z_{(ac,f1)}) = U_{(ac,f1)} \Sigma_{(ac,f1)} W_{(ac,f1)}^T$  (Anmerkung: die SVD wird üblicherweise geschrieben als das Matrixprodukt der drei Ausdrücke  $U$ ,  $\Sigma$  und  $V^T$ , wobei  $U$  die Matrix ist, die die linken Singulär-Vektoren enthält,  $F$  die Matrix ist, die die Singulär-Werte enthält und  $V$  die Matrix ist, die die rechten singulären Vektoren enthält. Leider wurde die Variable  $V$  ausgewählt, um in der vorangehenden Erörterung Spannung zu bezeichnen. Daher verwendet diese Erörterung die Variable  $W$ , um die rechte Singulär-Matrix darzustellen. Es wird ebenfalls darauf hingewiesen, dass der Rang von  $(Z_{(ac,f1)})$  ohne weiteres erhalten wird aus  $SVD(Z_{(ac,f1)})$ .)
3. Erzeuge das konjugierte Transponierte von  $U_{(ac,f1)}$ ,  $U_{(ac,f1)}^*$ . (Es wird darauf hingewiesen, dass, da  $U_{(ac,f1)}$ , unitär ist, das konjugierte Transponierte von  $U_{(ac,f1)}$ , dasselbe ist wie das Inverse und das Adjungierte von  $U_{(ac,f1)}$ .)
4. Erzeugen von  $\Delta V_{(n,ac,meas)}$  durch Subtrahieren der Spannungen, die an den zugreifbaren Knoten erwartet werden, wenn alle Komponenten auf ihren Nennwerten sind, von den Spannungen, die an den zugreifbaren Knoten gemessen werden.
5. Multiplizieren von  $U_{(ac,f1)}^*$  und  $\Delta V_{(n,ac,meas)}$ .
6. Wenn die ersten  $r$  Elemente (Zeilen) von  $U_{(ac,f1)}^* \Delta V_{(n,ac,meas)}$  ungleich Null sind, und der Rest Null ist, dann enthält die Äquivalenzklasse  $J$ , von der  $f1$  ein Teil ist, die Gruppe von Komponenten, die nicht nominal sind. Die Variable  $r$  stellt die maximale Anzahl von gleichzeitig nicht nominalen (oder fehlerhaften) Komponenten dar, die geprüft werden. ( $r$  ist ebenfalls gleich  $\text{rank}(Z_{(ac,f1)})$ .) Wenn die Gruppe von Komponenten  $f1$  nur ein Teil von  $J$  ist, dann sind alle Komponenten in  $f1$  nicht nominal.
7. Wenn die ersten  $r$  Elemente (Zeilen) von  $U_{(ac,f1)}^* \Delta V_{(n,ac,meas)}$  nicht alle ungleich Null sind, oder jegliche des Rests der Elemente ungleich Null sind, dann enthält die Äquivalenzklasse  $J$ , von der  $f1$  ein Teil ist, nicht die Gruppe von Komponenten, die nicht nominal sind. Dementsprechend könnten Schritte 1–6 für jede Äquivalenzklasse abwechselnd wiederholt werden, bis eine gefunden wird, die die nicht-nominale Gruppe von Komponenten enthält oder bis alle Äquivalenzklassen erschöpft sind.

**[0064]** Bei einem bevorzugten Ausführungsbeispiel werden die Schritte 1–3 oben üblicherweise nur einmal für jede Äquivalenzklasse ausgeführt, und die resultierenden Matrizen  $U_{(ac,f1)}^*$ ,  $U_{(ac,f2)}^*$  ... etc. werden üblicherweise zur Verwendung bei Schritt 5 gespeichert. Schritt 4 wird üblicherweise einmal für jede getestete Schaltung ausgeführt. Zusätzlich dazu werden Schritte 5 und 6 üblicherweise aufeinanderfolgend für jede Äquivalenzklasse wiederholt, bis die Äquivalenzklasse (falls vorhanden) gefunden wird, die die Gruppe von Komponenten enthält, die auf der getesteten Schaltung nicht nominal sind. Keine Äquivalenzklasse kann gefunden werden, wenn mehr gleichzeitig nicht-nominale Komponenten vorhanden sind, als betrachtet wurden, als die Äquivalenzklassen aufgebaut wurden.

**[0065]** Auf vielen Schaltungen sind Komponenten nicht auf einen einzelnen Nennwert beschränkt, der als nicht-fehlerhaft betrachtet werden soll. Dieser Bereich von Komponentenwerten wird als Toleranz bezeichnet. Bei einem bevorzugten Ausführungsbeispiel, um mit Komponententoleranzen umzugehen, wird die Null/Ungleich-Null-Bestimmung bei Schritt 6 oben durch die nachfolgende Gleichung geregelt:

$$Y_{(ac,f,min)} \leq U_{(ac,f)}^* \Delta V_{(n,ac,meas)} \leq Y_{(ac,f,max)} \quad \text{Gl. 19}$$

**[0066]** Anders ausgedrückt, wenn ein bestimmtes Element von  $U_{(ac,f)}^* \Delta V_{(n,ac,meas)}$  größer oder gleich  $Y_{(ac,f,min)}$  ist (für dieses bestimmte Element und diesen bestimmten Fehler „f“) und  $U_{(ac,f)}^* \Delta V_{(n,ac,meas)}$  kleiner oder gleich  $Y_{(ac,f,max)}$  ist (für dieses bestimmte Element und diesen bestimmten Fehler „f“), dann sollte dasselbe als Null betrachtet werden. Anderweitig sollte es als Ungleich-Null betrachtet werden. „Unter Betrachtung“ eines bestimmten Elements von  $U_{(ac,f)}^* \Delta V_{(n,ac,meas)}$  ermöglicht Null/Ungleich-Null, dass die Tests von Schritt 6 und 7 oben in dem Fall erreicht werden, in dem Komponenten Toleranzen aufweisen. Durch Ermöglichen jedoch, dass ein Bereich von Werten für jedes Element von  $U_{(ac,f)}^* \Delta V_{(n,ac,meas)}$  als Null/Ungleich-Null betrachtet wird, erfüllt mehr als eine Äqui-

valenzklasse möglicherweise den Test von Schritt 6 und wird derart identifiziert, dass sie einen Teil enthält, dessen Komponenten außerhalb der Toleranz sind. Trotzdem sollte die Suche nach den Komponenten außerhalb der Toleranz bedeutend geschmälert werden, da nur eine Äquivalenzklasse tatsächlich einen Teil aufweist, dessen Komponenten außerhalb der Toleranz sind.

**[0067]** Wenn  $U^* \Delta V_{(n,ac,meas)}$  komplexe Zahlen umfasst, müssen der echte und imaginäre Teil beide Grenzen erfüllen, um als eine Null betrachtet zu werden. Die Null/Ungleich-Null-Bestimmung wird geregelt durch den nachfolgenden Satz aus Gleichungen:

$$\begin{aligned} Y_{(ac,f,real,min)} &\leq \text{real}(U^*_{(ac,f)} \Delta V_{(n,ac,meas)}) \leq Y_{(ac,f,real,max)} \\ Y_{(ac,f,imag,min)} &\leq \text{imag}(U^*_{(ac,f)} \Delta V_{(n,ac,meas)}) \leq Y_{(ac,f,imag,max)} \end{aligned} \quad \text{Gl. 20}$$

**[0068]** Bei beiden Gleichungen 19 und 20 sind die Ausdrücke  $\gamma$  Vektoren mit individuellen Elementen, die jeweils einer Zeile von  $U^*$  entsprechen. Die Funktionen  $\text{real}()$  und  $\text{imag}()$  extrahieren den realen und bzw. imaginären Teil aus dem Eingangsvektor.

**[0069]** Bei einem beispielhaften Ausführungsbeispiel ist jegliches Verfahren, das eine Funktion minimiert und maximiert, ausreichend, um jedes Element der  $\gamma$ -Vektoren zu berechnen. Bei einem bevorzugten Ausführungsbeispiel basiert das Verfahren, das zum Berechnen der  $\gamma$ -Vektoren verwendet wird, auf einer linearen Programmierung (LP). Eine Matrix-Formulierung eines LP-Modells wird eine Standardform-LP genannt und ist gekennzeichnet durch:

$\min(\text{oder max}) \quad c x$   
gemäß  $Dx = b, x \geq 0$ .

**[0070]** Um die Beschränkungsmatrix  $D$  zu erzeugen, kann die Toleranz bei den Elementen von  $K_v$  als eine Toleranz an dem realen Abschnitt der komplexen Werte und eine Toleranz an dem imaginären Abschnitt betrachtet werden. Wenn nur ein Abschnitt existiert (z.B. in dem Fall eines Widerstands ist der entsprechende Wert bei  $K_v$  eine reale Zahl und für einen Kondensator weist der Wert nur einen imaginären Abschnitt auf), ist die Toleranz an dem anderen Abschnitt Null. Da eine lineare Programmierung die implizite Beschränkung aufweist, dass alle Entscheidungsvariablen größer oder gleich Null sein müssen, kann die Toleranz an den realen Abschnitten von  $K_v$  beschrieben werden durch:

$$\text{real}(\min K_v) \leq \text{real}(K_v) \leq \text{real}(\max K_v)$$

$$\Leftrightarrow$$

$$\text{real}(K_v) = X_{\text{real}} + \text{real}(\min K_v) = \text{real}(\max K_v) - Y_{\text{real}}$$

$$\text{wobei } X_{\text{real}} \geq 0 \text{ and } Y_{\text{real}} \geq 0$$

$$\Leftrightarrow$$

$$X_{\text{real}} + Y_{\text{real}} = \text{real}(\max K_v) - \text{real}(\min K_v)$$

**[0071]** Auf ähnliche Weise können die imaginären Abschnitte von  $K_v$  beschrieben werden durch

$$X_{\text{imag}} + Y_{\text{imag}} = \text{imag}(\max K_v) - \text{imag}(\min K_v).$$

**[0072]** Die obigen Gleichungen können dann wie folgt geschrieben werden:

$$\begin{bmatrix}
 1 & 0 & \dots & \dots & 0 & 1 & 0 & \dots & 0 & 0 \\
 0 & 1 & 0 & \dots & 0 & 0 & 1 & 0 & \dots & 0 \\
 \vdots & \ddots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \ddots & \vdots & \vdots & \vdots \\
 0 & \dots & 0 & 1 & 0 & 0 & \dots & 0 & 1 & 0 \\
 0 & \dots & 0 & 0 & 1 & 0 & \dots & 0 & 0 & 1
 \end{bmatrix}
 \begin{bmatrix}
 1 & 0 & \dots & \dots & 0 & 1 & 0 & \dots & 0 & 0 \\
 0 & 1 & 0 & \dots & 0 & 0 & 1 & 0 & \dots & 0 \\
 \vdots & \ddots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \ddots & \vdots & \vdots & \vdots \\
 0 & \dots & 0 & 1 & 0 & 0 & \dots & 0 & 1 & 0 \\
 0 & \dots & 0 & 0 & 1 & 0 & \dots & 0 & 0 & 1
 \end{bmatrix}
 \begin{bmatrix}
 X_{\text{real},1} \\
 \vdots \\
 X_{\text{real},b} \\
 Y_{\text{real},1} \\
 \vdots \\
 Y_{\text{real},b} \\
 X_{\text{imag},1} \\
 \vdots \\
 X_{\text{imag},b} \\
 Y_{\text{imag},1} \\
 \vdots \\
 Y_{\text{imag},b}
 \end{bmatrix} =
 \begin{bmatrix}
 \text{real}(\max K_{v,11}) - \text{real}(\min K_{v,11}) \\
 \text{real}(\max K_{v,22}) - \text{real}(\min K_{v,22}) \\
 \vdots \\
 \text{real}(\max K_{v,bb}) - \text{real}(\min K_{v,bb}) \\
 \text{imag}(\max K_{v,11}) - \text{imag}(\min K_{v,11}) \\
 \text{imag}(\max K_{v,22}) - \text{imag}(\min K_{v,22}) \\
 \vdots \\
 \text{imag}(\max K_{v,bb}) - \text{imag}(\min K_{v,bb})
 \end{bmatrix}
 \quad \text{Gl. 21}$$

**[0073]** Es wird darauf hingewiesen, dass die obige Gleichung 21 die Form  $Dx = b$  aufweist, die mit der Form der Einschränkungen bei einer LP mit Standardform übereinstimmt.

**[0074]** Die Zielfunktion, die optimiert werden soll, entspricht jeder Zeile der rechten Seite der nachfolgenden Gleichung, hergeleitet aus Gleichung 17:

$$U_{(ac,f)}^* \Delta V_{(n,ac)} = U_{(ac,f)}^* Z_{(ac)} \Delta K_v A^T (V_n + \Delta V_n) = [U_{(ac,f)}^*] [Z_{(ac)}] [\text{diag}(A^T (V_n + \Delta V_n))] [\text{vect}(\Delta K_v)] \quad \text{Gl. 22}$$

**[0075]** Hier transformiert die Funktion  $\text{diag}()$  einen Vektor in eine diagonale Matrix, wo die diagonalen Elemente die Vektor-Elemente sind und der Rest der Elemente Null sind. Die Funktion  $\text{vect}()$  nimmt die Elemente entlang der Diagonalen einer diagonalen Matrix und transformiert sie in einen Vektor. Dies weist die Form  $cx$  auf, wenn  $\Delta K_v$  die Entscheidungsvariable ist. Geschrieben im Hinblick auf  $X_1$  (den realen Teil) und  $X_2$  (den imaginären Teil) von  $\Delta K_v$  und  $E_1$  (den realen Teil) und  $E_2$  (den imaginären Teil) des Rests von Gleichung 22 ergibt sich:

$$[U_{(ac,f)}^*] [Z_{(ac)}] [\text{diag}(A^T (V_n + \Delta V_n))] \begin{bmatrix} X_{\text{real},1} + jX_{\text{imag},1} \\ X_{\text{real},2} + jX_{\text{imag},2} \\ X_{\text{real},3} + jX_{\text{imag},3} \\ \vdots \\ X_{\text{real},b} + jX_{\text{imag},b} \end{bmatrix} = (E_{\text{real}} + jE_{\text{imag}})(X_{\text{real}} + jX_{\text{imag}}) = \\
 (E_{\text{real}}X_{\text{real}} - E_{\text{imag}}X_{\text{imag}}) + j(E_{\text{real}}X_{\text{imag}} + E_{\text{imag}}X_{\text{real}}) \quad \text{Gl. 23}$$

**[0076]** Durch Trennen von Gleichung 23 in ihre realen und imaginären Komponenten werden zwei Zielfunktionen erhalten. Eine Zielfunktion ist für den realen Teil von Gleichung 23 und eine ist für den imaginären Teil. Jede dieser Zielfunktionen muss unabhängig minimiert und maximiert werden. Die Zielfunktionen sind:

$$H_{\text{real}} = \begin{bmatrix} E_{\text{real}} & 0 & -E_{\text{imag}} & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} X_{\text{real},1} \\ X_{\text{real},2} \\ \vdots \\ X_{\text{real},b} \\ Y_{\text{real},1} \\ Y_{\text{real},2} \\ \vdots \\ Y_{\text{real},b} \\ X_{\text{imag},1} \\ X_{\text{imag},2} \\ \vdots \\ X_{\text{imag},b} \\ Y_{\text{imag},1} \\ Y_{\text{imag},2} \\ \vdots \\ Y_{\text{imag},b} \end{bmatrix} \quad \text{Gl. 24}$$

und

$$H_{\text{imag}} = \begin{bmatrix} E_{\text{imag}} & 0 & E_{\text{real}} & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} X_{\text{real},1} \\ X_{\text{real},2} \\ \vdots \\ X_{\text{real},b} \\ Y_{\text{real},1} \\ Y_{\text{real},2} \\ \vdots \\ Y_{\text{real},b} \\ X_{\text{imag},1} \\ X_{\text{imag},2} \\ \vdots \\ X_{\text{imag},b} \\ Y_{\text{imag},1} \\ Y_{\text{imag},2} \\ \vdots \\ Y_{\text{imag},b} \end{bmatrix} \quad \text{Gl. 25}$$

**[0077]** Diese Funktionen sind nicht linear, da sowohl  $\Delta K_v$  als auch  $\Delta V_n$  unbekannt sind. Dies kann gelöst werden durch entsprechendes Zuweisen von Werten für die Elemente bei  $\Delta V_n$  und dann Optimieren, um einen  $\Delta K_v$  zu finden. [Fig. 6](#) ist ein Flussdiagramm, das die Schritte zum Optimieren der Zielfunktion darstellt, gemäß einem Ausführungsbeispiel der vorliegenden Erfindung. Bei einem Schritt **602** wird der Prozess initiiert durch Einstellen von  $\Delta V_n$  auf Null. Bei einem Schritt **604** wird die Zielfunktion optimiert unter Verwendung des aktuell zugewiesenen Werts von  $\Delta V_n$  und des herkömmlichen Simplex-Verfahrens. Diese Optimierung kann eine Minimierung oder eine Maximierung sein, abhängig davon, ob  $v_{(\text{ac},\text{f},\text{min})}$  bzw.  $v_{(\text{ac},\text{f},\text{max})}$  berechnet wird. Bei einem Schritt **606**, wenn dies der erste Durchgang ist (d.h.  $\Delta V_n$  ist Null), dann fährt der Prozess mit Schritt **608** fort. Wenn dies nicht der erste Durchlauf ist, dann fährt der Prozess mit Schritt **610** fort. Bei einem Schritt **608** wird  $\Delta V_n$  berechnet aus  $\Delta K_v$ , erhalten bei Schritt **604**. Der Prozess geht dann in der Schleife zurück zu Schritt **604**, um die Zielfunktion mit dem neuen  $\Delta V_n$  zu optimieren.

**[0078]** Bei einem Schritt **610**, wenn die Zielfunktion, die bei Schritt **604** optimiert wurde, von dem letzten Durchlauf verbessert wurde, fährt der Prozess mit Schritt **614** fort. Wenn sich die Zielfunktion von dem letzten Durchlauf nicht verbessert hat, wird  $k$  bei Schritt **612** durch Zwei geteilt und dann fährt der Prozess mit Schritt **614** fort. Bei einem Schritt **614** wird ein neuer  $\Delta V_n$  berechnet als  $\Delta V_n \leftarrow (1 + k)\Delta V_n$ . Bei einem Schritt **616** wird eine Prüfung durchgeführt, um zu sehen, wie nahe der neue  $\Delta V_n$  an dem letzten  $\Delta V_n$  liegt. Wenn der neue  $\Delta V_n$  nahe genug ist, z.B. 1%, dann endet der Prozess bei einem Schritt **618**. Wenn der neue  $\Delta V_n$  nicht nahe genug ist, dann geht der Prozess in der Schleife zurück zu Schritt **604**, um die Zielfunktion wieder mit dem neuen  $\Delta V_n$  zu optimieren.

