(19) **Bundesrepublik Deutschland**
Deutsches Patent- und Markenamt

(10) **DE 699 34 467 T2** 2007.04.19

(12) # Übersetzung der europäischen Patentschrift

(97) **EP 0 992 802 B1**
(21) Deutsches Aktenzeichen: **699 34 467.0**
(96) Europäisches Aktenzeichen: **99 118 387.2**
(96) Europäischer Anmeldetag: **16.09.1999**
(97) Erstveröffentlichung durch das EPA: **12.04.2000**
(97) Veröffentlichungstag der Patenterteilung beim EPA: **20.12.2006**
(47) Veröffentlichungstag im Patentblatt: **19.04.2007**

(51) Int Cl.[8]: ***G01R 31/27*** (2006.01)

(30) Unionspriorität:
169777 **09.10.1998** **US**

(84) Benannte Vertragsstaaten:
DE, FR, GB

(73) Patentinhaber:
Agilent Technologies, Inc. - a Delaware Corporation -, Santa Clara, Calif., US

(74) Vertreter:
Schoppe, Zimmermann, Stöckeler & Zinkler, 82049 Pullach

(72) Erfinder:
Ahrikencheikh, Cherif, Loveland, CO 80538, US;
Browen, Rodney A., Loveland, CO 80537, US;
Darbie, William P., Longmont, CO 80504, US;
McDermid, John E., Loveland, CO 80538, US;
Lannen, Kay C., Fort Collins, CO 80525, US

(54) Bezeichnung: **Verfahren und Vorrichtung zur Auswahl von selektierten Komponenten in einem Test mit begrenztem Zugang**

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 Identifizierung von Herstellungsdefekten und fehlerhaften Komponenten an einer Schaltungsplatine.

Hintergrund der Erfindung

[0002] Im Allgemeinen besteht eine Schaltungsplatine aus zahlreichen verbundenen Komponenten, wie beispielsweise Halbleiterchips, Widerständen, Kondensatoren, Induktoren, etc. Nachdem Schaltungsplatinen zusammengesetzt wurden, aber bevor dieselben verwendet oder in zusammengesetzte Produkte platziert werden können, müssen dieselben getestet werden. Ein Testen verifiziert, dass die ordnungsgemäßen Komponenten verwendet wurden, dass jede Komponente sich innerhalb von Testbegrenzungen verhält, dass alle erforderlichen elektrischen Verbindungen ordnungsgemäß abgeschlossen wurden und dass alle notwendigen elektrischen Komponenten in der ordnungsgemäßen Position und mit der ordnungsgemäßen Ausrichtung an der Platine angebracht wurden. Wenn eine Komponente sich nicht innerhalb von Testbegrenzungen verhält, wird dieselbe als fehlerhaft betrachtet.

[0003] Eine übliche Weise, zusammengesetzte gedruckte Schaltungsplatinen zu testen, wird als schaltungsintegrierter Test bzw. In-Circuit-Test bezeichnet. Ein schaltungsintegriertes Testen betrifft ein Sondieren bzw. Untersuchen einzelner Platinenkomponenten durch ein so genanntes „Nagelbett" und ein Verifizieren der Existenz derselben und von Spezifikationen unabhängig von einer umgebenen Schaltungsanordnung. Eine gut bekannte Reihe von Schaltungsplatinentestmaschinen für ein schaltungsintegriertes Testen ist die Hewlett-Packard Company Modellfamilie HP-3070 von Schaltungsplatinentestern. Die HP-3070-Familie von Platinentestern ist vollständig in den HP-3070-Familie-Betriebs- und Wartungshandbüchern beschrieben, die von Hewlett-Packard Company erhältlich sind. Andere Familien von Schaltungsplatinentestmaschinen, die durch Hewlett-Packard hergestellt werden, sind die Reihen HP-3060 und HP-3065.

[0004] Um jede einzelne Platinenkomponente zu testen, erfordert ein schaltungsintegriertes Testen einen Zugriff auf jeden Knoten an der Schaltungsplatine. Bei Durchgangslochteilen ist ein Zugriff direkt bei Komponentenanschlussleitungen verfügbar. Bei Oberflächenbefestigungsteilen ist ein Zugriff durch Durchkontaktierungen und Testanschlussflächen bereitgestellt, die an der Schaltungsplatine platziert werden, wenn dieselbe entworfen wird. Erhöhungen bei einer Platinendichte haben jedoch zu einer Verringerung bei der Größe von Durchkontaktierungen geführt, was die Fähigkeit einer Sondentechnologie verschwinden ließ, einen Kontakt mit einem kleineren Ziel herzustellen. Durchkontaktierungen sind nun häufig flächenmäßig 100 mal kleiner als nur vor einigen Jahren verwendete Durchkontaktierungen. Ferner erfordern Testanschlussflächen, die groß genug sind, um erfolgreich sondiert zu werden, einen beträchtlichen Umfang an Platinenfläche, die andernfalls verwendet würde, um Komponenten zu platzieren und zu verbinden. Deshalb ist es an vielen Schaltungsplatinen nicht mehr praktisch oder erwünscht, jeden Knoten an der Platine zu sondieren.

[0005] Jiun-Lang Huang et al. beschreiben in „Analog Fault Diagnosis for Unpowered Circuit Boards", International Test Conference, 1997 (IEEE Kat. Nr. 97CH36126), Proceedings of, 1–6 Nov. 1997, Washington, DC, USA, IEEE, Seiten 640–648, ein Verfahren für eine automatische analoge Fehlerdiagnose für nicht mit Leistung versorgte Schaltungsplatinen. Das Verfahren umfasst die Testpunktauswahl und Stimuli-Auswahl für eine Erzeugung diagnostischer Tests. Für die Testpunktauswahl wird ein auf einem Graphen beruhender Algorithmus verwendet, um den gewünschten Diagnostizierbarkeitsgrad zu erzielen. Die Stimuli-Auswahl verwendet eine Kostenfunktion, die von der Sensibilitätsmatrix zum Auswählen von Teststimuli abgeleitet ist.