**[0079]** Die Schritte in [Fig. 6](#) bilden ein Suchverfahren, das einen  $\Delta V_n$  findet, der die am besten optimierte Zielfunktion erzeugt. In diesem Fall ist es eine Halbierungssuche. Andere Suchverfahren können ebenfalls verwendet werden. Beispiele von Suchtypen, die verwendet werden könnten, sind die Fibonacci-Suche, die Goldener-Schnitt-Suche und die Dichotomis-Suche. Andere Suchtypen, die verwendet werden könnten, sind detailliert angegeben in Algorithms von R. Sedgewick, Addison-Wesley, Reading Mass., 1988.

**[0080]** Sobald der Algorithmus mit einem  $\Delta K_v$  endet, der die Zielfunktion entweder minimiert oder maximiert, können reales und imaginäres  $y_{(ac,f,min)}$  und  $y_{(ac,f,max)}$  aus der Optimierungsroutine erhalten werden oder können berechnet werden aus  $\Delta K_v$  und dem letzten  $\Delta V_n$  unter Verwendung der nachfolgenden Gleichung hergeleitet aus der Zielfunktion:

$$y_{(ac,f)} = U_{(ac,f)}^* \Delta V_{(n,ac)} = U_{(ac,f)}^* Z_{(ac)} \Delta K_v A^T (V_n + \Delta V_n) \quad \text{Gl. 26}$$

**[0081]** Bezug nehmend wiederum auf [Fig. 2](#) werden bei einem Schritt **210** Stimulus- und Mess-Knoten ausgewählt, um jede Komponente in dem reduzierten Cluster zu testen. Dieser Prozess des Auswählens von Stimulus- und Mess-Knoten könnte an größeren Gruppen von Komponenten ausgeführt werden, einschließlich an Clustern oder der gesamten Schaltung. Bei einem bevorzugten Ausführungsbeispiel jedoch verwendet der Prozess des Auswählens die Komponenten in einem reduzierten Cluster, um die Effizienz zu verbessern und die Komplexität zu reduzieren. Um den Prozess des Auswählens von Stimulus- und Mess-Knoten darzustellen, wird [Fig. 7](#) als ein exemplarisches reduziertes Cluster betrachtet. [Fig. 7](#) zeigt die Schaltung aus [Fig. 4](#) mit der Stromquelle, bereitgestellt durch die Testhardware  $J_1$ , beseitigt gemäß einem Ausführungsbeispiel der vorliegenden Erfindung. Bei dem dargestellten Beispiel in [Fig. 7](#) sind die Knoten  $V_{n0}$ ,  $V_{n1}$  und  $V_{n2}$  wiederum die einzigen zugreifbaren Knoten. [Fig. 4](#) stellt nur eine der drei möglichen Stimuluspositionen dar, die ausgewählt worden sein könnten. Die anderen zwei sind in [Fig. 8](#) und [Fig. 9](#) gemäß einem Ausführungsbeispiel der vorliegenden Erfindung dargestellt. Es wird darauf hingewiesen, wie in [Fig. 4](#) und [Fig. 8](#) Strom durch  $R_1$  fließt, aber in [Fig. 9](#) kein Strom durch  $R_1$  fließt. Offensichtlich sollte die Stimulusposition, gezeigt in [Fig. 9](#), nicht ausgewählt werden, um ein Testen von  $R_1$  zu versuchen.

**[0082]** Um eine Komponente zu testen, ist es wünschenswert, die Spannung über diese Komponente zu maximieren. Dies maximiert die Abhängigkeit von zumindest einer Knotenspannung von dem Komponentenwert. Ein Prozess zum Auswählen eines Stimulus, der die Verzweigungsspannung über eine Komponente maximiert, ist dargestellt in [Fig. 10](#) gemäß einem Ausführungsbeispiel der vorliegenden Erfindung.

**[0083]** Bei einem Schritt **1022** werden die Verzweigungsspannungen für jede Komponente für jede Stimulusposition berechnet. Bei einem Schritt **1024** wird eine Kostenfunktion an die Verzweigungsspannungen angewendet. Eine Kostenfunktion könnte verwendet werden, um die Erwünschtheit von einem Stimulus gegenüber anderen zu reduzieren (oder erhöhen). Zum Beispiel dauern Spannungsmessungen bei niedrigeren Frequenzen länger, da das Messintervall die Periode (oder den Bruchteil derselben) der angewendeten Frequenz umfassen muss. Um eine Kostenfunktion zu berücksichtigen, können die Knotenspannungswerte der verschiedenen Stimuli mit geeigneten Zahlen multipliziert werden. Eine Multiplikation mit einer positiven Zahl kleiner als 1 verringert die Erwünschtheit dieses Stimulus. Eine Multiplikation mit positiven Zahlen größer als 1 erhöht die Erwünschtheit dieser Quelle.

**[0084]** Bei einem Schritt **1026** wird die Größe der Verzweigungsspannungswerte sortiert, und doppelte Werte werden beseitigt. Bei einem bevorzugten Ausführungsbeispiel werden sie von klein nach groß sortiert. Bei einem Schritt **1028** werden nicht-nützliche Verzweigungsspannungen auf Null gesetzt. Ebenfalls bei Schritt **1028** werden Verzweigungsspannungen, die innerhalb eines vorbestimmten Faktors voneinander sind, auf denselben Wert gerundet. Eine Verzweigungsspannung über eine Vorrichtung wird nur als nützlich betrachtet, wenn eine Änderung bei dieser Spannung erfassbar ist, zwischen dem Fall, wenn die Vorrichtung ihren Minimalwert aufweist, und dem, wenn die Vorrichtung ihren Maximalwert aufweist.

**[0085]** Zum Beispiel kann eine Änderung der Spannung nur erfasst werden, wenn sie größer ist als 1 Mikrovolt. Verzweigungsspannungen, die zu Änderungen zwischen einem Vorrichtungs-Minimal- und -Maximal-Wert führen, die nicht erfasst werden können, können einer Null-Rangordnungsnummer zugewiesen werden oder entsprechend vor einer Rangordnung auf Null gesetzt werden. Dies hilft, die Messgenauigkeit der Testerhardware zu berücksichtigen, durch Behandeln von Verzweigungsspannungen, die zu keinen erfassbaren Änderungen führen, als „Kein-Strom“-Verzweigungen.

**[0086]** Abschließend können Verzweigungsspannungen, die innerhalb eines vorbestimmten Faktors voneinander liegen, auf die selbe Zahl abgerundet werden oder der selben Rangordnung zugewiesen werden. Bei einem bevorzugten Ausführungsbeispiel werden Verzweigungsspannungen, die innerhalb eines Faktors von Zwei sind, auf die selbe Zahl vor der Rangordnung gerundet. Dieses Runden hilft beim Reduzieren der Anzahl von ausgewählten Stimuli.

**[0087]** Bei einem Schritt **1030** wird dann jedem Verzweigungsspannungswert eine Rangordnungszahl zugewiesen. Bei einem bevorzugten Ausführungsbeispiel wird die Rangordnungszahl zugewiesen beginnend bei Null zu der kleinsten Verzweigungsspannung und in Inkrementen von Eins für jeden unterschiedlichen Verzweigungsspannungswert. Diese Wahl ist jedoch zufällig. Viele andere Rangordnungsschemata, wie z.B. absteigende Rangordnung oder Inkrementierung um eine unterschiedliche positive oder negative Zahl könnten verwendet werden, so lange geeignete Einstellungen in späteren Schritten durchgeführt wurden, beim Bestimmen, welcher Stimulus verwendet werden soll.

**[0088]** Bei einem Schritt **1032**, wenn jegliche der Verzweigungsspannungen Null waren, dann wird Eins von allen Rangordnungszahlen abgezogen. Bei einem Schritt **1034** wird ein Gütefaktor zu jeder Stimulusposition zugewiesen. Der Gütefaktor wird üblicherweise zugewiesen durch Ersetzen des Verzweigungsspannungswerts über jede Komponente durch die entsprechende Rangordnungszahl und dann Summieren der Rangordnungszahlen für jede Komponente.

**[0089]** Bei einem Schritt **1036** werden die Stimulus-Position oder -Positionen ausgewählt. Die Stimuluspositionen können gemäß einer Vielzahl von Kriterien ausgewählt werden, basierend auf den Informationen, die in den vorangehenden Schritten entwickelt wurden. Zum Beispiel, wenn maximale Verzweigungsspannungen erwünscht sind, kann der folgende Prozess verwendet werden:

1. Beseitigen jeglicher Stimuluspositionen, die nicht die höchste Rangordnungszahl für zumindest eine Komponente aufweisen.
2. Auswählen der Stimulusposition mit dem höchsten Gütefaktor.
3. Beseitigen jener Komponenten aus der Betrachtung, bei denen die ausgewählte Stimulusposition die höchste Rangordnungszahl für diese Komponente aufweist.
4. Beseitigen des ausgewählten Stimulus aus der Betrachtung.
5. Wiederholen der Schritte 1–4, bis keine betrachteten Komponenten mehr vorliegen.

**[0090]** Eine Art des Auswählens der Stimuluspositionen zum Maximieren eines Testdurchsatzes kann sein, zuerst den Stimulus (falls vorhanden) mit dem höchsten Gütefaktor auszuwählen, der keine Komponenten mit einer Null-Rangordnungszahl aufwies. Falls keine Stimulusposition vorlag, die nicht zumindest eine Komponente mit einer Null-Rangordnungszahl aufwies, würde der Stimulus mit dem höchsten Gütefaktor ausgewählt werden, und alle Komponenten mit Rangordnungszahlen ungleich Null würden aus der Betrachtung beseitigt werden. Dann könnte eine andere Stimulusposition ausgewählt werden und der Prozess wiederholt werden, bis keine betrachteten Komponenten mehr vorlägen.

**[0091]** Eine dritte Möglichkeit zum Auswählen von Stimuluspositionen wäre das Ausgleichen von Maximierungs-Verzweigungsspannungen mit dem Testdurchsatz. Dies kann erreicht werden durch Addieren von jeweils einem Stimulus, bis ein gewünschtes Maß der Abdeckung und/oder Maß der Zeit erreicht wird. Dieser Ausgleich kann dem Benutzer überlassen werden oder durch einen automatisierten Regelsatz ausgewählt werden.

**[0092]** Ein Beispiel der Prozesse in [Fig. 10](#) folgt. Der Einfachheit halber wird die Stimulusposition, die in [Fig. 4](#) gezeigt ist, als  $\sigma_{n1,n0}$  bezeichnet, da der Stimulus zwischen den Knoten  $V_{n1}$  und  $V_{n2}$  ist. Auf ähnliche Weise wird die Stimulusposition, die in [Fig. 8](#) gezeigt ist, als  $\sigma_{n2,n1}$  bezeichnet und die Stimulusposition, die in [Fig. 9](#) gezeigt ist, wird als  $\sigma_{n2,n0}$  bezeichnet. Wenn die Verzweigungsspannungen für jeden dieser drei Stimuli in Tabellenform präsentiert werden, ergibt sich Tabelle 2.



	$R_1$	$R_2$	$R_3$	$R_4$	$R_5$
$\sigma_{n1,n0}$	1	1	0,5	0,25	0,25
$\sigma_{n2,n0}$	0	0,5	0,25	0,375	0,375
$\sigma_{n2,n1}$	1	0,5	0,75	0,125	0,125

Tabelle 2

**[0093]** Wenn Tabelle 2 untersucht wird, kann beobachtet werden, dass eine Stimulusposition  $\sigma_{n2,n1}$  eine größere Spannung über  $R_3$  erzeugt als jede der zwei anderen zwei Stimuluspositionen. Auf ähnliche Weise ist ersichtlich, dass die Stimuluspositionen  $\sigma_{n1,n0}$  und  $\sigma_{n2,n1}$  gleiche Spannungen über  $R_1$  erzeugen und  $\sigma_{n2,n0}$  keine Spannung über  $R_1$  erzeugt.

**[0094]** Wenn die Verzweigungsspannung in Tabelle 2 gemäß ihren Werten sortiert wird, doppeltes beseitigt wird und eine Rangordnungszahl zugewiesen wird, ergibt sich Tabelle 3.

Verzweigungsspannung	Rangordnung
0	0
0,125	1
0,25	2
0,375	3
0,5	4
0,75	5
1	6

Tabelle 3

**[0095]** Wenn die Verzweigungsspannungswerte in Tabelle 2 durch die entsprechende Rangordnungszahl ersetzt werden und ein Gütefaktor berechnet wird, ergibt sich Tabelle 4.

	$R_1$	$R_2$	$R_3$	$R_4$	$R_5$	Güte-Faktor
$\sigma_{n1,n0}$	6*	6*	4	2	2	20
$\sigma_{n2,n0}$	0	4	2	3*	3*	12
$\sigma_{n2,n1}$	6*	4	5*	1	1	17

Tabelle 4

**[0096]** Es wird darauf hingewiesen, dass in Tabelle 4 die besten (d.h. höchste Rangordnung) Einträge für jede Komponente mit einem Stern (\*) markiert wurden. Die Informationen in Tabelle 4 können dann verwendet werden, um die geeigneten Stimulusauswahl-Kriterien anzuwenden.

**[0097]** Das vorangehende Beispiel basierte auf einer rein resistiven Schaltung und der Stimulus war beschränkt auf eine einzelne Frequenz (einschließlich DC). Wenn andere Komponenten als Widerstände Teil der Schaltung sind, können komplexe Knotenspannungen vorliegen. Diese Knotenspannungen sind eine Funktion der Stimulusfrequenz. Das vorangehend beschriebene Verfahren kann ausgedehnt werden, um diese Situation abzudecken, durch Berechnen der Verzweigungsspannungen mit dem Stimulus an einer Anzahl von Frequenzen an jeder möglichen Quellposition. Der normale Prozess von Rangordnung, Berechnen eines Gütefaktors und Auswahl könnte dann verwendet werden, um auszuwählen, welche Stimulus-Position oder -Positionen und welche Frequenzen verwendet werden sollen. Die Form von Tabelle 2, wenn sie auf mehrere Frequenzen ausgedehnt wird, ist durch Tabelle 5 gezeigt.

	Komponente Nr.1	Komponente Nr.2	Komponente Nr.3	...	Letzte Komponente
$\sigma_{n1,n0,DC}$					
$\sigma_{n1,n0,freq1}$					
$\sigma_{n1,n0,freq2}$					
...					
$\sigma_{n2,n0,DC}$					
$\sigma_{n2,n0,freq1}$					
...					
$\sigma_{n2,n1,DC}$					
$\sigma_{n2,n1,freq1}$					
...					

Tabelle 5

**[0098]** Wie vorangehend angegeben wurde, kann eine Kostenfunktion ebenfalls an die Verzweigungsspannungsdaten angewendet werden. Eine Kostenfunktion könnte verwendet werden, um die Erwünschtheit eines Stimulus gegenüber anderen zu reduzieren (oder erhöhen). Zum Beispiel brauchen Spannungsmessungen bei niedrigeren Frequenzen länger, da das Messintervall die Periode (oder den Bruchteil derselben) der angewendeten Frequenz umfassen muss. Um eine Kostenfunktion zu berücksichtigen, können die Knotenspannungswerte von verschiedenen Stimuli mit geeigneten Zahlen multipliziert werden. Eine Multiplikation mit einer positiven Zahl kleiner 1 verringert die Erwünschtheit dieses Stimulus. Eine Multiplikation mit positiven Zahlen größer als 1 erhöht die Erwünschtheit dieser Quelle. Die Kostenfunktion, die bei dem obigen Beispiel verwendet wurde, war Eins.

**[0099]** Wie oben bei Schritt 1028 erörtert wurde, werden die Verzweigungsspannungswerte, die möglicherweise nicht zu erfassbaren Änderungen führen, auf Null gesetzt oder einer Null-Rangordnungszahl zugewiesen. Ein Prozess gemäß Faustregel zum Bestimmen, welche Verzweigungsspannungswerte auf Null gesetzt werden sollen, basiert auf der Gleichung 27.

$$\frac{2tV_b}{100} > \text{Schwelle} \quad \text{Gl. 27}$$

wobei  $V_b$  der Verzweigungsspannungswert ist, der geprüft wird, und  $t$  die Toleranz ist, in Prozent, der Vorrichtung, die die Verzweigung ist, die geprüft wird. Schwelle ist eine vorbestimmte Zahl, die die Genauigkeit der Messhardware reflektiert. Bei einem bevorzugten Ausführungsbeispiel, wenn die Testerhardware keine Spannungsdifferenzen kleiner als 1 Mikrovolt erfassen kann, dann würde Schwelle mit 1 Mikrovolt ausgewählt werden.