[0006] Die Aufgabe der vorliegenden Erfindung besteht darin, eine Testtechnik zu schaffen, die einzelne Schaltungsplatinenkomponenten mit Toleranzen testen kann, ohne einen Zugriff auf jeden Knoten an der Schaltungsplatine zu erfordern, und die so verallgemeinert ist, dass dieselbe bei vielen unterschiedlichen Schaltungen und Toleranzbereichen verwendet werden kann.

[0007] Diese Aufgabe wird durch ein Verfahren gemäß Anspruch 1 und durch ein Programmspeicherungsmedium gemäß Anspruch 5 gelöst.

[0008] Gemäß einem Aspekt kann die Technik in einer vorhandenen schaltungsintegrierten Testhardware implementiert werden, um existierende Kapital- und Prozessinvestitionen in diese Hardware zu bewahren.

ZUSAMMENFASSUNG DER ERFINDUNG

[0009] Bei einem bevorzugten Ausführungsbeispiel wählt die Erfindung gezielte Komponenten aus einer größeren Gruppe von Komponenten mit unzugänglichen Knoten aus. Durch Auswählen eines Teilsatzes der größeren Gruppe von Komponenten wird die Komplexität des Testproblems verringert. Ferner liefert die Erfindung auch mögliche Stimuluspositionen zum Testen der Gruppe ausgewählter Komponenten. Die Erfindung ist allgemein auf alle Arten von Schaltungen anwendbar und kann unter Verwendung vorhandener Computer- und Testerhardware implementiert werden.

[0010] Die Erfindung erstellt einen Topologiegraphen der größeren Gruppe von Komponenten. Anschließend wird ein unzugänglicher Knoten ausgewählt. Dieser Knoten wird als Startpunkt für eine rekursive Überquerung des Topologiegraphen verwendet. Die Rekursion des Topologiegraphen hält an zugänglichen Knoten an und verläuft an unzugänglichen Knoten nach unten. Die Knoten, bei denen angehalten wurde, sind mögliche Stimuluspositionen. Die überquerten Vorrichtungen sind die ausgewählten Vorrichtungen. Auf diese Weise sind die ausgewählten Vorrichtungen von zugänglichen Knoten „umgeben", die gemessen werden können, oder an die ein Stimulus angelegt werden kann.

[0011] Nachdem sie gespeichert wurden, werden die ausgewählten Vorrichtungen anschließend aus dem Topologiegraphen entfernt. Der Prozess kann anschließend wiederholt werden, um eine weitere Gruppe von anvisierten Komponenten auszuwählen. Dies kann fortgesetzt werden, bis keine unzugänglichen Knoten mehr vorliegen.

[0012] Andere Aspekte und Vorteile der vorliegenden Erfindung werden aus der folgenden detaillierten Beschreibung in Verbindung mit den zugehörigen Zeichnungen ersichtlich, die durch ein Beispiel die Prinzipien der Erfindung darstellen.

Kurze Beschreibung der Zeichnungen

[0013] Fig. 1 ist ein Blockdiagramm, das die Hauptkomponenten darstellt, die bei einem Testen mit begrenztem Zugriff in Übereinstimmung mit einem Ausführungsbeispiel der vorliegenden Erfindung betroffen sind.

[0014] Fig. 2 ist ein Flussdiagramm, das allgemein die Hauptschritte darstellt, die durch den Testprogrammgenerator in Übereinstimmung mit einem Ausführungsbeispiel der vorliegenden Erfindung unternommen werden.

[0015] Fig. 3 ist ein schematisches Diagramm, das eine Schaltung darstellt, die durch ein vereinfachtes Bild bzw. Tableau (Simplified Tableau) in Übereinstimmung mit einem Ausführungsbeispiel der vorliegenden Erfindung modelliert werden kann.

[0016] Fig. 4 ist ein schematisches Diagramm einer Schaltung, das verwendet wird, um ein bevorzugtes Ausführungsbeispiel in Übereinstimmung mit einem Ausführungsbeispiel der vorliegenden Erfindung darstellen zu helfen.

[0017] Fig. 5 ist eine Darstellung der Veränderung bei einer Spannung, wenn eine einzige Komponente der Schaltung von Fig. 3 durch einen Bereich von Werten in Übereinstimmung mit einem Ausführungsbeispiel der vorliegenden Erfindung gewobbelt wird.

[0018] Fig. 6 ist ein Flussdiagramm, das die Schritte darstellt, um die Zielfunktion zu optimieren, die verwendet wird, um Testbegrenzungen in Übereinstimmung mit einem Ausführungsbeispiel der vorliegenden Erfindung zu finden.

[0019] Fig. 7 ist ein schematisches Diagramm eines beispielhaften reduzierten Clusters in Übereinstimmung mit einem Ausführungsbeispiel der vorliegenden Erfindung.

[0020] Fig. 8 und Fig. 9 sind schematische Diagramme des reduzierten Clusters von Fig. 7 und zeigen einen Stimulus in unterschiedlichen Positionen in Übereinstimmung mit einem Ausführungsbeispiel der vorliegenden Erfindung.

[0021] Fig. 10 ist ein Flussdiagramm, das einen Prozess zum Erzeugen eines Gütefaktors für verschiedene Stimuli in Übereinstimmung mit einem Ausführungsbeispiel der vorliegenden Erfindung darstellt.