**[0100]** Bei einem bevorzugten Ausführungsbeispiel wird ein effizientes Verfahren zum Berechnen von Tabelle 2 verwendet. Ein Modell des Clusters in der Form der vereinfachten Darstellung aus Gleichung 1 ist der Startpunkt. Gleichung 1 ist noch mal der Zweckmäßigkeit halber gegeben.

$$\begin{bmatrix} K_i & -K_v A^T \\ A & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} I_b \\ V_n \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} S \\ 0 \end{bmatrix} \quad \text{Gl. 1}$$

**[0101]** Es wird darauf hingewiesen, dass durch Anordnen der Zeilen aus Gleichung 1, um die Verzweigungsströme der getesteten Komponenten und die Verzweigungsströme der Stromquellenverzweigungen zu trennen, (angenommen, es gibt keine Spannungsquellen)  $I_b$  geschrieben werden kann als:

$$I_b = \begin{bmatrix} I_{(b,test)} \\ -J \end{bmatrix} \quad \text{Gl. 28}$$

wobei  $I_{(b, \text{test})}$  die eingestellten Verzweigungsströme der getesteten Komponenten in Vektorform sind und  $-J$  der Satz aus Verzweigungsströmen in den Stromquellenverzweigungen (in Vektorform) ist. Ein einfaches Unterteilen in  $K_i$ ,  $K_v$  und  $A$  ergibt:

$$K_i = \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ 0 & 1 \end{bmatrix} \quad \text{Gl. 29}$$

$$K_v = \begin{bmatrix} K_{(v, \text{test})} & 0 \\ 0 & 0 \end{bmatrix} \quad \text{Gl. 30}$$

$$A = [A_{(b, \text{test})} \ A_J] \quad \text{Gl. 31}$$

wobei 1 eine Identitätsmatrix ist, so dass  $K_i$  gleich einer Identitätsmatrix ist.  $K_{(v, \text{test})}$  ist die Teilmatrix von  $K_v$ , die den getesteten Komponenten entspricht. Die Einträge in  $K_v$ , die den Stromquellen entsprechen, sind Null. Ein Einsetzen der Gleichungen 29–31 in die Gleichung 1 und ein Vereinfachen ergibt:

$$\begin{bmatrix} 1 & -K_{(v, \text{test})}A_{(b, \text{test})}^T \\ A_{(b, \text{test})} & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} I_{(b, \text{test})} \\ V_n \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 \\ A_J J \end{bmatrix} \quad \text{Gl. 32}$$

**[0102]** Es wird daran erinnert, dass  $A_{(b, \text{test})}$ ,  $I_{(b, \text{test})}$  und  $K_{(v, \text{test})}$  normalerweise den getesteten Komponenten entspricht und nicht einem Abschnitt des Stimulus entspricht. Verzweigungsspannungen beziehen sich auf Knotenspannungen durch:

$$V_b = A^T V_n \quad \text{Gl. 33}$$

**[0103]** Gleichung 33 kann in die Verzweigungsspannungen der getesteten Komponenten und die Verzweigungsspannungen der Stromquellenverzweigungen auf die Art und Weise unterteilt werden wie  $I_b$  in Gleichung 2 unterteilt wurde, um folgendes zu ergeben:

$$V_b = \begin{bmatrix} v_b \\ v_J \end{bmatrix} = A^T V_n = \begin{bmatrix} A_{(b, \text{test})}^T \\ A_J^T \end{bmatrix} V_n \quad \text{Gl. 34}$$

**[0104]** Das Auflösen von Gleichung 32 nach

$$\begin{bmatrix} I_{(b, \text{test})} \\ V_n \end{bmatrix}$$

und ein Partitionieren ergibt:

$$\begin{bmatrix} I_{(b, \text{test})} \\ V_n \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & -K_{(v, \text{test})}A_{(b, \text{test})}^T \\ A_{(b, \text{test})} & 0 \end{bmatrix}^{-1} \begin{bmatrix} 0 \\ A_J J \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \vdots & \vdots & \vdots \\ \dots & \dots & \dots \\ \vdots & \vdots & w \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 0 \\ A_J J \end{bmatrix} \quad \text{Gl. 35}$$

**[0105]** Es ergibt sich aus Gleichung 34 und Gleichung 35, dass:

$$V_b = A_{(b, \text{test})}^T V_n = A_{(b, \text{test})}^T W A_J J \quad \text{Gl. 36}$$

**[0106]** Bei einem bevorzugten Ausführungsbeispiel wird der Stimulus an jeweils eine Quelle angewendet, so dass der Vektor  $J$  einen einzelnen Eintrag ungleich Null aufweist, der dem Verzweigungsstrom zugeordnet ist, und ansonsten Null ist. Das Anwenden dieses Stimulus resultiert in einem Vektor der Verzweigungsspannung  $v_b$ . Wenn  $J$  als eine Matrix von Einzelstimuluspositionen definiert wäre, wo der Stimulus nur an möglichen Stimuluspositionen ist, wie in Gleichung 37 gezeigt ist, besteht nun eine Einzelstromquelle an jeder möglichen Stimulusposition.

$$J_{matrix} = \begin{bmatrix} J_1 & 0 & 0 & \dots & 0 \\ 0 & 0 & 0 & & J_{n(n-1)/2} \\ \vdots & \vdots & \vdots & & 0 \\ 0 & 0 & J_3 & \dots & 0 \\ 0 & J_2 & 0 & \dots & 0 \end{bmatrix} \quad \text{Gl. 37}$$

**[0107]** Wenn  $v_b$  berechnet wird unter Verwendung von  $J_{matrix}$  aus Gleichung 37, ist das Ergebnis eine Matrix, wo die Zeilen Verzweigungsspannungen sind und die Spalten die möglichen Quellenkonfigurationen sind. Der Zweckmäßigkeit halber könnte  $J_{matrix}$  ebenfalls so angeordnet sein, dass es diagonal wäre. Wenn dies transponiert wird, resultiert daraus eine Matrix mit Einträgen in der Form von Tabelle 2:

$$\text{Tabelle} = (A_{(b, \text{test})}^T W A J_{matrix})^T \quad \text{Gl. 38}$$

**[0108]** Gleichung 38 kann ausgedehnt werden, um mehrere Frequenzen zu unterstützen. Das ursprüngliche Gleichungssystem kann verwendet werden, um mehrere Frequenzen zu analysieren, durch Wiederholen der Berechnungen mit dem Stimulus an unterschiedlichen Frequenzen.

**[0109]** Die vorangehenden Erörterungen waren hauptsächlich auf den Fall konzentriert, bei dem die angewendete Stimulus- und Mess-Hardware ideal sind oder vernachlässigbare nicht-ideale Eigenschaften aufweisen. Aufgrund von praktischen Betrachtungen jedoch, die den Entwurf und Aufbau von moderner Testhardware umfassen, können sowohl die Hardware zum Anwenden eines Stimulus als auch die Messvorrichtung bedeutende nicht-ideale Eigenschaften aufweisen. Diese nicht-idealen Eigenschaften werden Parasitär-Effekte genannt. Diese Situation ist dargestellt in [Fig. 11A](#) und [Fig. 11B](#) gemäß einem Ausführungsbeispiel der vorliegenden Erfindung. [Fig. 11A](#) und [Fig. 11B](#) zeigen dieselbe Situation, außer dass in [Fig. 11A](#) der ideale Stimulus als eine Spannungsquelle **1104**  $V_s$  in Reihe mit einem Quellimpedanzwiderstand **1106**  $R_s$  gezeigt ist. In [Fig. 11B](#) ist der ideale Stimulus gezeigt als das Thevenin-Äquivalent des Stimulus in [Fig. 11A](#) – eine Stromquelle **1118** parallel zu dem Quellimpedanzwiderstand **1120**, ebenfalls  $R_s$ .

**[0110]** Sowohl in [Fig. 11A](#) als auch [Fig. 11B](#) ist der Satz von Komponenten, die getestet werden, im Allgemeinen gezeigt als Form **1102**. Die nicht-idealen Eigenschaften der Stimulushardware sind gezeigt als Widerstände **1114**,  $Z_i$ , **1116**,  $Z_g$  und Kapazität **1108**  $y_s$  gezeigt. Die nicht-idealen Eigenschaften der Messhardware sind gezeigt als Kapazität **1112**,  $y_d$ , verbunden mit einem Knoten aus dem Satz von Komponenten, die getestet werden, und dem Referenzknoten. Da die dominante Komponente der nicht-idealen Eigenschaften des Detektors und der Quelle dazu neigt, Kapazität zu sein, sind  $y_s$  und  $y_d$  als kapazitiv gezeigt. Diese könnten jedoch ebenfalls resistive und induktive Eigenschaften umfassen.  $Z_i$  und  $Z_g$  stellen verschiedene Widerstände dar, die dem Anwenden des Stimulus an die Schaltung zugeordnet sind, die getestet wird.

**[0111]** Diese nicht-idealen Eigenschaften der Stimulushardware sowie der Stimulus selbst können in dem Modell des Komponentensatzes umfasst sein. Die Werte für  $Z_i$  und  $Z_g$  können sich jedoch jedes Mal ändern, wenn eine Platine getestet wird, da der Widerstand zwischen einer Platine und dem Sondenstift, unter anderem, sich jedes Mal ändern kann, wenn eine Platine in der Testhalterung platziert wird. Abschließend, in einem Fall, in dem weniger Detektoren als Knoten vorliegen, die gemessen werden müssen, bewegen sich die nicht-idealen Eigenschaften der Messhardware von Knoten zu Knoten mit jeder Messposition. Dies bedeutet, der Wert von  $y_d$  ändert sich von Messposition zu Messposition. Die Werte von  $y_d$  und  $y_s$  ändern sich ebenfalls jedes Mal, wenn eine Testhalterung befestigt wird. Dementsprechend, anstelle alle diese nicht-idealen Eigenschaften in das Modell einzuschließen, wenn der Testprogrammgenerator läuft, wird bei einem bevorzugten Ausführungsbeispiel eine Testzeitkorrektur innerhalb der Fehleranalyseroutinen abgespielt, um die Werte, die durch die Messhardware gemessen werden, in Werte zu übersetzen, die gemessen worden wären, wenn die Mess- und Stimulus-Hardware ideal wären. Diese korrigierten Werte können dann mit den  $U^*$ -Matrizen und Testgrenzen verwendet werden, erzeugt aus einem Modell ohne diese nicht-idealen Eigenschaften.

**[0112]** [Fig. 15](#) stellt einen Prozess dar, der diese nicht-idealen Eigenschaften korrigiert, um eine korrigierte Version der gemessenen Spannungen an zugreifbaren Knoten zu erzeugen, die sich den Spannungen annähert, die an den gemessenen zugreifbaren Knoten wären, wäre die Mess- und Stimulus-Hardware ideal konsistent mit einem Ausführungsbeispiel der vorliegenden Erfindung gewesen. Bevor die gemessenen Spannungen korrigiert werden, werden üblicherweise mehrere Messungen ausgeführt, um die Testhardware zu charakterisieren. Eine dieser Messungen wird von der Quellspannung  $V_s$  genommen. Dies ist eine AC-Spannung, so dass spätere Messungen, die mit dieser Spannung angelegt durchgeführt werden, verwendet werden können, um die Kapazität an bestimmten Knoten zu berechnen. Genauer gesagt wird dieser gemessene Wert verwen-

det, um die Testkopfkapazität sowohl für die Quelle als auch den Detektor zu berechnen.

**[0113]** Verschiedene andere hardwareabhängige Messungen können ebenfalls durchgeführt werden. Diese Messungen erlauben eine Berechnung der Parasitär-Kapazität an jedem Quellknoten und dem Referenzknoten aufgrund der Testerhardware. Dies liefert den  $y_s$ -Wert für jede angewendete Stimulusposition. Auf ähnliche Weise erlauben diese Messungen auch die Berechnung der Parasitärkapazität an jedem Messknoten aufgrund der Testerhardware. Dies liefert den  $y_d$ -Wert für jeden Knoten, der durch die Messhardware gemessen wird. Da die Parasitär-Kapazität des Detektors von Messknoten zu Messknoten variiert, wird die Schreibweise  $y_{(x,d)}$  verwendet, um den Wert der Parasitär-Kapazität an Knoten X anzuzeigen (in Admittanzform) aufgrund der Tatsache, dass der Detektor mit diesem Knoten verbunden ist. Die Quellkapazität variiert von Stimulusposition zu Stimulusposition. Die nachfolgende Erörterung richtet sich jedoch nur auf eine Quellstimulusposition, so dass nur die Schreibweise  $y_s$  verwendet wird, um die Quellkapazität anzuzeigen (in Admittanzform). Dieser Prozess kann auf mehr Stimuluspositionen ausgedehnt werden, unter Verwendung unterschiedlicher Werte von  $y_s$  und unterschiedlicher Einfallsmatrizen für jede Stimulusposition.

**[0114]** Nachdem diese Charakterisierungsmessungen durchgeführt wurden, kann ein Stimulus an eine Platine angewendet werden und Messungen an derselben durchgeführt werden. Diese Messungen können dann für die nicht-idealen Eigenschaften der Testumgebung gemäß [Fig. 15](#) korrigiert werden.

**[0115]** Bei einem Schritt **1502** werden die Spannungsmessungen durchgeführt. Diese Messungen werden mit dem Stimulus angewendet an die Platine durchgeführt. Die Ergebnisse dieser Messungen werden in einem Vektor gespeichert,  $V'_m$ . Um ein individuelles Element dieses Vektors anzuzeigen, z.B. die Knotenspannung an Knoten X, wird die Schreibweise  $V'_{(x,m)}$  bei dieser Erörterung verwendet. Eine ähnliche Schreibweise wird verwendet, um individuelle Elemente anderer Vektorquantitäten anzuzeigen.

**[0116]** Zusätzlich zu dem Messen der Knotenspannungen an den zugreifbaren Knoten an der Platine (oder alternativ dem Cluster oder dem reduzierten Cluster), die getestet wird, werden Messungen von dem Referenzknoten an der Platine  $V'_g$ , der angewendeten Stimulusspannung an der Platine  $V'_s$  und der Spannung an der entgegengesetzten Seite des Referenzwiderstands von der Stimulusquelle  $V'_g$ . Bei einem Schritt **1504** wird die Messung, die an der gegenüberliegenden Seite des Referenzwiderstands  $V'_r$  durchgeführt wird, unter Verwendung von Gleichung 39 korrigiert, im Hinblick auf die Wirkungen der Detektorkapazität, als die Spannung  $V'_r$  gemessen wurde. Die Detektorkapazität, als die Spannung  $V'_r$  gemessen wurde, ist  $y_{(r,g)}$ .

$$V''_r = \frac{V'_s * V'_r}{V'_s - (Y_{(r,d)} * R'_s * V'_r)} \quad \text{Gl. 39}$$

**[0117]** Bei einem Schritt **1506** wird eine Z-Matrix berechnet unter Verwendung der Nennwerte der Platinenkomponenten, von Standardwerten für  $Z_i$  und  $Z_g$  und einem gemessenen Wert des Referenzwiderstands  $R'_s$ . Standardwerte für  $Z_i$  und  $Z_g$  können entwickelt werden durch Messen und Mitteln von  $Z_i$  und  $Z_g$  für eine Anzahl von unterschiedlichen Wegen von einer Quelle zu einer getesteten Platine. Die Darstellung sollte ebenfalls Einträge für  $y_d$  und  $y_s$  enthalten. Der Eintrag für  $y_s$  kann eine Spalte in der Einfallsmatrix sein, die eine Verbindung zwischen  $V_r$  und dem Referenzknoten und einem Eintrag in die  $K_v$ -Matrix von Null definiert. Der Eintrag für  $y_d$  kann eine Spalte in der Einfallsmatrix sein, die ausschließlich Nullen enthält, und ein Eintrag in der  $K_v$ -Matrix von Null. Dies ermöglicht, dass der Wert  $y_{(x,d)}$  in eine spätere Gleichung eingefügt wird, um die korrigierte Knotenspannung an dem Knoten X zu berechnen, ohne erneut eine Z-Matrix berechnen zu müssen oder verschiedene andere Schritte zu wiederholen, die in [Fig. 15](#) gezeigt sind. Bei einem Schritt **1508** wird die gemessene Spannung an dem Referenzknoten an der Platine  $V'_g$  und die gemessene Spannung an dem Stimulusknoten an der Platine  $V'_i$  korrigiert, um die Wirkungen der Detektorkapazität  $y_d$  und der Quellkapazität  $y_s$  zu beseitigen.  $V'_g$  wird korrigiert unter Verwendung von Gleichung 40.  $V'_i$  wird korrigiert unter Verwendung von Gleichung 41.

$$V''_g = V'_g \cdot (1 - Z_{(g,d)} \cdot y_{(g,d)}) - (Z_{(g,s)} \cdot y_s \cdot V''_r) \quad \text{Gl. 40}$$

$$V''_i = V'_i \cdot (1 - Z_{(i,d)} \cdot y_{(i,d)}) - (Z_{(i,s)} \cdot y_s \cdot V''_r) \quad \text{Gl. 41}$$

**[0118]** In Gleichung 40 und 41 ist  $Z_{(g,d)}$  der Eintrag in die letzte berechnete Z-Matrix, der dem Knoten  $V_g$  und der Spalte entspricht, die der Verzweigung  $y_d$  entspricht. Auf ähnliche Weise ist  $Z_{(i,d)}$  der Eintrag in die letzte berechnete Z-Matrix, der dem Knoten  $V_i$  und der Spalte entspricht, die der Verzweigung  $y_d$  entspricht.  $Z_{(g,f)}$  ist der Eintrag in die letzte berechnete Z-Matrix, der dem Knoten  $V_g$  entspricht und der Spalte, die der Verzweigung  $y_s$  entspricht.  $Z_{(i,s)}$  ist der Eintrag in die letzte berechnete Z-Matrix, der dem Knoten  $V_i$  und der Spalte entspricht, die der Verzweigung  $y_s$  entspricht.

**[0119]** Bei einem Schritt **1510** wird  $V_r''$  korrigiert im Hinblick auf die Wirkungen der Quellskapazität  $y_s$  unter Verwendung von Gleichung 42.

$$V_r^* = \frac{V_s' \cdot V_r''}{V_s' - (Y_s \cdot R_s' \cdot V_r^*)} \quad \text{Gl. 42}$$

**[0120]** Bei einem Schritt **1512** werden  $Z_i$  und  $Z_g$  berechnet unter Verwendung der Gleichungen 43 bzw. 44.

$$Z_i = \frac{R_s'(V_r^* - V_i'')}{V_s' - V_r^*} \quad \text{Gl. 43}$$

$$Z_g = \frac{R_s' V_g''}{V_s' - V_r^*} \quad \text{Gl. 44}$$

**[0121]** Bei einem Schritt **1514**, wenn dies eine erste Berechnung von  $Z_i$  und  $Z_g$  war, dann muss der Prozess noch einmal iterieren und fährt mit Schritt **1516** fort. Wenn dies das zweite Mal ist, dass  $Z_i$  und  $Z_g$  berechnet wurden, dann fährt der Prozess mit Schritt **1518** fort.

**[0122]** Bei einem Schritt **1516** wird eine Z-Matrix berechnet unter Verwendung von Werten für  $Z_i$  und  $Z_g$ , die soeben berechnet wurden. Diese Werte für  $Z_i$  und  $Z_g$  sollten in die Darstellung als Admittanzen in der  $K_v$ -Matrix eingesetzt werden. Der Prozess geht dann in der Schleife zurück zu Schritt **1508**, wo die soeben berechnete Z-Matrix einige der Ausdrücke in Gleichungen 42 und 43 liefert.