[0022] Fig. 11A ist ein Diagramm, das die nichtidealen Eigenschaften der Messungs- und Stimulushardware in Übereinstimmung mit einem Ausführungsbeispiel der vorliegenden Erfindung darstellt.

[0023] Fig. 11B ist ein Diagramm, das die nichtidealen Eigenschaften der Messungs- und Stimulushardware darstellt, wobei der Stimulus durch das Zweipoläquivalent bzw. Thevenin-Äquivalent desselben ersetzt ist, in Übereinstimmung mit einem Ausführungsbeispiel der vorliegenden Erfindung.

[0024] Fig. 12 ist ein Flussdiagramm, das einen Prozess zum Erzeugen von Clustern aus einer Platinentopologie in Übereinstimmung mit einem Ausführungsbeispiel der vorliegenden Erfindung darstellt.

[0025] Fig. 13 ist ein Flussdiagramm, das den Prozess zum Erzeugen von reduzierten Clustern aus einem Cluster in Übereinstimmung mit einem Ausführungsbeispiel der vorliegenden Erfindung darstellt.

[0026] Fig. 14 ist ein Flussdiagramm, das die Schritte darstellt, die unternommen werden, um ein Knotenabschneiden (Node Pruning) für ein reduziertes Cluster in Übereinstimmung mit einem Ausführungsbeispiel der vorliegenden Erfindung durchzuführen.

[0027] Fig. 15 ist ein Flussdiagramm, das einen Prozess darstellt, der nichtideale Eigenschaften der Messungs- und Stimulushardware in Übereinstimmung mit einem Ausführungsbeispiel der vorliegenden Erfindung korrigiert.

[0028] Fig. 16 ist ein Diagramm, das einen Topologiegraphen in Übereinstimmung mit einem Ausführungsbeispiel der vorliegenden Erfindung darstellt.

Detaillierte Beschreibung der bevorzugten Ausführungsbeispiele

[0029] Mit Bezug auf Fig. 1 wird eine Datenbank **102**, die auf einer Speicherungsvorrichtung gespeichert sein kann, die mit einem Computer gekoppelt ist, verwendet, um ein Modell der Schaltung, die getestet werden soll, einem Testprogrammgenerator **104** zuzuführen. Das Modell enthält die Informationen, die notwendig sind, um die Platine zu testen, einschließlich Komponententypen, Komponentenverbindungen, Komponentenwerte, Komponententoleranzen und einer Angabe, welche Schaltungsknoten zugreifbar sind. Der Testprogrammgenerator erzeugt ein Testprogramm, das den Betrieb der Messungshardware **106** steuert, wenn dieselbe einen Stimulus an die Testschaltung **110** anlegt und Messungen an derselben nimmt. Die Ergebnisse dieser Messungen und Informationen, die durch den Testprogrammgenerator **104** geliefert werden, werden durch eine Fehleranalyseroutine **108** verwendet, um Bestehen/Durchfallen- und Diagnoseinformationen an der Testschaltung zu erzeugen. Der Testprogrammgenerator und die Fehleranalyseroutine können Programme oder Routinen sein, die an einem Computer ausgeführt werden.

[0030] Der Testprogrammgenerator **104** oder die Fehleranalyseroutine **108** können in einem Speicher auf dem Computer gespeichert sein, auf einer Diskette oder auf irgendeinem anderen computerlesbaren Medium gespeichert sein. Dieselben können ein Teil eines einziges Stücks eines ausführbaren Codes sein oder dieselben können getrennte Programme oder Routinen sein. Ferner können dieselben auf dem gleichen Computer ausgeführt werden oder dieselben können auf unterschiedlichen Hardwarestücken laufen. Die Hardware, die das in Fig. 1 gezeigte Testsystem implementiert, kann eine Universalrechenvorrichtung sein, die mit der Messungshardware gekoppelt ist und einen ausführbaren Code ausführt, oder dieselbe kann eine kundenspezifische Hardware umfassen, wie beispielsweise eine anwendungsspezifische integrierte Schaltung, die eine oder mehrere der gezeigten Funktionen integriert.

[0031] Fig. 2 stellt die Hauptschritte dar, die durch den Testprogrammgenerator **108** unternommen werden, in Übereinstimmung mit einem Ausführungsbeispiel der vorliegenden Erfindung. Bei einem Schritt **202** liest der Testprogrammgenerator das Schaltungsmodell und jegliche andere Eingangsdaten, die notwendig sind, wie beispielsweise welche Knoten zugreifbar sind und die Komponententoleranzen. Bei einem Schritt **204** werden lose und kurzgeschlossene Komponenten aus dem Modell entfernt. Lose Komponenten sind dieselben, die nicht getestet werden können, weil es keinen Weg zwischen irgendwelchen der zugreifbaren Knoten gibt, der durch diese Komponente läuft. Bei einem Schritt **206** wird das Schaltungsmodell in Komponentengruppen zerlegt, die elektrisch getrennt bzw. elektrisch isoliert sind. Diese Komponentengruppen werden „Cluster" genannt. Ein Cluster ist als eine Komponentengruppe definiert, die für Testzwecke mit dem Rest der Schaltungsanordnung durch null oder einen Knoten verbunden ist. Bei einem Schritt **208** wird jeder Cluster weiter in reduzierte Cluster zerlegt und die Knoten, die benötigt werden, um jeden reduzierten Cluster zu testen, werden abgeschnitten. Ein reduzierter Cluster ist eine Gruppe von gezielten Komponenten, die die Größe und Kom-

plexität der Testerzeugung, Messung und Fehleranalyseprobleme bei aufeinander folgenden Stufen des Testprozesses reduziert. Der Prozess eines Erzeugens von „reduzierten" oder „unmittelbaren" Clustern und eines Auswählens der „Testpunkte" für jeden reduzierten Cluster ist detaillierter in einem anderen Teil dieses Dokuments beschrieben.

[0032] Bei einem Schritt **210** werden Stimulus- und Messungsknoten ausgewählt, um jede Komponente in jedem reduzierten Cluster zu testen. Einige Stimulus- und Messungsknoten können ausgewählt sein, um mehr als eine Komponente zu testen. Die Stimuli und Messungen können für einen Testdurchsatz, eine Testabdeckung oder einen gewissen Kompromiss zwischen den zweien optimiert sein.

[0033] Bei einem Schritt **212** werden für jeden Stimulus entsprechende Messungsknoten und eine erwünschte Anzahl von simultanen Fehlern, die getestet werden sollen, zumindest eine Äquivalenzklasse, eine U^*-Matrix und ein Satz von Testbegrenzungen erzeugt. Die Ausdrücke Äquivalenzklasse, U^*-Matrix, etc., werden später detaillierter erörtert. Jetzt genügt es zu sagen, dass diese Ausdrücke die Informationen darstellen, die später durch die Fehleranalyseroutine verwendet werden, um Bestehen/Durchfallen- und Diagnoseinformationen zu liefern.

[0034] Bei einem bevorzugten Ausführungsbeispiel ist der Prozess zum Erzeugen der Äquivalenzklassen, U^*-Matrizen und Testbegrenzungen für jeden Stimulus und entsprechende Messungsknoten an einem reduzierten Cluster wirksam. Dieser Prozess kann jedoch auf viel größere Komponentengruppen angewendet werden, einschließlich der ganzen Platine.

[0035] Wie bei vielen Testmethodologien muss zuerst ein Modell der Testschaltung aufgebaut werden. Dies kann die ganze Platine oder eine kleinere Anzahl von Komponenten sein, wie beispielsweise ein Cluster. Gleichermaßen kann dasselbe mehr als einen Stimulus und irgendeine Anzahl von Messungsknoten betreffen. Für eine Einfachheit und eine Berechnungseffizienz jedoch verwendet ein bevorzugtes Ausführungsbeispiel ein Testschaltungsmodell, das die Komponenten lediglich eines reduzierten Clusters und den Stimulus betrifft, der durch den Tester angelegt wird.

[0036] Das Testschaltungsmodell enthält Informationen über den Testerstimulus, die Komponenten und die Verbindung derselben, sodass die Testmethodologie genügend Informationen aufweist, um zu sagen, wann eine Komponente fehlerhaft ist. Viele mögliche Schaltungsmodelle und Formulierungen existieren. Viele dieser Modelle und Formulierungen sind in Computer Methods for Circuit Analysis and Design von Jir 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, beschrieben, die beide hierdurch durch Bezugnahme hierin aufgenommen sind.

[0037] Bei einem bevorzugten Ausführungsbeispiel wird ein Modell eines vereinfachten Tableaus verwendet. Das Modell eines vereinfachten Tableaus ist durch Gleichung 1 gegeben.

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

wobei I_b ein Spaltenvektor ist, der die Verzweigungsströme darstellt, V_n ein Spaltenvektor ist, der die Knotenspannungen darstellt, A die Reduziert-Inzidenz-Matrix ist, A^T die Transposition der Reduziert-Inzidenz-Matrix ist, K_i und K_v Matrizen sind, die aus den Verzweigungskonstitutivgleichungen abgeleitet sind, und S der Quellvektor ist, der den Wert der unabhängigen Quellen enthält. Gewöhnlich sind die unabhängigen Quellen ein Ergebnis des Stimulus, der durch die Testerhardware angelegt wird. Für die Zwecke dieser Erörterung ist n (nicht tief gestellt) gewählt, um die Anzahl von Knoten in der Schaltung darzustellen, und b (nicht tief gestellt) ist gewählt, um die Anzahl von Verzweigungen darzustellen.

[0038] Die Regeln zum Aufbauen von K_i und K_v sind einfach und betreffen allgemein ein Setzen jedes Elements der K_i- und der K_v-Matrix gemäß einer Tabelle, die den Typ eines Schaltungselements (d. h. Impedanz, Admittanz, Stromquelle, stromgesteuerte Spannungsquelle, etc.) und den Wert desselben auf die geeigneten Einträge in K_i und K_v bezieht.

[0039] Um darzustellen, wie K_i und K_v aufgebaut sein können, untersuche man Fig. 3. Fig. 3 zeigt eine einfache Schaltung mit n = 3 Knoten und b = 4 Verzweigungen, in Übereinstimmung mit einem Ausführungsbeispiel der vorliegenden Erfindung. Diese Schaltung kann die gesamte Platine, einen Cluster oder nur die Kom-

ponente eines reduzierten Clusters mit dem Tester angelegten Stimulus sein. I_b wird vier Ströme I_1–I_4 aufweisen und V_n wird zwei Knotenspannungen (V_{n1} und V_{n2}) aufweisen. Es ist anzumerken, dass es n – 1 Knotenspannungen bei dem V_n-Vektor anstelle von n Knotenspannungen gibt, weil die Knotenspannungen relativ zu einem Referenzknoten sind. Dem Referenzknoten (gewöhnlich Masse) ist oft die Zahl 0 zugewiesen. Die Knotenspannung des Referenzknotens, in Fig. 3 V_{n0}, ist der Definition nach 0 und muss als solches nicht als eine der Knotenspannungen eingeschlossen sein.