**[0123]** Bei einem Schritt **1518** wird eine wiederum weitere Z-Matrix berechnet. Diese Matrix wird berechnet unter Verwendung von  $Z_i$  und  $Z_g$  aus der zweiten Iteration der Schritte **1508** bis **1512**. Der gemessene Wert des Referenzwiderstands  $R_s'$  wird ebenfalls in der Berechnung der Z-Matrix verwendet. Diese Matrix wird dann reduziert, um nur jene Zeilen zu umfassen, die Knoten entsprechen, die bei Schritt **1502** gemessen wurden. Diese reduzierte Matrix ist  $Z_{\text{corr}}$ .

**[0124]** Bei einem Schritt **1520** wird eine erste Korrektur an jeder gemessenen Knotenspannung berechnet. Wenn  $V_{(x,m)}'$  die gemessene Spannung an Knoten X ist, dann wird die erste Korrektur berechnet gemäß Gleichung 45.

$$V_{(x,m)}'' = V_{(x,m)}' \cdot Z_{(x,d)} \cdot Y_{(x,d)} - V_r^* \cdot Z_{(x,s)} \cdot Y_s \quad \text{Gl. 45}$$

**[0125]** Bei einem Schritt **1522** wird ein gemessener Wert des Stroms, der durch den Referenzwiderstand  $I_s'$  fließt, berechnet unter Verwendung des Ohmschen Gesetzes aus dem Messwert der Quelle  $V_s'$ , und dem gemessenen Wert des Referenzwiderstands  $R_s'$ .  $I_s'$  wird dann in einen Quellvektor  $S'$  platziert. Der Quellvektor  $S'$  wird erzeugt durch Platzieren von  $I_s'$  in einen Vektor mit einer Spalte und einer Zeile gemäß jeder Verzweigung in der Schaltung.  $I_s'$  wird in der Zeile platziert, die der Stimulusverzweigung entspricht. Der Rest der Zeileneinträge ist Null.

**[0126]** Bei einem Schritt **1524** wird eine modifizierte Modellspannung berechnet für jeden gemessenen Knoten unter Verwendung von Gleichung 46.  $V_{\text{mod}}$  ist ein Vektor, bei dem eine Spalte und jede Zeile einem gemessenen Knoten entspricht.

$$V_{\text{mod}} = Z_{\text{corr}} S' \quad \text{Gl. 46}$$

**[0127]** Bei einem Schritt **1526** wird ein Korrekturfaktor  $C_i$  für jeden Messknoten berechnet. Dieser Korrekturfaktor ist einfach der ideale Wert für jede Messknotenspannung, modelliert durch eine Darstellung mit Nennkomponenten und ohne Detektor- oder Quell-Parasitär-Effekte, geteilt durch die modifizierte Modellspannung für diesen Knoten. Dies ist gezeigt in Gleichung 47.

$$C_x = \frac{V_{(x,ideal)}}{V_{(x,mod)}} \quad \text{Gl. 47}$$

**[0128]** Abschließend wird bei einem Schritt **1528** ein korrigierter Wert für jede gemessene Knotenspannung unter Verwendung von Gleichung 48 erzeugt.

$$V_{(x, \text{corrected})} = C_x V''_{(x, m)}$$

Gl. 48

**[0129]** Diese Werte können dann verwendet werden, um den Vektor  $\Delta V_{(n, ac, meas)}$  zu erzeugen, der mit den verschiedenen  $U^*$ -Matrizen multipliziert werden kann und gegen Grenzen geprüft werden kann, die unter Verwendung eines Darstellungs-Modells erzeugt wurden, das nicht die nicht-idealen Eigenschaften der Testhardware umfasste.

**[0130]** Viele Messsysteme weisen einen gewissen Fehler in den Messungen auf, die sie durchführen. Dieser Fehler bedeutet, dass eine berichtete Messung von z.B. 0,15 Volt z.B. einer tatsächlichen Knotenspannung von so wenig wie 0,149 Volt oder so viel wie 0,151 Volt entsprechen könnte. Dementsprechend könnte jede individuelle gemessene Knotenspannung bei  $V'_m$  innerhalb eines Bereichs mit einem Minimum und einem Maximum sein. Zum Beispiel könnte Knoten X innerhalb des Bereichs sein, gegeben durch Gleichung 49.

$$V'_{(X, m, \min)} \leq V'_{(X, m, \text{actual})} \leq V'_{(X, m, \max)}$$

Gl. 49

**[0131]** Diese Minima und Maxima können berechnet werden aus  $V'_{(X, m)}$ , das zu der Messhardware zurückgesendet wird. Sie können dann durch das Verfahren weitergegeben werden, detailliert angegeben in [Fig. 15](#) oben, um  $V_{\text{corr}, \min}$  und  $V_{\text{corr}, \max}$  zu ergeben.  $V_{\text{corr}, \min}$  und  $V_{\text{corr}, \max}$  können dann verwendet werden, um  $\Delta V_{\min}$  und  $\Delta V_{\max}$  zu ergeben. Diese Bereiche für die individuellen Elemente von  $\Delta V$  können als die Beschränkungen bei einem linearen Programmierungsproblem verwendet werden, um ein Minimum  $U^* \Delta V$  und ein Maximum  $U^* \Delta V$  zu finden. Gleichungen 50 und 51 können dann verwendet werden, um zu regeln, ob ein bestimmter Eintrag in  $U^* \Delta V$  als Null oder Ungleich-Null betrachtet werden sollte.

$$Y_{(ac, f, \min)} \leq LP_{\min}(U^*_{(ac, f)} \Delta V) \leq Y_{(ac, f, \max)}$$

Gl. 50

$$Y_{(ac, f, \min)} \leq LP_{\max}(U^*_{(ac, f)} \Delta V) \leq Y_{(ac, f, \max)}$$

Gl. 51

wobei  $LP_{\min}(U^* \Delta V)$  und  $LP_{\max}(U^* \Delta V)$  die minimierten und maximierten Ergebnisse des linearen Programmierungsproblems sind. Anders ausgedrückt, wenn ein bestimmtes Element des Ergebnisses der Minimierung von  $U^* \Delta V$  gemäß den Beschränkungen von  $\Delta V_{\min}$  und  $\Delta V_{\max}$  größer oder gleich  $Y_{(ac, f, \min)}$  ist und das Ergebnis der Maximierung von  $U^* \Delta V$  gemäß den Beschränkungen von  $\Delta V_{\min}$  und  $\Delta V_{\max}$  kleiner oder gleich  $Y_{(ac, f, \max)}$  für dieses bestimmte Element und diesen bestimmten Fehler „f“ ist, dann sollte eine Null betrachtet werden. Auf diese Weise kann der Messfehler des Detektors berücksichtigt werden und trotzdem mit den Verfahren verwendet werden, die oben detailliert ausgeführt sind.

**[0132]** Bezug nehmend zurück auf die Erörterung von [Fig. 2](#) wird wiederholt, dass bei einem Schritt **206** die Schaltung in elektrisch isolierte Gruppen von Komponenten unterteilt wurde, genannt „Cluster“. Laut Definition weist ein Cluster zumindest einen Knoten auf, der nicht zugreifbar ist und nicht mehr als einen Weg aufweist, der denselben mit einem anderen Cluster verbindet. Es wird ferner wiederholt, dass diese Cluster weiter bei einem Schritt **208** unterteilt wurden, durch Erzeugen von kleineren „reduzierten“ Clustern, die weniger Komponenten enthalten und weniger zugreifbare Knoten zum Testen benötigen, wodurch die rechentechnische Komplexität und Ausführungszeit reduziert wird, die notwendig ist zum Erzeugen der Äquivalenzklassen,  $U^*$ -Matrizen und Testgrenzen. Um beim Reduzieren der Größe der Cluster zu helfen, werden üblicherweise verschiedene Regeln beim Erzeugen von Clustern befolgt.

**[0133]** Die erste Regel befasst sich mit offenen oder scheinbar offenen Vorrichtungen. Bei einem bevorzugten Ausführungsbeispiel sind die Testspannungen, die durch die Testhardware angelegt werden, klein genug, dass aktive Vorrichtungen, wie z.B. Transistoren und integrierte Schaltungen, nicht aktiviert werden. Als solches können diese aktiven Vorrichtungen entweder im Hinblick auf ihre Parasitär-Effekte oder als Leerlauf- oder Schein-Leerlauf-Vorrichtungen modelliert werden. Daher werden die meisten integrierten Schaltungsvorrichtungen, nicht-platzierte Jumper, Leerlauf-Schalter und Verbinder als Leerlauf-Vorrichtungen betrachtet. Wenn eine Vorrichtung eine intrinsische Impedanz aufweist oder wesentliche parasitäre Effekte aufweist, sollte sie nicht als eine Leerlauf-Vorrichtung betrachtet werden und sollte in der Schaltungstopologie beschrieben werden. Ein Beispiel davon wäre eine integrierte Einkreissschaltung, die einen eingebauten Widerstand zwischen bestimmten Stiften aufweist. Andere Schein-Leerlauf-Vorrichtungen umfassen aktive Vorrichtungen, wie z.B. Transistoren, Dioden, Zener-Dioden und Verbesserungs-Moden-Feldeffekt-Transistoren (FETs). Leerlauf- und Schein-Leerlauf-Vorrichtungen werden aus der Schaltungstopologie während des Cluster-Erzeugungsprozesses entfernt, da sie nicht zu der Cluster-Topologie beitragen. Wenn diese Vorrichtungen beseitigt werden, hilft dies beim Verringern der Größe der Cluster, da weniger Verbindungen in der Schaltung vorliegen.



**[0134]** Um zu verhindern, dass aktive Vorrichtungen aktiviert werden, sollten die angelegten Testspannungen immer niedriger als die 0,7 Volt gehalten werden, die üblicherweise erforderlich sind, um einen P-N-Übergang einer Silizium-Diode vorwärts vorzuspannen. Testspannungen, die kleiner oder gleich 0,2 Volt sind, sind sogar noch wünschenswerter.

**[0135]** Schaltungen mit aktiven Vorrichtungen, die aus anderen Materialien hergestellt sind, wie z.B. Gallium-Arsenid, oder basierend auf anderen Techniken, wie z.B. Vakuumröhren oder beidem, können unterschiedliche Einschaltspannungen aufweisen, und die maximale Testspannung kann entsprechend eingestellt werden.

**[0136]** Die zweite Regel befasst sich mit kurzgeschlossenen oder scheinbar kurzgeschlossenen Vorrichtungen. Kurzgeschlossene Vorrichtungen umfassen Sicherungen, Jumper und geschlossene Schalter. Scheinbar kurzgeschlossene Vorrichtungen umfassen Vorrichtungen, die eine Impedanz aufweisen, die unter einem Schwellenwert ist. Dieser Schwellenwert kann als eine Umgebungsvariable eingestellt sein, oder durch eine andere Form einer Eingabe in das Testerzeugungsprogramm spezifiziert sein. Bei einem bevorzugten Ausführungsbeispiel betrachtet die voreingestellte Schwelle jede Vorrichtung mit einer Impedanz von weniger als einem Ohm als einen Schein-Kurzschluss.

**[0137]** Die dritte Regel befasst sich mit variablen Vorrichtungen. Diese umfassen üblicherweise variable Widerstände, Potentiometer, variable Kondensatoren und variable Induktoren. Diese Vorrichtungen können nicht an einen nicht-zugreifbaren Knoten angebracht werden, aber sie können Teil einer Cluster-Topologie sein. Bei einem Ausführungsbeispiel der vorliegenden Erfindung, wenn eine variable Vorrichtung mit einem nicht-zugreifbaren Knoten verbunden ist, wird ein Fehlerzustand erzeugt und der Benutzer benachrichtigt, dass ein anderer zugreifbarer Knoten notwendig ist, um die variable Vorrichtung zu testen.

**[0138]** [Fig. 12](#) ist ein Flussdiagramm, das einen Prozess zum Erzeugen von Clustern aus einer Platinen-Topologie gemäß einem Ausführungsbeispiel der vorliegenden Erfindung darstellt. Der Prozess beginnt mit dem Erzeugen eines Clusters aus der existierenden Platinen-Topologie bei einem Schritt **1202**. Bei einem Schritt **1204** wählt der Prozess eine Startvorrichtung aus, durch Durchsuchen der Platinen-Topologie nach einer Vorrichtung, die mit einem zugreifbaren Knoten und einem nicht-zugreifbaren Knoten verbunden ist. Bei einem Schritt **1206** wird eine topologische Darstellung erzeugt. Eine topologische Darstellung stellt Vorrichtungen, Knoten und ihre Verbindung dar. Bei einem bevorzugten Ausführungsbeispiel ist diese topologische Darstellung ein Topologie-Graph.

**[0139]** Der Topologie-Graph wird erzeugt durch Addieren der Startvorrichtung zu einem leeren, nicht-gerichteten Graphen. Vorrichtungen werden zu dem Topologie-Graph als Kanten hinzugefügt, und die Knoten, die mit dieser Vorrichtung verbunden sind, werden zu dem Topologie-Graphen als Scheitelpunkte hinzugefügt. Die Vorrichtungen, die mit den Startvorrichtungen verbunden sind, werden zu dem Graphen addiert. Dann werden die Vorrichtungen, die mit diesen Vorrichtungen verbunden sind, addiert, usw., bis alle Vorrichtungen, die einen Weg zu der Startvorrichtung verfolgen können, addiert wurden. Wenn Vorrichtungen zu dem Graph addiert werden, wird die erste oben angegebene Regel befolgt, so dass Leerlauf- oder Schein-Leerlauf-Vorrichtungen nicht zu dem Graphen addiert werden. Dies hat die Wirkung des „Entfernens“ von Leerlauf- oder Schein-Leerlauf-Vorrichtungen aus der Platinen- und Cluster-Topologie. Ferner werden lose Komponenten nicht zu der Cluster-Topologie addiert. Dies hat die Wirkung des Entfernens von losen Komponenten von der Cluster-Topologie.

**[0140]** Sobald er aufgebaut ist, wird der Graph gemäß der zweiten oben angegebenen Regel bei einem Schritt **1208** reduziert. Bei einem Schritt **1208** werden Kanten, die Kurzschluss- und Schein-Kurzschluss-Vorrichtungen zugeordnet sind, aus dem Graphen entfernt, und die Scheitelpunkte dieser Vorrichtungen werden zu einem einzelnen Scheitelpunkt kombiniert. Dies beseitigt effektiv jegliche Vorrichtungen, die durch diese Vorrichtungen aus der Cluster-Topologie kurzgeschlossen werden.

**[0141]** Bei einem Schritt **1210** wird der Topologie-Graph rekursiv überquert, beginnend mit dem nicht-zugreifbaren Knoten, der mit der Startvorrichtung verbunden ist. Wenn der Graph überquert wird, stoppt die Rekursion bei zugreifbaren Knoten, fährt jedoch abwärts an Kanten (Vorrichtungen) fort, die mit nicht-zugreifbaren Knoten verbunden sind. Auf diese Weise werden alle zugreifbaren Knoten, die entlang eines Wegs von dem nicht-zugreifbaren Start-Knoten durch alle nicht-zugreifbaren Knoten erreicht werden können, überquert. Bei einem Schritt **1212** werden die zugreifbaren Knoten, an denen gestoppt wurde, in eine Liste aus möglichen Testpunkten platziert.



**[0142]** Die Prinzipien, die verwendet werden, um den Topologie-Graphen (und die anderen Graphen, die in aufeinanderfolgenden Schritten und in [Fig. 13](#) aufgebaut und überquert werden) aufzubauen und überqueren, können mit unterschiedlichen topologischen Darstellungen und unterschiedlichen Überquerungsverfahren verwendet werden. Diese Darstellungen und Überquerungsverfahren sind in der Technik bekannt.

**[0143]** Bei einem Schritt **1214** werden alle Wege zwischen jeglichen zwei Knoten in der Liste von möglichen Testpunkten gefunden. Bei einem Schritt **1216** werden alle Vorrichtungen entlang dieser Wege derart markiert, dass sie in dem Cluster sind, das erzeugt wird. Bei einem Schritt **1218** werden jegliche zugreifbaren Knoten entlang oder am Ende der Wege, die bei Schritt **1214** gefunden werden, die nicht bereits in der Liste von möglichen Testpunkten sind, zu der Liste von möglichen Testpunkten addiert.

**[0144]** Bei einem Schritt **1220** werden nicht-zugreifbare Knoten, die vorangehend bei Schritt **1210** oder Schritt **1220** nicht überquert wurden (nicht-überquerte Knoten) als Startpunkt zum Überqueren des Topologie-Graphen verwendet. Der Topologie-Graph wird rekursiv überquert, beginnend mit dem nicht-überquerten, nicht-zugreifbaren Knoten. Wenn der Graph überquert wird, stoppt die Rekursion an zugreifbaren Knoten, fährt jedoch abwärts an Kanten (Vorrichtungen) fort, die mit nicht-zugreifbaren Knoten verbunden sind. Auf diese Weise werden alle zugreifbaren Knoten, die entlang eines Wegs von dem nicht-überquerten nicht-zugreifbaren Start-Knoten bis zu ausschließlich nicht-zugreifbaren Knoten erreichbar sind, überquert. Bei einem Schritt **1222** werden die zugreifbaren Knoten, an denen gestoppt wurde, in die Liste von möglichen Testpunkten platziert, wenn sie nicht bereits dort waren.

**[0145]** Wenn jegliche Knoten zu der Liste von möglichen Testpunkten bei Schritt **1218** oder Schritt **1220** hinzugefügt wurden, geht der Prozess in der Schleife zurück zu Schritt **1214**. Wenn keine Knoten zu der Liste von möglichen Testpunkten hinzugefügt wurden, bewegt sich der Prozess zu Schritt **1226**, wo alle Vorrichtungen, die derart markiert sind, dass sie in dem Cluster sind, das erzeugt wird, gespeichert und dann aus der Platinen-Topologie beseitigt werden. Bei einem Schritt **1228**, wenn keine Vorrichtungen in der Platinen-Topologie übrig sind, dann endet der Prozess bei einem Schritt **1230**. Wenn immer noch Vorrichtungen in der Platinen-Topologie übrig sind, dann geht der Prozess zurück in der Schleife zu Schritt **1202**, um das Erzeugen eines neuen Clusters aus den Vorrichtungen zu starten, die in der Platinen-Topologie übrig sind.