[0040] K_i, auch als die Impedanzmatrix bekannt, für das Netzwerk von Fig. 3 kann wie folgt lauten:

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

[0041] K_v, auch als die Admittanzmatrix bekannt, für das Netzwerk von Fig. 3 und die K_i von Gleichung 2 lautet:

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

wobei s die Laplace-Transformationsvariable ist. Es ist anzumerken, dass durch ein Eingeben der Kapazität in einer Admittanzform bei einem Aufbauen von K_i und K_v die s-Variable in dem Zähler gehalten wird. Um die Mathematik zu vereinfachen, können, falls lediglich passive Komponenten vorhanden sind, K_i und K_v aufgebaut sein, derart, dass K_i die Identitätsmatrix ist. Dies ist in Gleichungen 4 und 5 wie folgt gezeigt:

$$K_i = \begin{bmatrix} 1 & & & \\ & 1 & & \\ & & 1 & \\ & & & 1 \end{bmatrix} \qquad \text{(Gl. 4)}$$

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

[0042] Die Inzidenzmatrix, A, die die Verbindung der Komponenten für Fig. 3 definiert, lautet schließlich:

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

[0043] Es ist anzumerken, dass diese Inzidenzmatrix aufgebaut wurde, derart, dass ein Verzweigungsstrom, der in einen Knoten fließt, als ein negatives Vorzeichen aufweisend definiert ist, und ein Verzweigungsstrom, der aus einem Knoten fließt, als ein positives Vorzeichen aufweisend definiert ist. Diese Definitionen könnten umgekehrt sein.

[0044] Durch Substituieren von Gleichungen 4–6 in Gleichung 1 wird das vereinfachte Tableau für das in Fig. 3 gezeigte Netzwerk wie folgt erhalten:

$$\left[\begin{array}{cccc|cc} 1 & & & & 0 & 0 \\ & 1 & & & -1/R_2 & 0 \\ & & 1 & & -sC_3 & sC_3 \\ & & & 1 & 0 & -G_4 \\ \hline -1 & 1 & 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & -1 & 1 & 0 & 0 \end{array}\right]\left[\begin{array}{c} I_1 \\ I_2 \\ I_3 \\ I_4 \\ V_{n1} \\ V_{n2} \end{array}\right] = \left[\begin{array}{c} J_1 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \end{array}\right] \quad \text{(Gl. 7)}$$

[0045] Gleichung 7 kann nach einem speziellen Wert von s aufgelöst werden, um die Knotenspannungen und Verzweigungsströme zu bestimmen. Ein Lösen von Gleichung 7 kann per Hand unter Verwendung von Matrixverfahren vorgenommen werden, oder durch irgendeine Anzahl von computerisierten Mathematikpaketen oder -verfahren.

[0046] Einer der Wege, auf die eine Tableau-Gleichung nach den Verzweigungsströmen (I_b) und Knotenspannungen (V_n) gelöst werden kann, besteht darin, die Inverse des Tableaus zu berechnen. Hinsichtlich des verallgemeinerten Falls, der in Gleichung 1 gegeben ist, wäre dies wie folgt:

$$\left[\begin{array}{c} I_b \\ V_n \end{array}\right] = \left[\begin{array}{cc} K_i & -K_v A^T \\ A & 0 \end{array}\right]^{-1}\left[\begin{array}{c} S \\ 0 \end{array}\right] \quad \text{(Gl. 8)}$$

[0047] Diese Inverse kann partitioniert werden, derart, dass eine Teilmatrix, die lediglich diese Terme enthält, die die Knotenspannungen (V_n) beeinflussen, extrahiert werden kann. In der Darstellung:

$$\left[\begin{array}{c} I_b \\ V_n \end{array}\right] = \left[\begin{array}{cc} K_i & -K_v A^T \\ A & 0 \end{array}\right]^{-1}\left[\begin{array}{c} S \\ 0 \end{array}\right] = \left[\begin{array}{c|c} & \\ Z & \end{array}\right]\left[\begin{array}{c} S \\ 0 \end{array}\right] \quad \text{(Gl. 9)}$$

[0048] Die Z-Matrix ist aus n – 1 Zeilen und b Spalten gebildet, wobei wiederum n die Anzahl von Knoten in der Schaltung und b die Anzahl von Verzweigungen ist. Die Extraktion der Z-Matrix ermöglicht die Verwendung der folgenden einfachen Gleichung, um Knotenspannungen auf angelegte unabhängige Quellen zu beziehen:

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

[0049] Falls jede Schaltungsverzweigung in dem Modell lediglich eine Komponente aufweist, ist es eine Eigenschaft der Z-Matrix, dass die Spalten derselben eine Eins-zu-Eins-Entsprechung zu jeder der Komponenten aufweist. Dies bedeutet, dass zusammengesetzte Komponenten, wie beispielsweise ein Induktor, der sowohl einen Reihenwiderstandswert als auch eine ideale Induktivität aufweist, in mehrere Zweige geteilt werden sollte, um diese Eins-zu-Eins-Beziehung beizubehalten. (Das heißt eine Verzweigung für den Widerstandswert und eine Verzweigung für die Induktivität.) Falls z. B. die Spalten der Inzidenzmatrix, A, den Komponenten in Fig. 3 wie folgt entsprechen (man beachte, dass, da jede Verzweigung eine einzige Komponente ist, die Ausdrücke Komponente und Verzweigung austauschbar verwendet werden können):

$$A = \begin{array}{c} \begin{array}{cccc} J_1 & R_2 & C_3 & G_4 \end{array} \\ \left[\begin{array}{cccc} -1 & 1 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & -1 & 1 \end{array}\right] \end{array}$$

dann, die Z-Matrix, die die gleiche (n – 1)xb-Abmessung wie die A-Matrix aufweist, die gleiche Entsprechung zwischen den Spalten derselben aufweisen würde. In der Darstellung:

$$Z = \begin{array}{c} \begin{array}{cccc} J_1 & R_2 & C_3 & G_4 \end{array} \\ \left[\begin{array}{cccc} \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \end{array}\right] \end{array}$$