**[0146]** In [Fig. 2](#) wird bei einem Schritt **208** jedes Cluster weiter in reduzierte Cluster unterteilt. Ein reduziertes Cluster ist eine Gruppe aus anvisierten Komponenten, die die Größe und Komplexität der Test-Erzeugung, -Messung und -Fehleranalyseprobleme in folgenden Stufen des Testprozesses reduziert. [Fig. 13](#) ist ein Flussdiagramm, das den Prozess zum Erzeugen von reduzierten Clustern aus einem Cluster darstellt, das einem Ausführungsbeispiel der vorliegenden Erfindung entspricht.

**[0147]** Bei einem Schritt **1302** wird ein Topologie-Graph, der die Vorrichtungen in dem Cluster enthält, das in reduzierte Cluster unterteilt wird, erzeugt. Für diese Erörterung wird dies der Cluster-Topologie-Graph genannt. Um den Cluster-Topologie-Graphen zu erzeugen, beginnt der Prozess mit einem leeren, ungerichteten Graphen. Jede Vorrichtung in dem Cluster wird eine nach der anderen zu dem Cluster-Topologie-Graphen addiert. Jede Vorrichtung wird zu dem Cluster-Topologie-Graphen als eine Kante addiert und die Knoten, die mit dieser Vorrichtung verbunden sind, werden zu dem Topologie-Graphen als Scheitelpunkte addiert, wenn sie nicht bereits in dem Cluster-Topologie-Graphen enthalten sind.

**[0148]** Der Prozess zum Erzeugen eines individuellen, reduzierten Clusters beginnt bei einem Schritt **1304**. Bei einem Schritt **1306** wird ein nicht-zugreifbarer Knoten aus dem Cluster-Topologie-Graphen ausgewählt. Bei einem Schritt **1308** wird der Cluster-Topologie-Graph rekursiv überquert, beginnend mit dem ausgewählten, nicht-zugreifbaren Knoten. Wenn der Cluster-Topologie-Graph überquert wird, stoppt die Rekursion an einem zugreifbaren Knoten, fährt jedoch abwärts an Kanten (Vorrichtungen) fort, die mit nicht-zugreifbaren Knoten verbunden sind. Auf diese Weise werden alle zugreifbaren Knoten, die entlang eines Wegs von dem nicht-zugreifbaren Start-Knoten und ausschließlich durch nicht-zugreifbare Knoten erreichbar sind, überquert.

**[0149]** Bei einem Schritt **1310** werden die Vorrichtungen, die bei Schritt **1308** überquert werden, in das aktuelle reduzierte Cluster platziert. Bei einem Schritt **1311** werden die zugreifbaren Knoten, an denen bei Schritt **1308** gestoppt wird, in eine Liste von potentiellen Stimulus-Knoten für dieses reduzierte Cluster platziert. Bei einem Schritt **1312** werden diese Vorrichtungen als ein reduziertes Cluster gespeichert und die Liste aus potentiellen Stimulus-Knoten für dieses reduzierte Cluster wird gespeichert.

**[0150]** Bei einem Schritt **1314** werden die Vorrichtungen (Kanten) der reduzierten Cluster aus dem Cluster-Topologie-Graphen gelöscht. Bei einem Schritt **1316** werden jegliche Knoten (Scheitel), die nicht mehr mit

jeglichen Vorrichtungen verbunden sind, aus dem Cluster-Topologie-Graphen entfernt. Bei einem Schritt **1318**, wenn immer noch nicht zugreifbare Knoten in dem Cluster-Topologie-Graphen übrig sind, geht der Prozess in der Schleife zurück zu Schritt **1304**, um das Erzeugen eines weiteren reduzierten Clusters zu beginnen. Wenn keine nicht-zugreifbaren Knoten in dem Cluster-Topologie-Graphen übrig sind, endet der Prozess bei einem Schritt **1320**. Jegliche Vorrichtungen, die in dem Cluster-Topologie-Graphen übrig sind, wenn der Prozess bei Schritt **1320** endet, können durch herkömmliche schaltungsintegrierte Testtechniken getestet werden.

**[0151]** Verschiedene der Schritte in [Fig. 12](#) und [Fig. 13](#) beziehen sich auf das rekursive Überqueren eines Graphen. Um diese Funktion auf beispielhafte Weise darzustellen, wird der exemplarische ungerichtete Topologie-Graph untersucht, dargestellt in [Fig. 16](#), gemäß einem Ausführungsbeispiel der vorliegenden Erfindung. Die Scheitel des Graphen, dargestellt in [Fig. 16](#), entsprechen Knoten. Die Knotenanzahl ist innerhalb jedes Kreises gezeigt. Zugreifbare Knoten sind mit einem Stern (\*) neben der Knotenanzahl gezeigt. Der Rest der Knoten ist nicht zugreifbar. Die Kanten des Graphen, dargestellt in [Fig. 16](#), sind als Linien gezeigt. Jede Kante entspricht einer Komponente (oder einer Verzweigung). Der Name der Komponente ist neben der Linie gezeigt. Es wird darauf hingewiesen, dass der Topologie-Graph in [Fig. 16](#) der Schaltung entspricht, die in [Fig. 4](#) gezeigt ist, außer mit unterschiedlichen zugreifbaren Knoten.

**[0152]** Es sei angenommen, dass die Überquerung bei Knoten 2 beginnt. Knoten 2 ist ein nicht-zugreifbarer Knoten, so dass alle Verzweigungen (oder Kanten), die mit Knoten 2 verbunden sind, rekursiv überquert werden müssen. Dies bedeutet, dass die Kanten  $R_4$  und  $R_3$  überquert werden müssen. Welcher zuerst überquert wird, ist unwichtig. Wenn  $R_4$  zuerst überquert wird, führt dies zu Knoten 4. Da Knoten 4 ebenfalls nicht-zugreifbar ist, müssen alle Verzweigungen, die mit Knoten 4 verbunden sind, außer der Verzweigung, die verfolgt wird, um zu Knoten 4 zu gelangen, rekursiv überquert werden. Entsprechend wird  $R_5$  dann überquert, was zu Knoten 0 führt.

**[0153]** Da Knoten 0 ein zugreifbarer Knoten ist, stoppt die Überquerung an diesem Knoten und überquert nicht nach unten zu den Verzweigungen, die mit Knoten 0 verbunden sind. Die Überquerung kehrt dann zurück aufwärts zu Knoten 4. Bei Knoten 4 wurden alle Verzweigungen, die mit Knoten 4 verbunden sind, bereits überquert (d.h.  $R_5$ ), so dass die Überquerung zurück zu Knoten 2 kehrt. Bei Knoten 2 wurde  $R_4$  bereits überquert, aber nicht Knoten 3. Daher fährt die Überquerung abwärts an  $R_3$  zu Knoten 3 fort.

**[0154]** Bei Knoten 3 wurden  $R_2$  und  $R_1$  nicht überquert. Wiederum ist unwichtig, welcher zuerst überquert wird. Dementsprechend wird  $R_2$  willkürlich zuerst für dieses Beispiel ausgewählt. Wenn  $R_2$  überquert wird, führt dies zu Knoten 0. Wiederum, da Knoten 0 ein zugreifbarer Knoten ist, werden die Verzweigungen, die mit Knoten 0 verbunden sind, nicht überquert. Es wird darauf hingewiesen, dass, um eine Endlosschleife zu vermeiden, die Überquerung ebenfalls an Knoten stoppt, die bereits vorangehend überquert wurden.

**[0155]** Nachdem die Überquerung aufwärts zurück zu Knoten 3 kehrt, überquert sie abwärts an Verzweigung  $R_1$  zu Knoten 1. Knoten 1 ist ein zugreifbarer Knoten und somit werden die Verzweigungen, die mit Knoten 1 verbunden sind, nicht überquert. Die Überquerung kehrt dann zu Knoten 3 zurück. An Knoten 3 kehrt die Überquerung aufwärts zurück zu Knoten 2, da alle Verzweigungen, die mit Knoten 3 verbunden sind, überquert wurden. Alle Verzweigungen, die mit Knoten 2 verbunden sind, dem Startknoten, wurden rekursiv überquert. Da alle Verzweigungen, die mit dem Startknoten verbunden sind, nun überquert wurden, endet der Prozess.

**[0156]** Dementsprechend sind bei dem obigen Beispiel die überquerten Vorrichtungen  $R_1$ ,  $R_2$ ,  $R_3$ ,  $R_4$  und  $R_5$ .  $J_1$  wurde nicht überquert, und die zugreifbaren Knoten, an denen gestoppt wurde, sind Knoten 0 und 1.

**[0157]** Es ist vielleicht nicht nötig, alle zugreifbaren Knoten zu messen, die mit Vorrichtungen in dem gesamten Cluster verbunden sind, um die Komponenten in einem reduzierten Cluster zu testen. Dementsprechend wird für jedes reduzierte Cluster ein Zugriffs-Abschneiden ausgeführt, um einen minimierten Satz von zugreifbaren Knoten zu bestimmen, die gemessen werden müssen. Durch Reduzieren der Anzahl von gemessenen Knoten wird die Größe der  $U^*$ -Matrizen, etc., ebenfalls reduziert. Dies vereinfacht die Berechnungen, die notwendig sind, um zu bestimmen, ob ein Fehler aufgetreten ist, und beschleunigt die Testzeit.

**[0158]** [Fig. 14](#) ist ein Flussdiagramm, das die Schritte darstellt, die unternommen werden, um ein Knoten-Abschneiden für ein reduziertes Cluster auszuführen, gemäß einem Ausführungsbeispiel der vorliegenden Erfindung. Bei einem Schritt **1402** werden die Vorrichtungen in dem reduzierten Cluster in Äquivalenzklassen unterteilt. Dies wird üblicherweise durchgeführt zuerst durch Erzeugen einer Z-Matrix für das gesamte Cluster. Diese Z-Matrix weist Zeilen auf, die jedem der zugreifbaren Knoten entsprechen, die mit Vorrichtungen in dem Cluster verbunden sind. Die Spalten entsprechen den Vorrichtungen in dem Cluster. Die Äquivalenzklassen

werden dann erzeugt durch Prüfen der Spalten und Gruppen aus Spalten, die den Vorrichtungen in dem reduzierten Cluster entsprechen, im Hinblick auf Impedanz. Dies folgt dem grundlegenden Verfahren zum Erzeugen von Äquivalenzklassen, das oben beschrieben wurde, außer dass nur Kombinationen aus Spalten, die Vorrichtungen in dem reduzierten Cluster entsprechen, geprüft werden.

**[0159]** Bei einem Schritt **1404** werden die Knoten in der Liste von potentiellen Stimulusknoten, die erzeugt wurden, als das reduzierte Cluster erzeugt wurde, in die Liste aus Testpunkten für dieses reduzierte Cluster platziert. Diese Knoten werden ebenfalls aus einer späteren Betrachtung beseitigt. Dies bedeutet, dass diese Knoten in späteren Schritten nicht als Testpunkte beseitigt werden. Bei einem Schritt **1406** wird ein Knoten weiterhin unter Betrachtung für eine Beseitigung ausgewählt. Dieser Knoten ist ein zugreifbarer Knoten, da nur zugreifbare Knoten mögliche Testpunkte sein können.

**[0160]** Bei einem Schritt **1408** wird eine Prüfung durchgeführt, um zu sehen, ob der ausgewählte Knoten als ein Testpunkt beseitigt werden kann, ohne die Äquivalenzklassen des reduzierten Clusters zu ändern. Diese Prüfung wird erreicht zuerst durch Entfernen der Zeile, die dem ausgewählten Knoten entspricht, aus der Z-Matrix, die bei Schritt **1402** verwendet wird. Dann wird diese abgestreifte Z-Matrix verwendet, um die Vorrichtungen des reduzierten Clusters in Äquivalenzklassen zu teilen. Wenn eine Differenz zwischen den soeben erzeugten Äquivalenzklassen und jenen besteht, die bei Schritt **1402** erzeugt wurden, dann wird dieser Knoten als ein Testpunkt für dieses reduzierte Cluster benötigt und der Prozess fährt mit Schritt **1412** fort. Wenn keine Differenz vorlag, wird dieser Knoten nicht als ein Testpunkt für dieses reduzierte Cluster benötigt, und der Prozess fährt mit Schritt **1410** fort.

**[0161]** Bei einem Schritt **1412** wird ein Knoten, der als Testpunkt benötigt wird, in die Liste aus Testpunkten für dieses reduzierte Cluster platziert. Der Knoten wird ferner aus einer weiteren Betrachtung beseitigt, so dass er nicht wieder ausgewählt wird. Der Prozess fährt dann mit Schritt **1414** fort.

**[0162]** Bei einem Schritt **1410** wird ein Knoten, der nicht als Testpunkt benötigt wird, aus einer weiteren Betrachtung beseitigt, so dass er nicht wieder für eine mögliche Platzierung in der Liste aus Testpunkten für dieses reduzierte Cluster ausgewählt wird.

**[0163]** Bei einem Schritt **1414**, wenn noch zugreifbare Knoten zur Betrachtung vorliegen, kehrt der Prozess in der Schleife zurück zu Schritt **1406**. Wenn alle zugreifbaren Knoten getestet wurden, um zu sehen, ob sie Testpunkte werden sollten, fährt der Prozess mit Schritt **1416** fort. Bei einem Schritt **1416** wird die Liste aus Testpunkten für dieses reduzierte Cluster gespeichert. Dann endet der Prozess bei einem Schritt **1418**. Bei einem bevorzugten Ausführungsbeispiel werden nur die zugreifbaren Knoten in der Liste aus Testpunkten verwendet, um die U\*-Matrizen und Testgrenzen für die Äquivalenzklassen dieses reduzierten Clusters zu erzeugen.

**[0164]** Obwohl verschiedene spezifische Ausführungsbeispiele der Erfindung beschrieben und dargestellt wurden, ist die Erfindung nicht auf die spezifischen Formen, Anordnungen und Schritte beschränkt, die derart beschrieben und dargestellt wurden. Zum Beispiel sind viele der Stimuli, die in den spezifischen Ausführungsbeispielen gezeigt sind, als Stromquellen gezeigt. Diese könnten jedoch auch Spannungsquellen sein. Die Erfindung ist nur durch die Ansprüche eingeschränkt.

### Patentansprüche

1. Ein Verfahren zum Auswählen von Testpunkten zum Ermöglichen eines schaltungsinternen Testens von besetzten Schaltungsplatinen, das folgende Schritte aufweist:

Auswählen eines ersten Teilsatzes von Komponenten aus einer ersten Gruppe von Komponenten (**1202, 1204, 1206, 1208, 1210, 1212, 1214, 1216, 1218, 1220, 1222, 1224, 1226, 1228, 1302, 1304, 1306, 1308, 1310, 1311, 1312, 1314, 1316, 1318**),

wobei die erste Gruppe von Komponenten miteinander durch einen Satz von Knoten verbunden ist, und wobei der erste Satz von Knoten in einen ersten Teilsatz von Knoten, die nicht zugreifbar sind, und einen zweiten Teilsatz von Knoten, die zugreifbar sind, unterteilt ist;

Teilen des ersten Teilsatzes von Komponenten in eine erste Anordnung von Äquivalenzklassen unter Verwendung des zweiten Teilsatzes von Knoten als zugreifbare Knoten (**1402**), wobei zwei Gruppen von Komponenten zu derselben Äquivalenzklasse gehören wenn dieselben nicht auf der Grundlage von Spannungen an den zugreifbaren Knoten unterschieden werden können; und

Entfernen eines dritten Teilsatzes von Knoten aus dem zweiten Teilsatz von Knoten, um einen Satz von Testpunktknoten zu erzeugen, wobei der erste Teilsatz von Komponenten in die erste Anordnung von Äquivalenz-

klassen unterteilt wird, wenn der Satz von Testpunkt knoten als zugreifbare Knoten (**1406**, **1408**, **1410**, **1412**, **1414**) verwendet wird.

2. Das Verfahren gemäß Anspruch 1, bei dem der Schritt des Entferns eines dritten Teilsatzes von Knoten ferner folgende Schritte aufweist:

- (a) Auswählen eines ersten Knotens aus dem zweiten Teilsatz von Knoten (**1406**);
- (b) Unterteilen des ersten Teilsatzes von Komponenten in eine zweite Anordnung von Äquivalenzklassen unter Verwendung des zweiten Satzes von Knoten ohne den ersten Knoten als zugreifbare Knoten (**1408**);
- (c) Vergleichen der ersten Anordnung von Äquivalenzklassen mit der zweiten Anordnung von Äquivalenzklassen (**1408**);
- (d) Addieren des ersten Knotens zu dem dritten Teilsatz von Knoten, wenn die erste Anordnung von Äquivalenzklassen und die zweite Anordnung von Äquivalenzklassen gleich sind (**1410**);
- (e) Wiederholen der Schritte (a) bis (d) (**1414**).

3. Das Verfahren gemäß Anspruch 2, das ferner folgenden Schritt aufweist:

Addieren eines vierten Teilsatzes von Knoten zu dem Satz von Testpunkt knoten, wobei der vierte Teilsatz von Knoten Teilnehmer des zweiten Satzes von Knoten sind und mit dem ersten Teilsatz von Komponenten (**1412**) verbunden sind.

4. Ein Programmspeicherungsmedium, das durch einen Computer lesbar ist, das ein Programm aus Anweisungen verkörpert, die durch den Computer ausführbar sind, um Verfahrensschritte auszuführen, zum Auswählen von Testpunkten, um ein schaltungsinternes Testen von besetzten Schaltungsplatinen zu ermöglichen, wobei das Verfahren folgende Schritte aufweist:

Auswählen eines ersten Teilsatzes von Komponenten aus einer ersten Gruppe von Komponenten, wobei die erste Gruppe von Komponenten durch einen ersten Satz von Knoten verbunden ist und wobei der erste Satz von Knoten in einen ersten Teilsatz von Knoten, die nicht zugreifbar sind, und einen zweiten Teilsatz von Knoten, die zugreifbar sind, unterteilt ist (**1202**, **1204**, **1206**, **1208**, **1210**, **1212**, **1214**, **1216**, **1218**, **1220**, **1222**, **1224**, **1226**, **1228**, **1302**, **1304**, **1306**, **1308**, **1310**, **1311**, **1312**, **1314**, **1316**, **1318**);

Unterteilen des ersten Teilsatzes von Komponenten in eine erste Anordnung von Äquivalenzklassen unter Verwendung des zweiten Teilsatzes von Knoten als zugreifbare Knoten (**1412**), wobei zwei Gruppen von Komponenten zu derselben Äquivalenzklasse gehören, wenn dieselben nicht auf der Basis von Spannungen an den zugreifbaren Knoten unterschieden werden können;

Entfernen eines dritten Teilsatzes von Knoten aus dem zweiten Teilsatz von Knoten, um einen Satz von Testpunktknoten zu erzeugen;

wobei der erste Teilsatz von Komponenten in die erste Anordnung von Äquivalenzklassen unterteilt wird, wenn der Satz von Testpunkt knoten als zugreifbare Knoten (**1406**, **1408**, **1410**, **1412**, **1414**) verwendet wird.

5. Das Programmspeicherungsmedium gemäß Anspruch 4, bei dem der Schritt des Entferns eines dritten Teilsatzes von Knoten ferner folgende Schritte aufweist:

- (a) Auswählen eines ersten Knotens aus dem zweiten Teilsatz von Knoten (**1406**);
- (b) Unterteilen des ersten Teilsatzes von Komponenten in eine zweite Anordnung von Äquivalenzklassen unter Verwendung des zweiten Satzes von Knoten ohne den ersten Knoten als zugreifbare Knoten (**1408**);
- (c) Vergleichen der ersten Anordnung von Äquivalenzklassen und der zweiten Anordnung von Äquivalenzklassen (**1408**);
- (d) Addieren des ersten Knotens zu dem dritten Teilsatz von Knoten, wenn die erste Anordnung von Äquivalenzklassen und die zweite Anordnung von Äquivalenzklassen gleich sind (**1410**);
- (e) Wiederholen der Schritte (a) bis (d) (**1414**).

6. Das Programmspeicherungsmedium gemäß Anspruch 5, das ferner folgenden Schritt aufweist:

Addieren eines vierten Teilsatzes von Knoten zu dem Satz von Testpunktknoten, wobei der vierte Teilsatz von Knoten aus Teilnehmern des zweiten Satzes von Knoten besteht und mit dem ersten Teilsatz von Komponenten (**1412**) verbunden ist.

7. Eine Vorrichtung zum Auswählen zum Testpunkten, um ein schaltungsinternes Testen von besetzten Schaltungsplatinen zu ermöglichen, die folgende Merkmale aufweist:

eine Einrichtung zum Auswählen eines ersten Teilsatzes von Komponenten aus einer ersten Gruppe von Komponenten, wobei die erste Gruppe von Komponenten durch einen ersten Satz von Knoten verbunden ist und wobei der erste Satz von Knoten in einen ersten Teilsatz von Knoten, die nicht zugreifbar sind, und einen zweiten Teilsatz von Knoten, die zugreifbar sind, unterteilt ist;

eine Einrichtung zum Unterteilen des ersten Teilsatzes von Komponenten in eine erste Anordnung von Äqui-

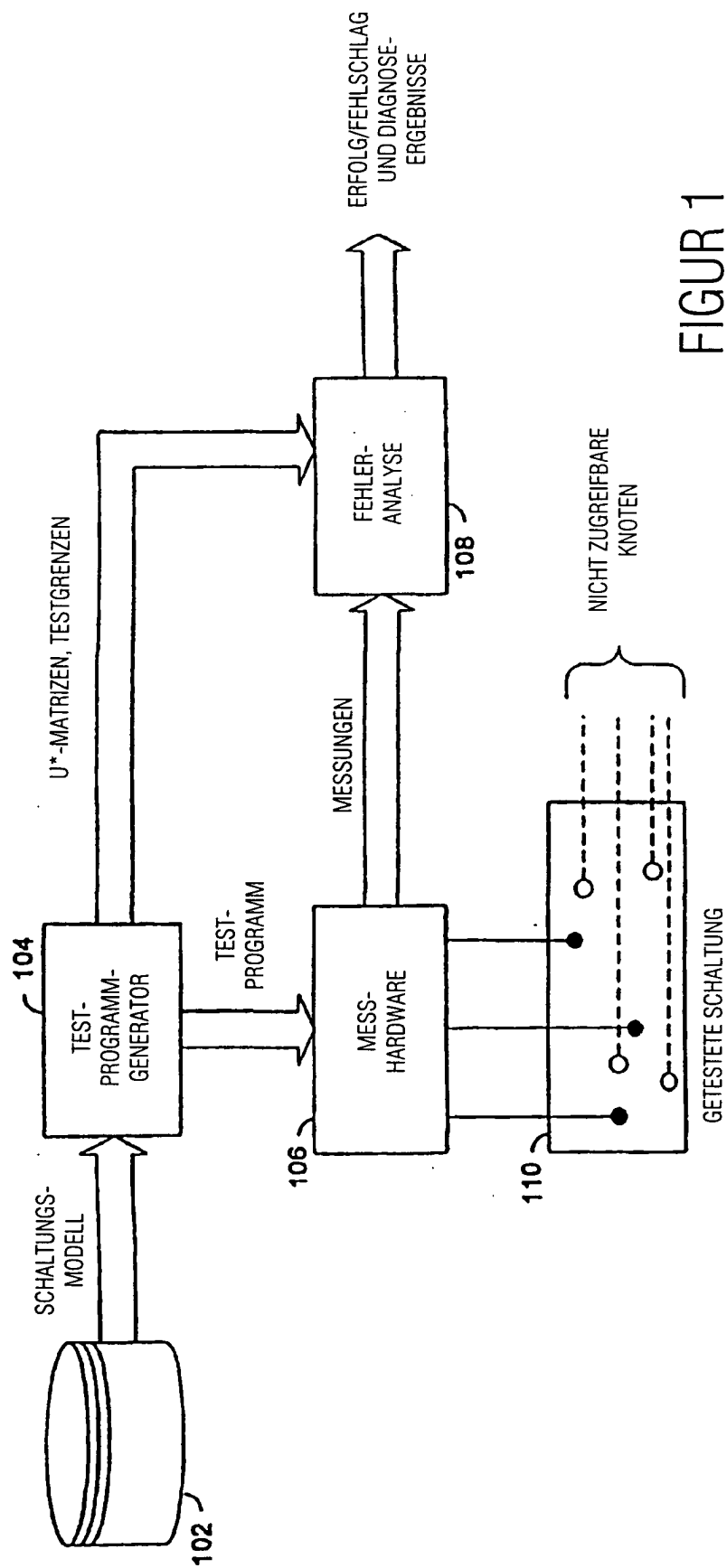
valenzklassen unter Verwendung des zweiten Teilsatzes von Knoten als zugreifbar, wobei zwei Gruppen von Komponenten zu derselben Äquivalenzklasse gehören, wenn dieselben nicht auf der Grundlage von Spannungen an dem zugreifbaren Knoten unterschieden werden können, und  
 eine Einrichtung zum Entfernen eines dritten Teilsatzes von Knoten aus dem zweiten Teilsatz von Knoten, um einen Satz von Testpunktknoten zu erzeugen, wobei der erste Teilsatz von Komponenten in die erste Anordnung von Äquivalenzklassen unterteilt wird, wenn der Satz von Testpunktknoten als zugreifbare Knoten verwendet wird.

8. Die Vorrichtung gemäß Anspruch 7, die ferner folgende Merkmale aufweist:  
 eine Einrichtung zum Auswählen eines ersten Knotens aus dem zweiten Teilsatz von Knoten;  
 eine Einrichtung zum Unterteilen des ersten Teilsatzes von Komponenten in eine zweite Anordnung von Äquivalenzklassen unter Verwendung des zweiten Satzes von Knoten ohne den ersten Knoten als zugreifbare Knoten;  
 eine Einrichtung zum Vergleichen der ersten Anordnung von Äquivalenzklassen und der zweiten Anordnung von Äquivalenzklassen;  
 eine Einrichtung zum Addieren des ersten Knotens zu dem dritten Teilsatz von Knoten, wenn die erste Anordnung von Äquivalenzklassen und die zweite Anordnung von Äquivalenzklassen gleich sind.

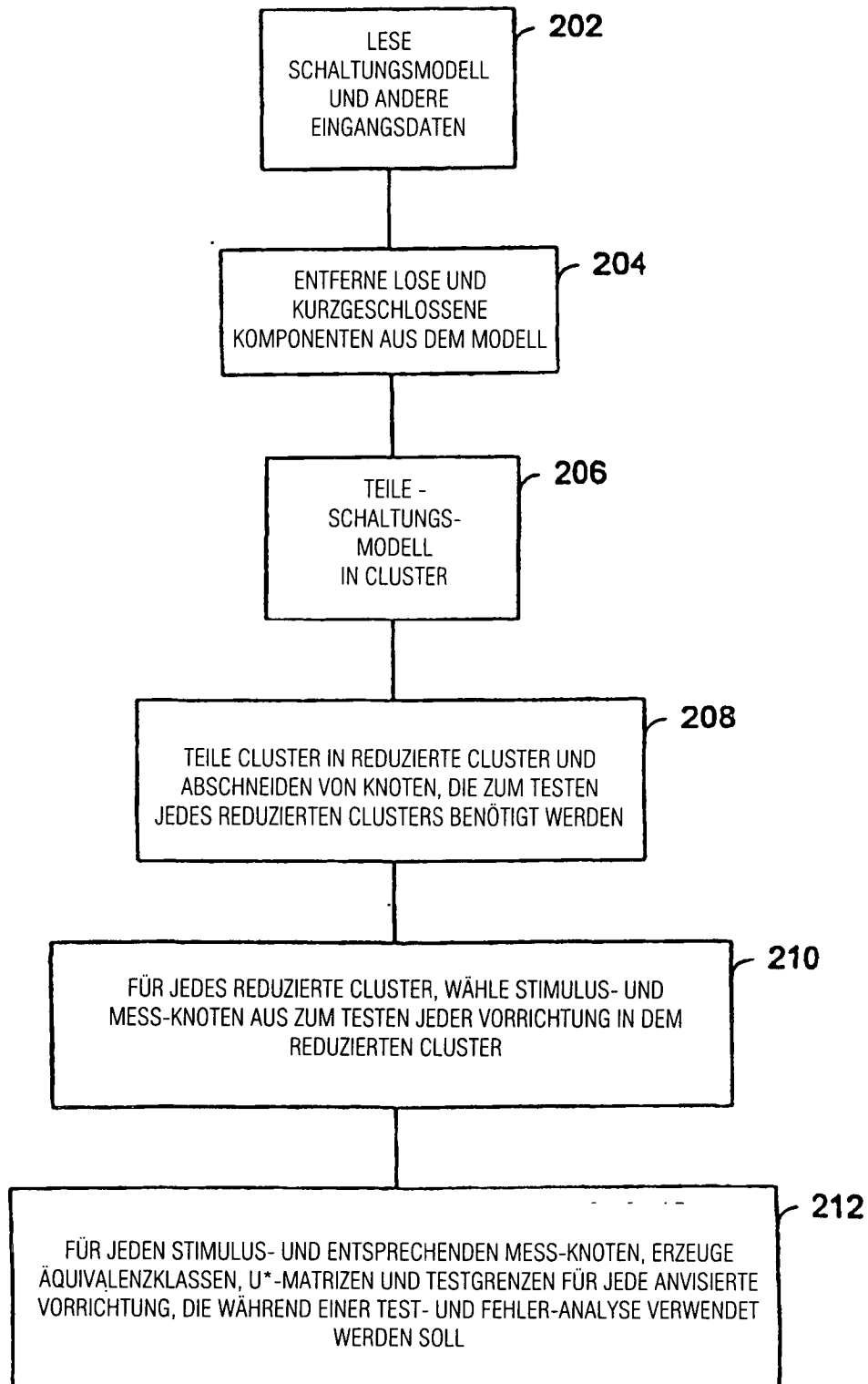
9. Die Vorrichtung gemäß Anspruch 8, die ferner folgendes Merkmal aufweist:  
 eine Einrichtung zum Addieren eines vierten Teilsatzes von Knoten zu dem Satz von Testpunktknoten, wobei der vierte Teilsatz von Knoten aus Teilnehmern des zweiten Satzes von Knoten besteht und mit dem ersten Teilsatz von Komponenten verbunden ist.