[0050] Das Modell eines vereinfachten Tableaus, das irgendeine Schaltung beschreibt, deren Komponenten

jeweils einen einfachen vordefinierten Wert aufweisen, ist durch Gleichung 1 auf eine verallgemeinerte Weise gegeben. Wenn die Komponentenwerte verändert werden, (z. B. durch ein Aufweisen einer Toleranz anstelle eines einzigen Werts oder durch ein fehlerhaft Sein) kann die Schaltung unter Verwendung dieser Gleichung geschrieben werden:

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

[0051] Gleichung 11 zeigt, dass eine Veränderung bei der Admittanzmatrix K_v um einen Betrag ΔK_v in Veränderungen ΔI_b und ΔV_n bei dem Verzweigungsstrom- bzw. dem Knotenspannungsvektor für den gleichen Stimulus S resultiert. Um die Mathematik zu vereinfachen, wird K_i dadurch konstant gehalten, dass gewählt wird, alle Veränderungen bei Komponentenwerten als Veränderungen bei der Admittanzmatrix K_v zu beschreiben. Falls z. B. der Nominalwert des Widerstands in Fig. 3 R_2 ist und sich derselbe von diesem Nominalwert um 100 Ohm erhöht, dann gilt:

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

[0052] In dem allgemeinen Fall ergibt ein Subtrahieren der Gleichung 1 von Gleichung 11:

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

aus der:

$$\begin{bmatrix} \Delta I_b \\ \Delta V_n \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} K_i & -K_v A^T \\ A & 0 \end{bmatrix}^{-1} \begin{bmatrix} \Delta K_v A^T (V_n + \Delta V_n) \\ 0 \end{bmatrix} = \left[\begin{array}{c|c} & \\ Z & \end{array}\right] \begin{bmatrix} \Delta K_v A^T (V_n + \Delta V_n) \\ 0 \end{bmatrix}$$

$$\text{(Gl. 14)}$$

[0053] Ein Extrahieren der Teile von Gleichung 14, die ΔV_n beeinflussen, ergibt:

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

[0054] Bei einem bevorzugten Ausführungsbeispiel sind nicht alle Knoten einer Testschaltung für die Messungshardware zugreifbar. Deshalb können nicht alle der Knotenspannungen gemessen werden. Die Zeilen der Matrizen in Gleichung 15 können neu angeordnet werden und in Veränderungen bei Knotenspannungen, die beobachtet werden können, und Veränderungen, die nicht beobachtet werden können, wie folgt partitioniert werden:

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

wobei „ac" den Satz von Knoten bezeichnet, die für die Messungshardware zugreifbar sind, und „nac" die nicht zugreifbaren Knoten bezeichnet.

[0055] Folglich ergibt die folgende Gleichung lediglich die beobachtbaren Veränderungen bei Knotenspannungen:

$$\Delta V_{(n,ac)} = Z_{(ac)} \Delta K_v A^T (V_n + \Delta V_n) \qquad \text{(Gl. 17)}$$

[0056] Bei einem bevorzugten Ausführungsbeispiel werden die Terme dieser Gleichung verwendet, um Äquivalenzklassen, U^*-Matrizen und Testbegrenzungen zu erzeugen. Der Prozess zum Erzeugen der Äquivalenz-

klassen und U*-Matrizen folgt vorzugsweise dem Prozess, der bei dem herkömmlichen T_F-Äquivalenzklassenansatz genommen wird. Zusätzliche Informationen hinsichtlich des T_F-Äquivalenzklassenansatzes sind zu finden in „The T_F-Equivalence Class Approach to Analog Fault Diagnosis Problems" von Togawa, Matsumoto und Arai, IEEE TRANSACTIONS ON CIRCUITS AND SYSTEMS, Bd. cas-33 Nr. 10, Oktober 1986.

[0057] Eine rigorose mathematische Beschreibung des T_F-Äquivalenzklassenansatzes ist in dem vorhergehend erwähnten Papier von Togawa, The T_F-Eguivalence Class Approach to Analog Fault Diagnosis Problems, IEEE TRANSACTIONS ON CIRCUITS AND SYSTEMS, Bd. cas-33 Nr. 10, (1986) gegeben, das hierdurch durch Bezugnahme hierin aufgenommen ist. Ein einfaches Beispiel basierend auf der in Fig. 4 gezeigten Schaltung in Übereinstimmung mit einem Ausführungsbeispiel der vorliegenden Erfindung wird verwendet, um einige Konzepte des T_F-Äquivalenzklassenansatzes darzustellen. Die Schaltung von Fig. 4 weist lediglich Widerstandswerte zusätzlich zu einem Quellstimulus auf. Die gleichen grundlegenden Verfahren des T_F-Äquivalenzklassenansatzes können jedoch angewendet werden, wenn die Komponenten komplexe Impedanzen aufweisen.

[0058] Man nehme an, dass die Komponenten in Fig. 4 Nominalwerte aufweisen, wie es in der Figur gezeigt ist. Man nehme ferner an, dass die einzigen zugreifbaren Knoten zusätzlich zu dem Referenzknoten V_{n0}, V_{n1} und V_{n2} sind. Falls jede der Komponenten außer einer konstant bei dem Nominalwert derselben gehalten wird und diese eine Komponente durch einen großen Bereich von Werten gewobbelt wird, erzeugt dieselbe eine Linie, wenn ΔV_{n2} über ΔV_{n1} aufgetragen wird. ΔV_{n1} und ΔV_{n2} sind die Veränderungen bei V_{n1} und V_{n2} von den Nominalwerten derselben. Wenn dies für jede Komponente nacheinander vorgenommen wird, resultiert die Darstellung von Fig. 5, die in Übereinstimmung mit einem Ausführungsbeispiel der vorliegenden Erfindung ist. In Fig. 5 ist jede Linie mit der Komponente etikettiert, die verändert wurde.