Es folgen 17 Blatt Zeichnungen

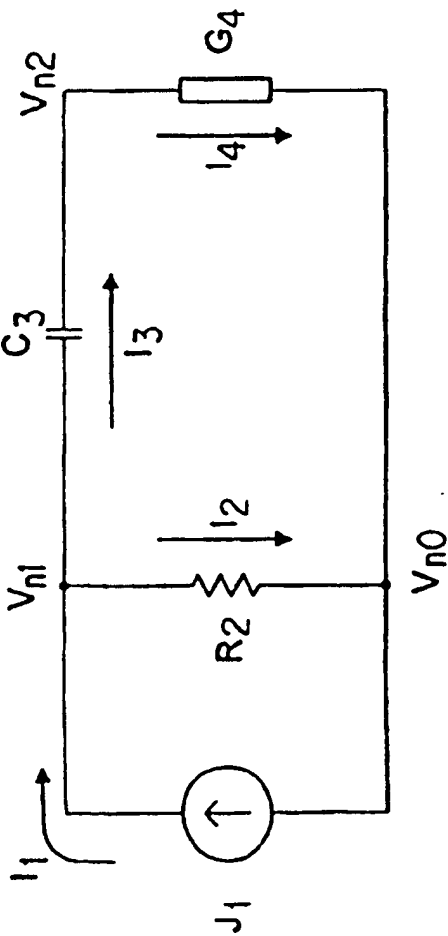
## Anhängende Zeichnungen



FIGUR 1

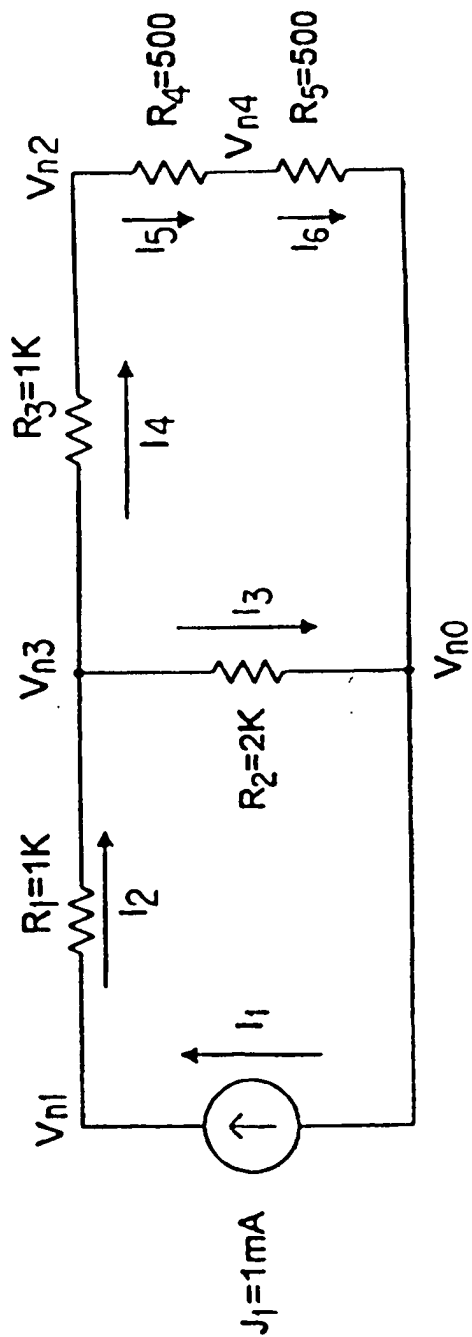


FIGUR 2

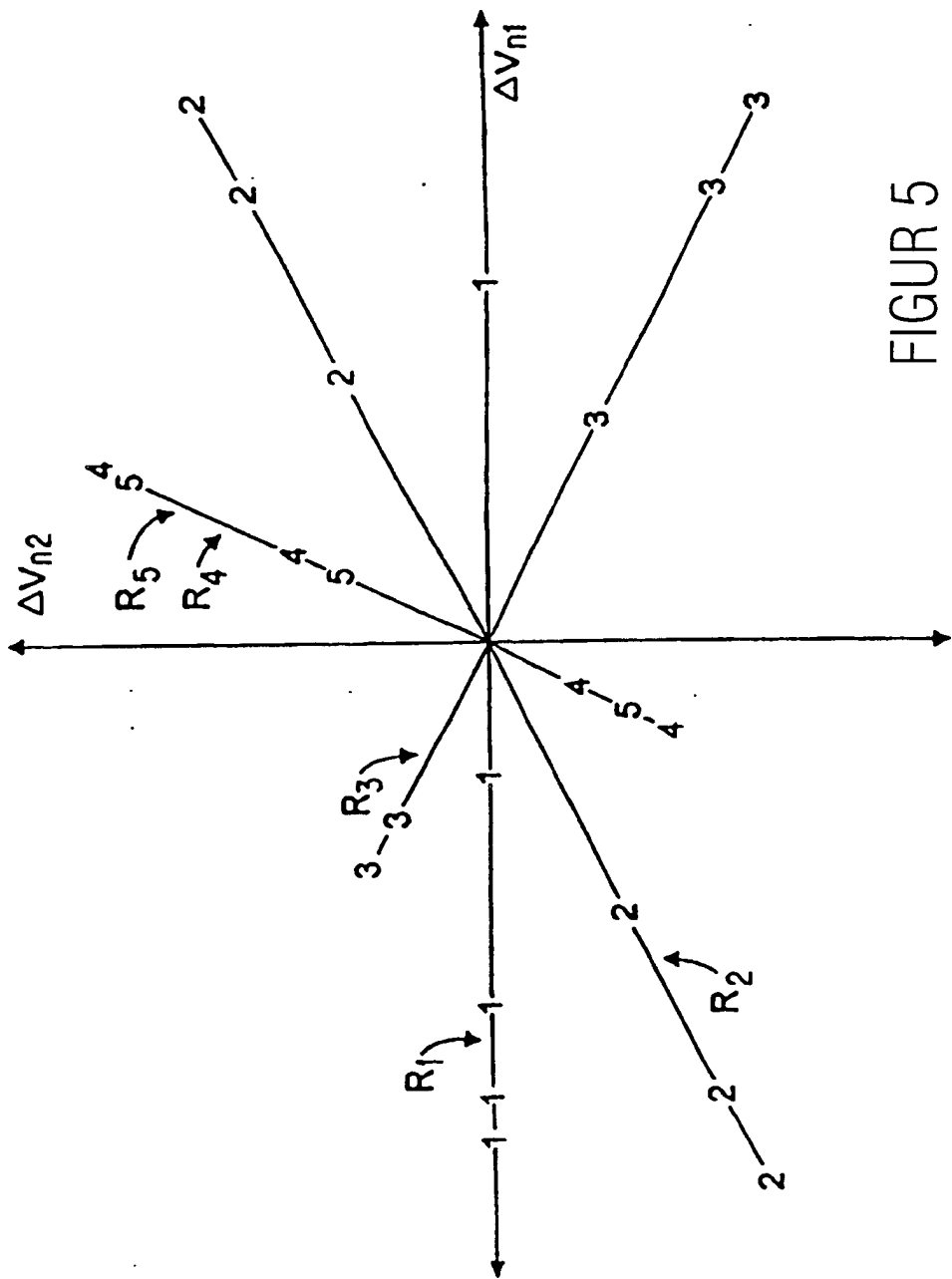


FIGUR 3

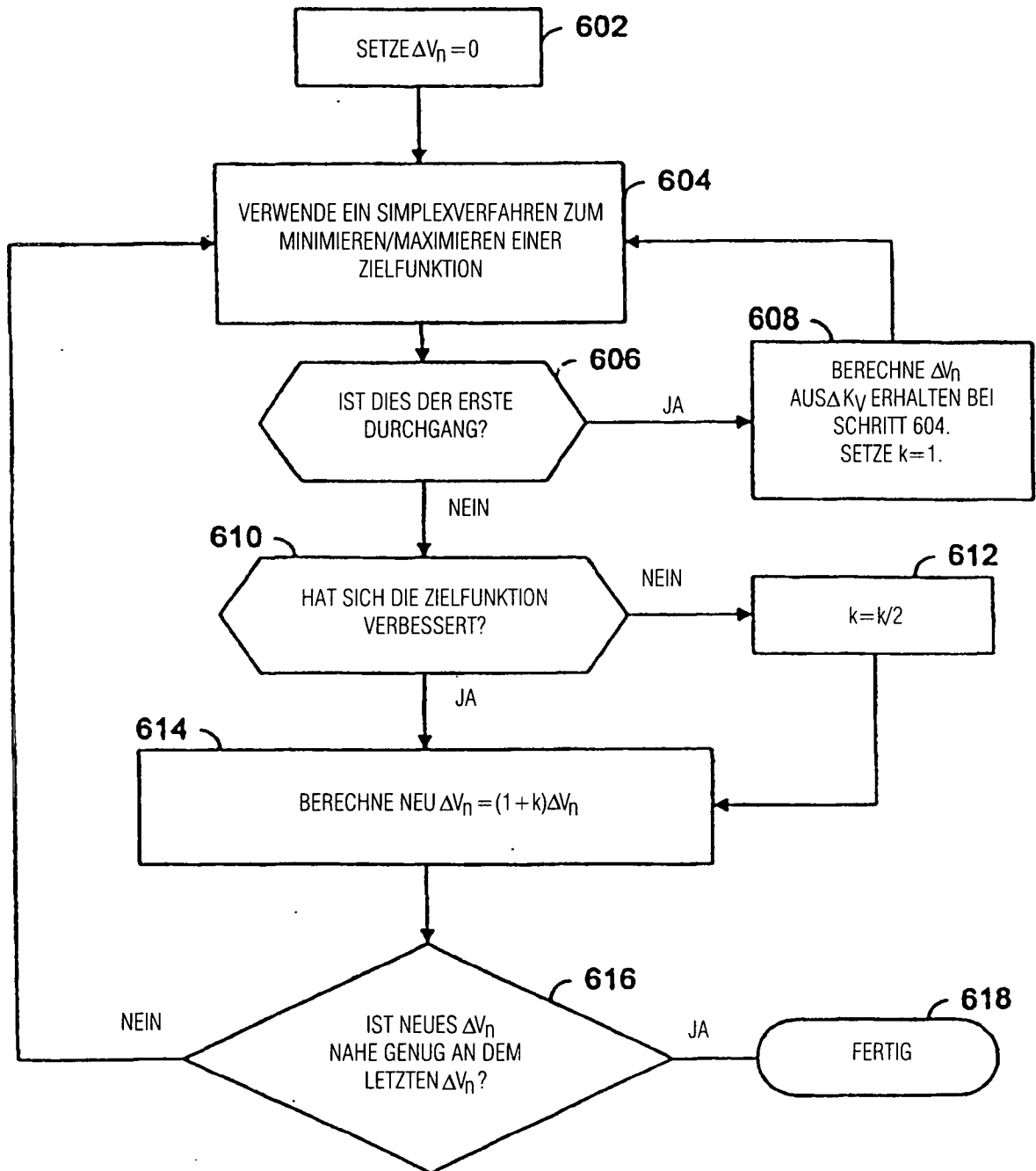




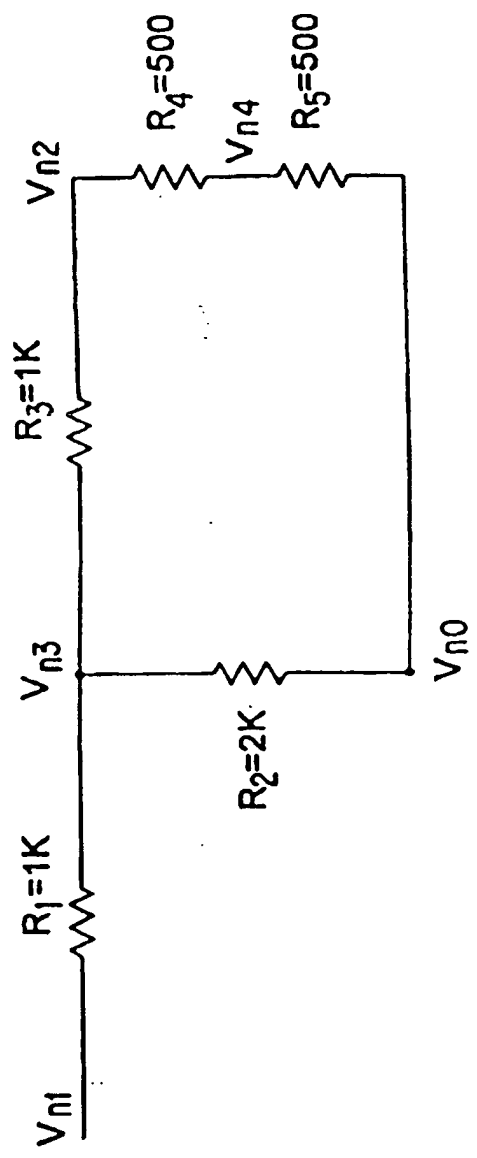
FIGUR 4



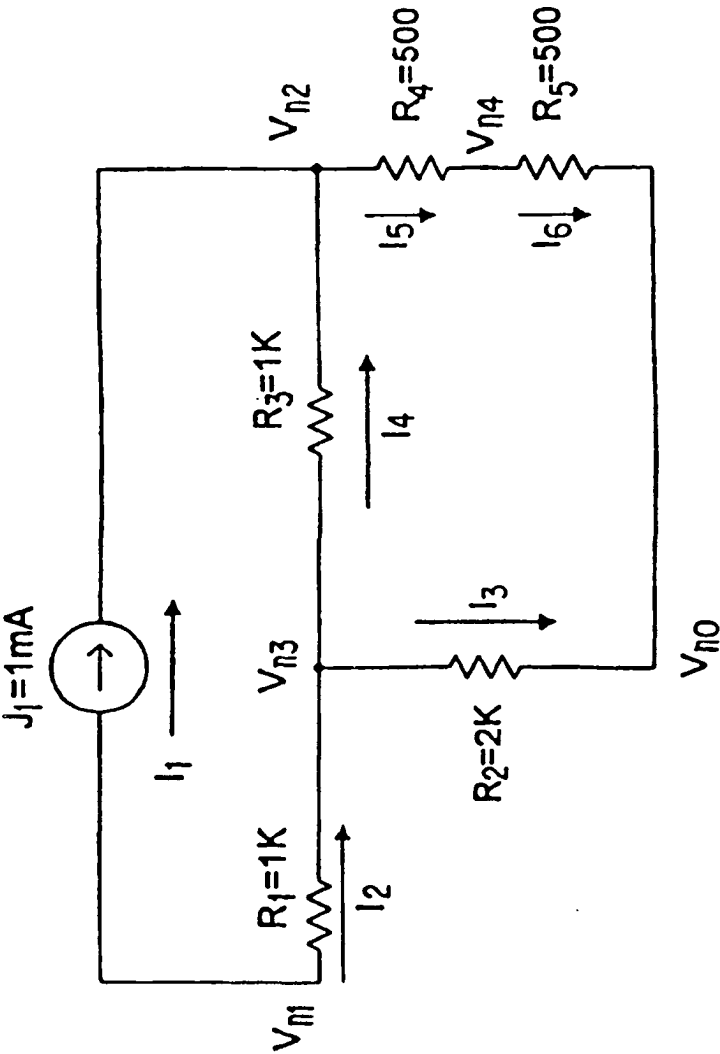
FIGUR 5



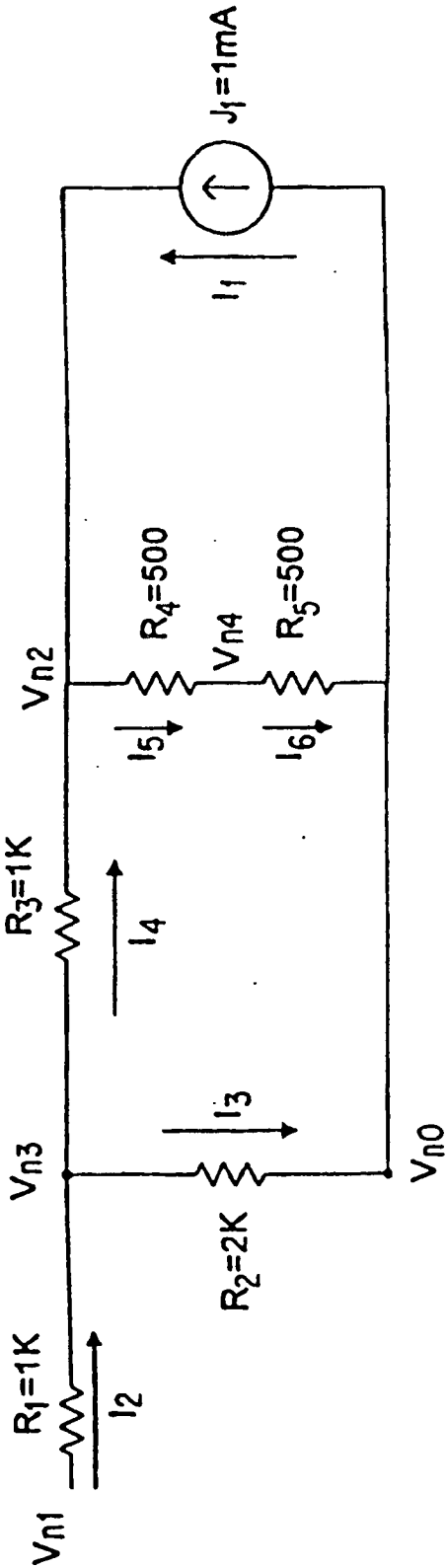
FIGUR 6



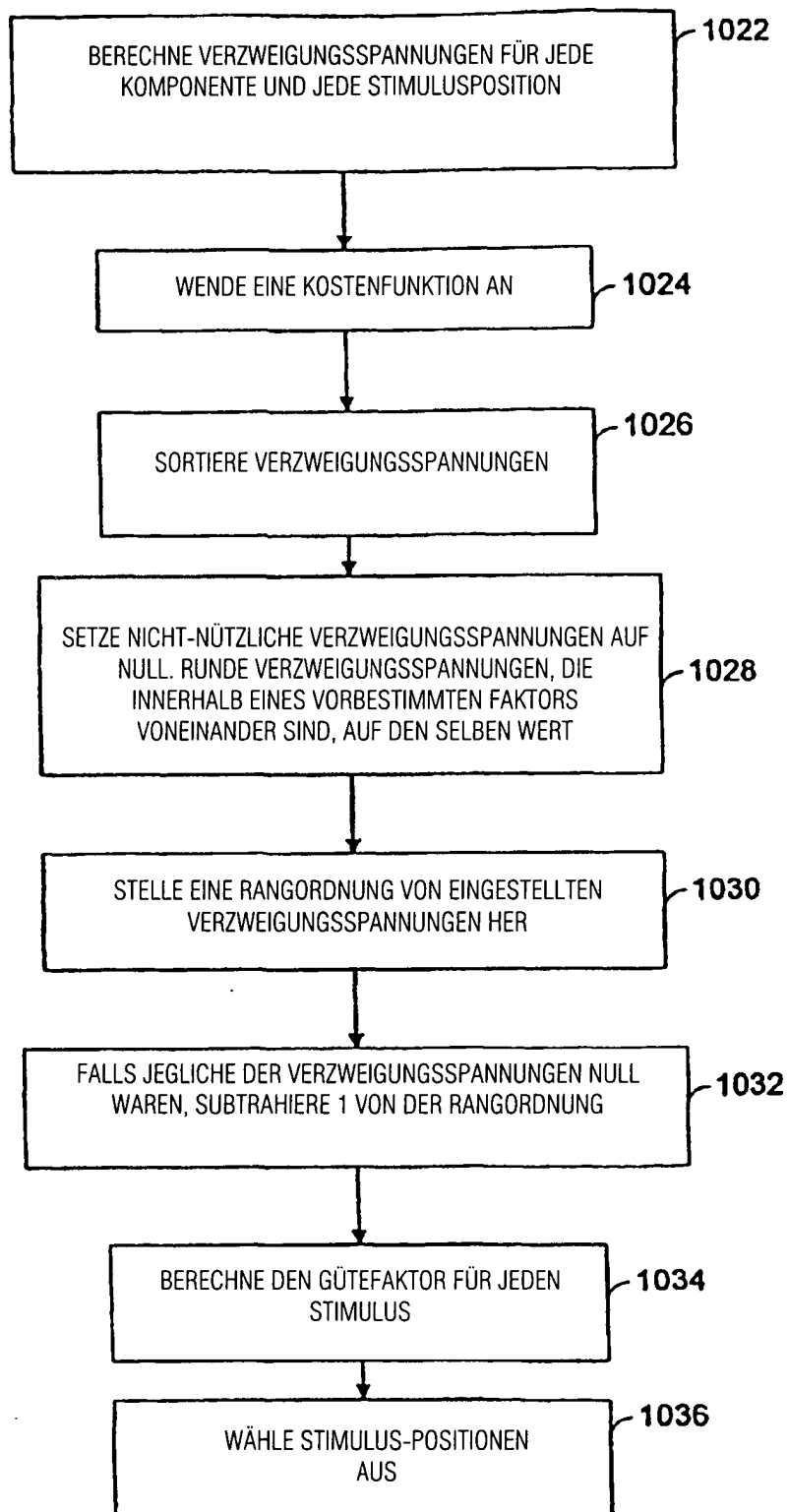
FIGUR 7



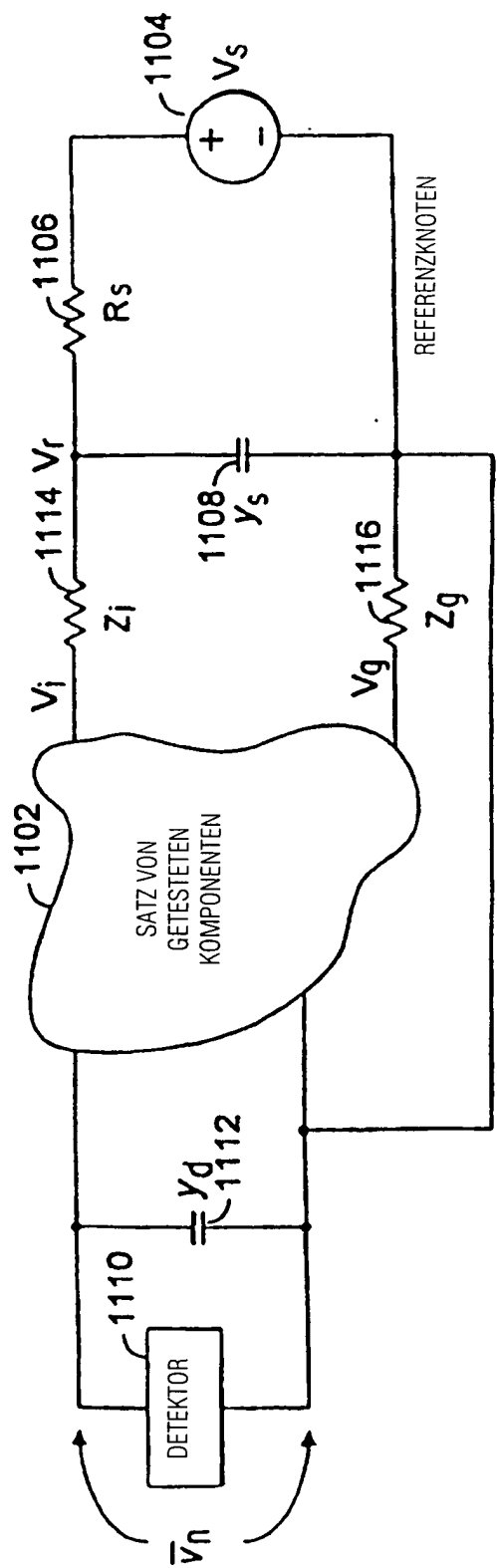
FIGUR 8



FIGUR 9

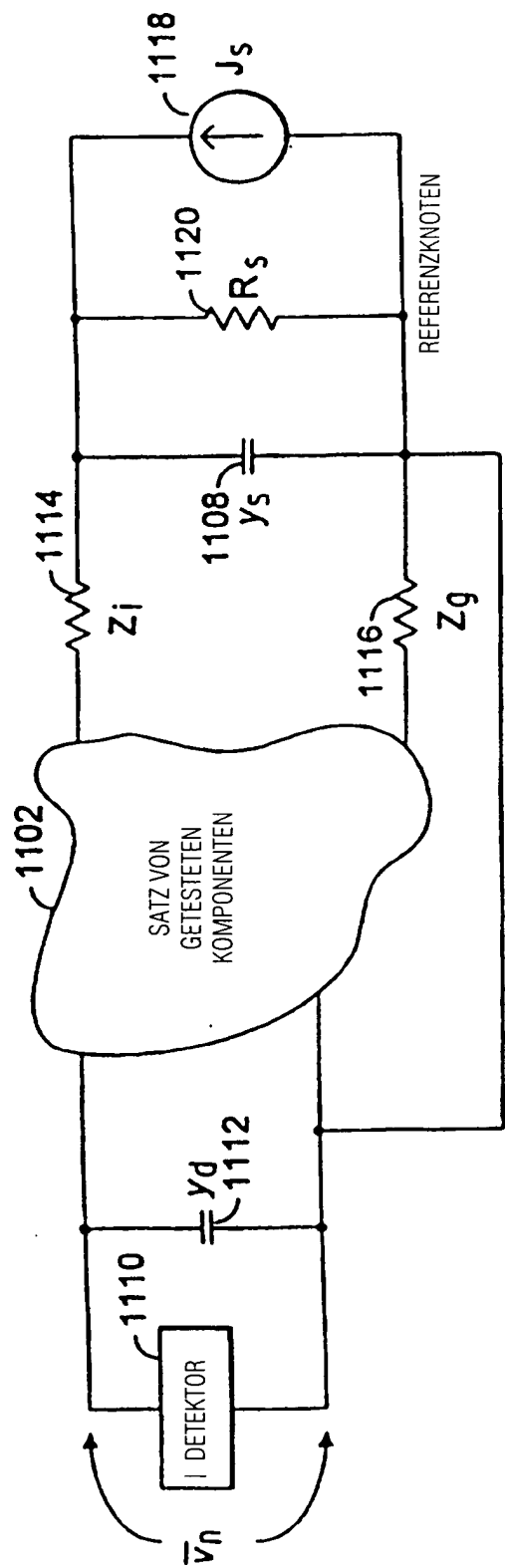


FIGUR 10

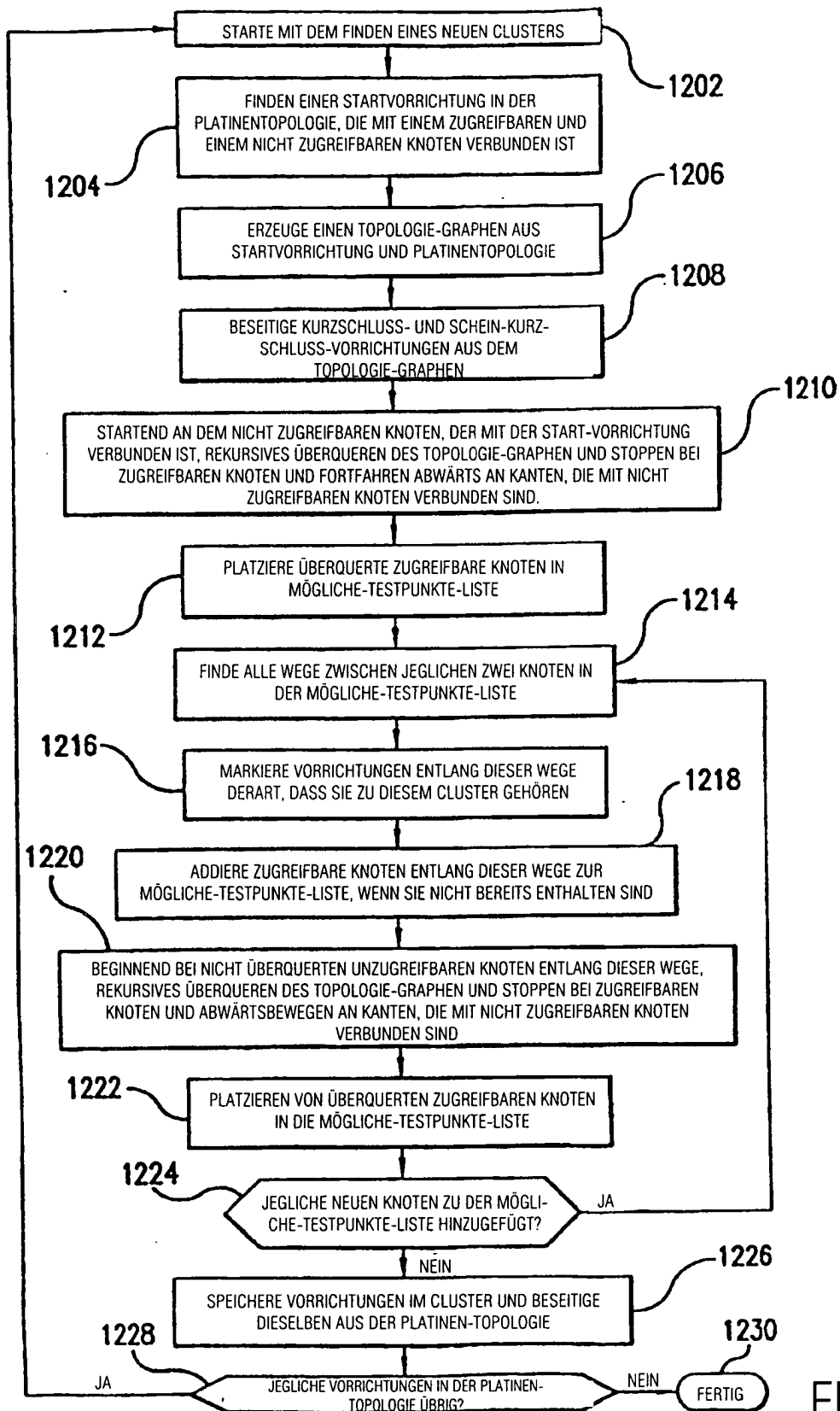


FIGUR 11A

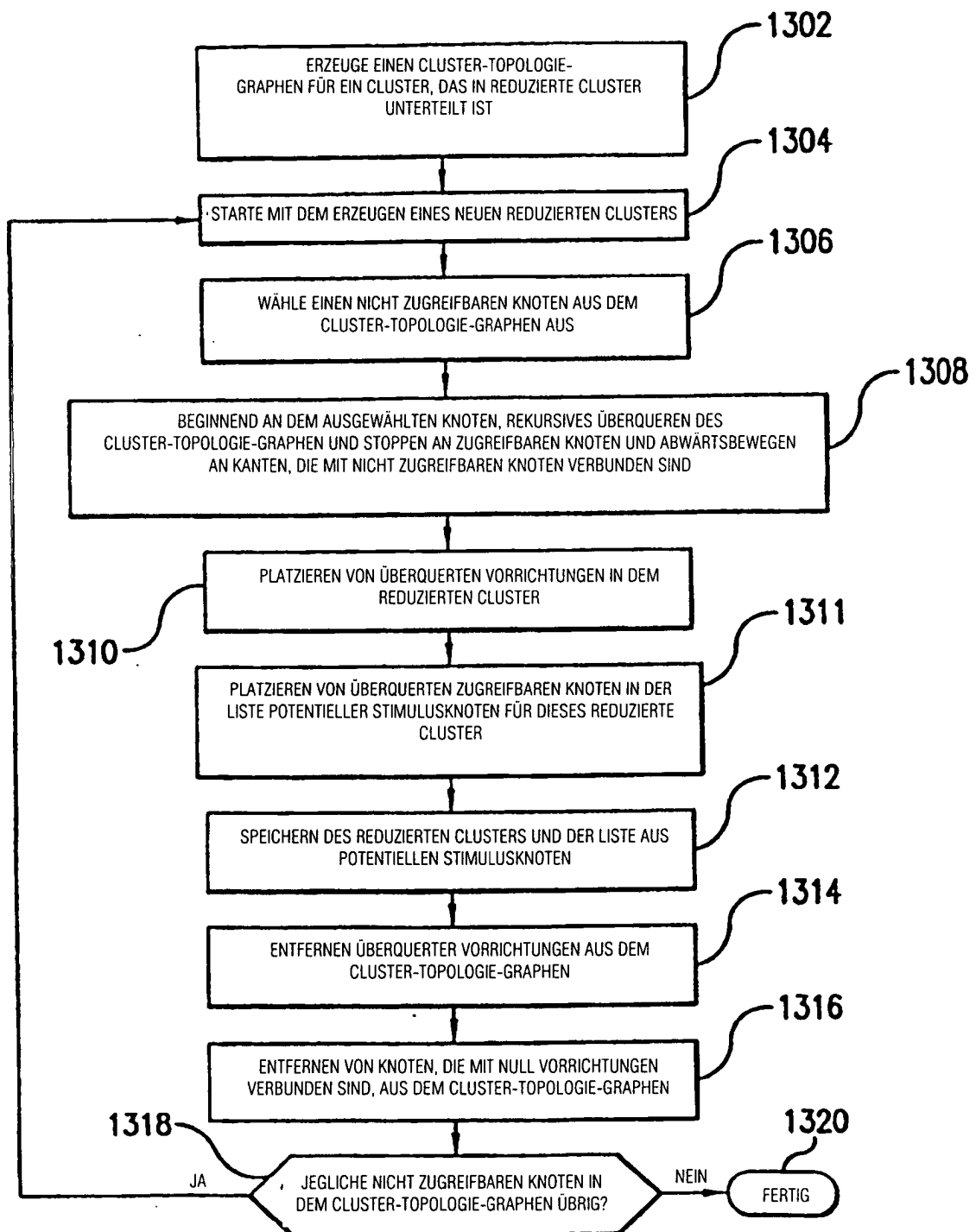




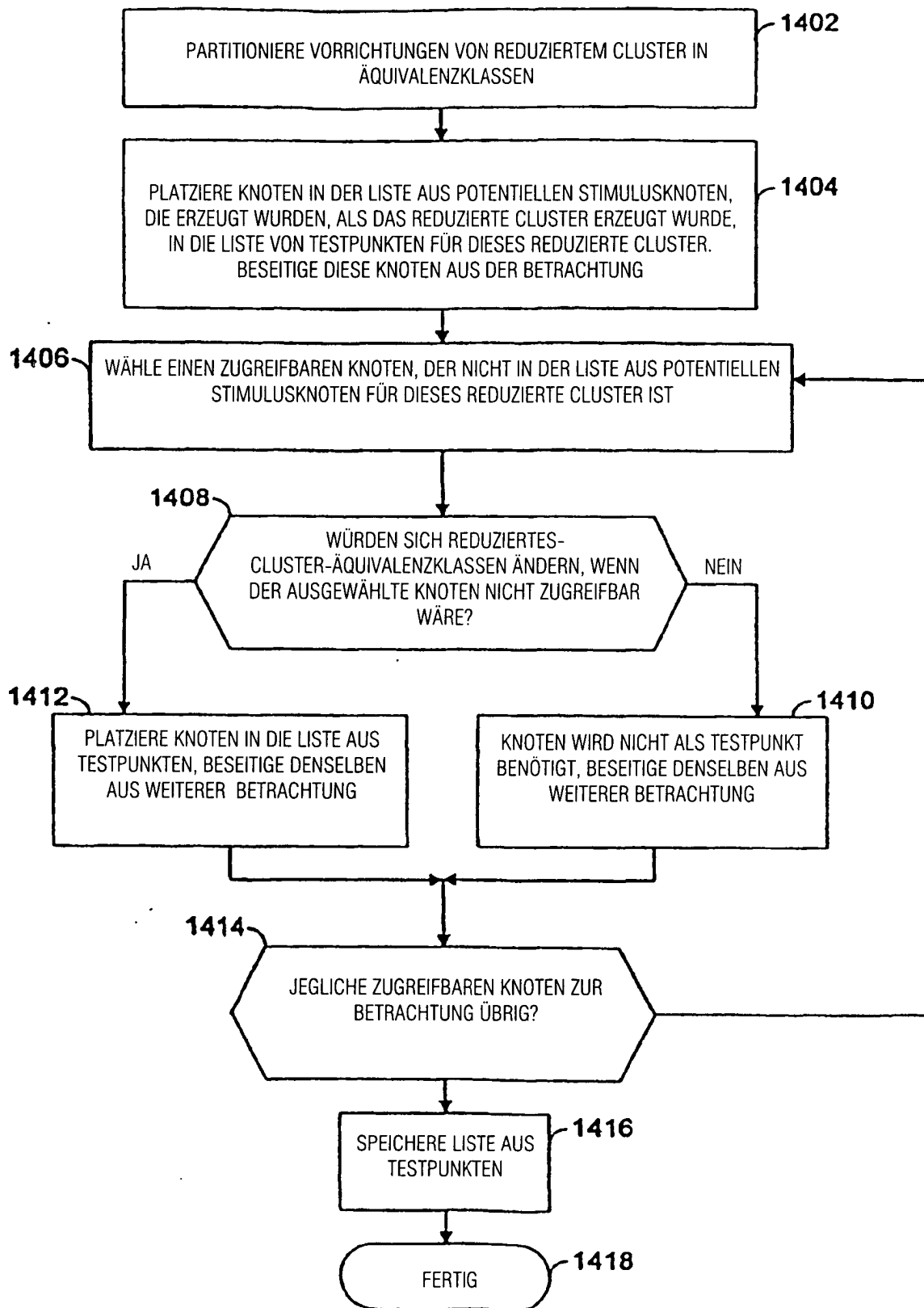
FIGUR 11B



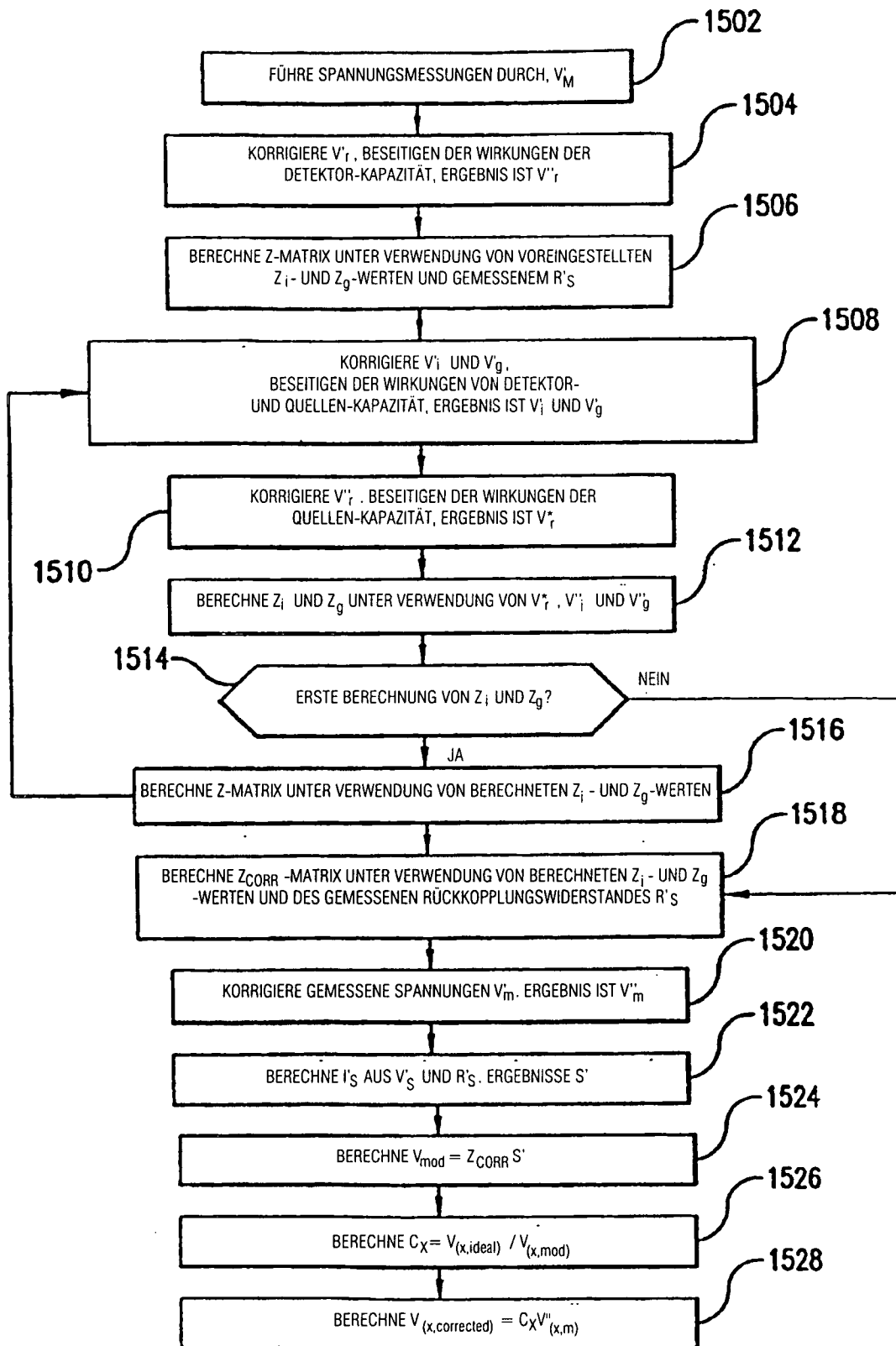
FIGUR 12



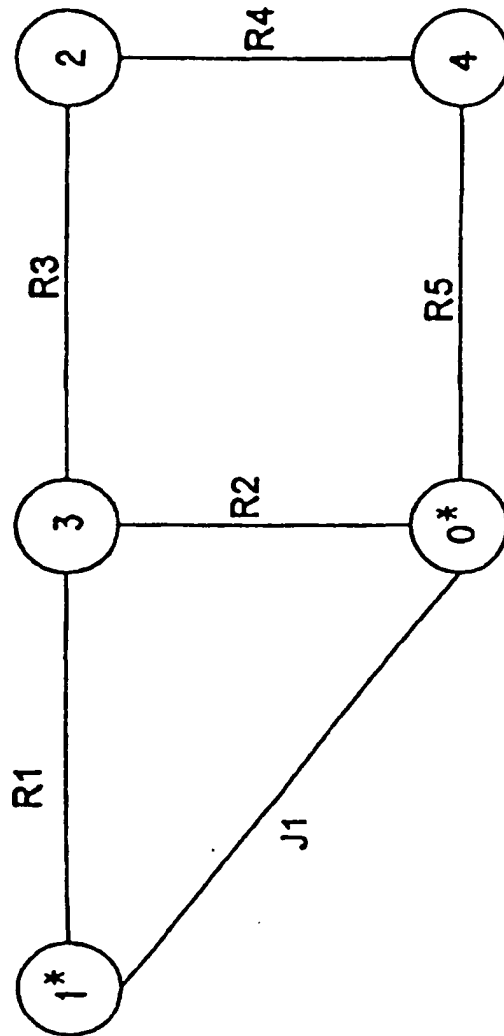
FIGUR 13



FIGUR 14



FIGUR 15



FIGUR 16