[0059] Diese Darstellung hilft die Äquivalenzklassen von Fig. 4 darzustellen. Man nehme z. B. den Fall, bei dem angenommen wird, dass alle Komponenten außer einer bei dem Nominalwert derselben sind. Zuerst werden V_{n1} und V_{n2} an der Testschaltung gemessen, um eine $\Delta V_{(n1,test)}$ und $\Delta V_{(n2,test)}$ zu erhalten, die dann an Fig. 5 aufgetragen werden. Falls die Position dieses Punkts auf die Linien für R_1, R_2 oder R_3 fallen würde, würde dasselbe angeben, dass die entsprechende Komponente die Komponente ist, die nicht bei dem Nominalwert derselben ist. Falls die Position des Punkts auf die Linie für R_4 und R_5 fallen würde, dann würde dasselbe angeben, dass entweder R_4 oder R_5 oder beide nicht bei dem Nominalwert derselben sind und dass der Rest der Komponenten bei den Nominalwerten derselben sind. Falls ferner der Punkt auf keiner der Linien liegt, dann kann gefolgert werden, dass irgendeine Kombination dahingehend auftrat, dass mehr als eine Komponente nicht nominal ist (anders als dass R_4 und R_5 beide nicht nominal sind).

[0060] Wie es in Fig. 5 gezeigt ist überlappen die Linien für R_4 und R_5. Allgemein ist es dann lediglich durch ein Betrachten der Spannungen bei den zugreifbaren Knoten V_{n1} und V_{n2} unmöglich, den Fall, bei dem R_4 nicht nominal ist, von dem Fall zu unterscheiden, wenn R_5 nicht nominal ist. Diese Komponenten werden dann als in der gleichen Äquivalenzklasse befindlich betrachtet.

[0061] Die Verfahren des T_F-Äquivalenzklassenansatzes sind auf höhere Dimensionen anwendbar. Das heißt um größere Schaltungen mit mehr zugreifbaren Knoten zu umfassen, um komplexe sowie reale Spannungsmessungen zu umfassen, um mehrere Komponenten, die nicht nominal sind, mehrere Stimuli und mehrere Stimulusfrequenzen zu umfassen. Das vorhergehende Beispiel war auf lediglich zwei Dimensionen und eine nichtnominale Komponente zu einer Zeit begrenzt, sodass dasselbe ohne weiteres visualisiert würde und an einer zweidimensionalen Darstellung gezeigt werden konnte.

[0062] Bei einem bevorzugten Ausführungsbeispiel können die Äquivalenzklassen unter Verwendung der Elemente der $Z_{(ac)}$-Matrix von Gleichung 17 bestimmt werden. Der Aufbau der $Z_{(ac)}$-Matrix und der Äquivalenzklassen wird typischerweise durch den Testprogrammgenerator **104** basierend auf den Informationen vorgenommen, die von der Datenbank **102** nach einem Partitionieren der Schaltung in Cluster erhalten wird. Für den Fall, wenn lediglich zwei Knoten zugreifbar sind (V_{n1} und V_{n2}) lautet die $Z_{(ac)}$-Matrix für die in Fig. 3 gezeigte Schaltung:

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

wobei $Z_{(ac)}$ eine Spaltensortierung aufweist, die R_1, R_2, R_3, R_4 bzw. R_5 entspricht. Eine vollständige Liste aller Äquivalenzklassen kann durch ein Überprüfen, ob jede Kombination von Elementen und Gruppen von Elementen zu der gleichen Äquivalenzklasse gehört, und ein anschließendes entsprechendes Gruppieren derselben

aufgebaut werden. Allgemein gehören zwei Gruppen von Komponenten zu der gleichen Äquivalenzklasse, wenn es lediglich durch ein Betrachten der Spannungen bei den zugreifbaren Knoten unmöglich ist, den Fall, bei dem eine Gruppe nichtnominale Komponenten aufweist, davon zu unterscheiden, wenn die andere Gruppe nichtnominale Komponenten aufweist. Genauer gesagt kann die folgende Prozedur verwendet werden, um zu bestimmen, ob zwei Komponenten oder Gruppen von Komponenten in die gleiche Äquivalenzklasse gehören. Die zwei Gruppen von Komponenten werden als f1 bzw. f2 bezeichnet und jede kann aus einer oder mehreren Komponenten gebildet sein, die nicht nominal sind.

1. Eine Matrix aus den Spalten der $Z_{(ac)}$-Matrix entsprechend der ersten Gruppe ($Z_{(acf1)}$) zusammenfügen. Den Rang derselben berechnen, rank ($Z_{(acf1)}$).
2. Eine Matrix aus den Spalten der $Z_{(ac)}$-Matrix entsprechend der zweiten Gruppe ($Z_{(acf2)}$) zusammenfügen. Den Rang derselben berechnen, rank ($Z_{(acf2)}$).
3. Eine Matrix aus den Spalten der $Z_{(ac)}$-Matrix entsprechend der Verbindung der ersten Gruppe und der zweiten Gruppe ($Z_{(acf1uf2)}$) zusammenfügen. Den Rang derselben berechnen, rank ($Z_{(acf1uf2)}$).
4. Falls und nur falls rank ($Z_{(acf1)}$) = rank ($Z_{(acf2)}$) = rank ($Z_{(acf1uf2)}$), gehören die Gruppen f1 und f2 zu der gleichen Äquivalenzklasse.

[0063] Unter Verwendung von f1 = {R_1} und f2 = {R_2} als ein Beispiel:

1.

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

2.

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

3.

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

4. Da hier rank ($Z_{(acf1uf2)}$) rank ($Z_{(acf1)}$) = rank ($Z_{(acf2)}$) ist, gehören dann R_1 und R_2 nicht zu der gleichen Äquivalenzklasse.

[0064] Ein anderes Beispiel, dieses Mal mit f1 = {R_1, R_4} und f2 = {R_1, R_2}:

1.

$$Z_{(ac,f1)} = \begin{bmatrix} 1000 & 125 \\ 0 & 187{,}5 \end{bmatrix} \quad rank\left(Z_{(ac,f1)}\right) = 2$$

2.

$$Z_{(ac,f2)} = \begin{bmatrix} 1000 & 375 \\ 0 & 562{,}5 \end{bmatrix} \quad rank\left(Z_{(ac,f2)}\right) = 2$$

3.

$$Z_{(ac,f1\cup f2)} = \begin{bmatrix} 1000 & 125 & 1000 & 375 \\ 0 & 187{,}5 & 0 & 562{,}5 \end{bmatrix} \quad rank\left(Z_{(ac,f1\cup f2)}\right) = 2$$

4. Da hier rank ($Z_{(acf1)}$) = rank ($Z_{(acf2)}$) = rank ($Z_{(acf1uf2)}$) ist, gehören die Gruppen f1 = {R_1, R_4} und f2 = {R_1, R_5} zu der gleichen Äquivalenzklasse.

[0065] Bei einem bevorzugten Ausführungsbeispiel wird ein mathematisch und berechnungsmäßig vorteilhaftes Verfahren zum Überprüfen verwendet, ob ein Punkt in dem Raum einer Äquivalenzklasse in einer beliebigen Anzahl von Dimensionen liegt. Dies ermöglicht, dass ein Satz von Messungen bei zugreifbaren Knoten verwendet wird, um zu bestimmen, welche Äquivalenzklasse die Komponenten oder Komponenten, die für eine beliebige Anzahl von zugreifbaren Knoten nichtnominal sind, enthält.

[0066] Die Prozedur, um die Äquivalenzklassen (falls es welche gibt) zu finden, die nichtnominale Komponenten enthalten, die auch durch den T_F-Äquivalenzklassenansatz verwendet wird, ist wie folgt zusammengefasst:

1. Ein Mitglied einer Äquivalenzklasse auswählen. Zur Klarheit stellt f1 die Gruppe von Komponenten in dem Mitglied der Äquivalenzklasse dar, $\mathfrak{I}$ stellt die Äquivalenzklasse dar. Deshalb ist f1 ein Mitglied von $\mathfrak{I}$. Eine Matrix aus den Spalten der $Z_{(ac)}$-Matrix entsprechend den Komponenten in dieser Gruppe zusammenfügen. ($Z_{(acf1)}$).
2. Die Singularwertzerlegung („SVD" = Singular Value Decomposition) verwenden, um die Matrix von Schritt 1 in drei Terme zu faktorisieren. $SVD(Z_{(acf1)}) = U_{(acf1)} \Sigma_{(acf1)} W^T_{(acf1)}$. (Beachte: die SVD wird allgemein als das Matrixprodukt der drei Terme U, Σ und V^T geschrieben, wobei U die Matrix ist, die die linken Einzelvektoren enthält, Σ die Matrix ist, die Einzelwerte enthält, und V die Matrix ist, die die rechten Einzelvektoren enthält. Leider wurde die Variable V gewählt, um in den vorhergehenden Erörterungen Spannung zu bedeuten. Deshalb wird diese Erörterung die Variable W verwenden, um die rechte Einzelmatrix darzustellen. Man beachte ferner, dass der Rang von $Z_{(acf1)}$ ohne weiteres aus SVD ($Z_{(acf1)}$) erhalten wird.)
3. Die konjugierte Transposition von $U_{(acf1)}$, $U^*_{(acf1)}$ erzeugen. (Man beachte, dass, da $U_{(acf1)}$ unitär ist, die konjugierte Transposition von $U_{(acf1)}$ die gleiche wie die Inverse und die Adjungierte von $U_{(acf1)}$ ist.)
4. $\Delta V(n, ac, meas)$ durch ein Subtrahieren der Spannungen, die bei den zugreifbaren Knoten erwartet werden, falls alle Komponenten bei dem Nominalwert derselben sind, von den Spannungen, die bei den zugreifbaren Knoten gemessen werden, erzeugen.
5. $U^*_{(acf1)}$ Und $\Delta V_{(n,ac,meas)}$ multiplizieren.
6. Falls die ersten r Elemente (Zeilen) von $U^*_{(acf1)}\Delta V_{(n,ac,meas)}$ nicht 0 sind und der Rest 0 ist, dann enthält die Äquivalenzklasse $\mathfrak{I}$, von der f1 ein Mitglied ist, die Gruppe von Komponenten, die nichtnominal sind. Die Variable r stellt die maximale Anzahl von simultan nichtnominalen (oder fehlerhaften) Komponenten dar, die überprüft werden. (r ist ferner gleich rank(Z(acf1).) Falls die Gruppe von Komponenten f1 lediglich ein Mitglied von $\mathfrak{I}$ ist, dann sind alle der Komponenten in f1 nichtnominal.
7. Falls die ersten r Elemente (Zeilen) von $U^*_{(acf1)}\Delta V_{(n,ac,meas)}$ nicht alle nicht null sind oder irgendwelche der restlichen Elemente nicht null sind, dann enthält die Äquivalenzklasse $\mathfrak{I}$, von der f1 ein Mitglied ist, nicht die Gruppe von Komponenten, die nichtnominal sind. Folglich sollten die Schritte 1–6 für jede Äquivalenzklasse der Reihe nach wiederholt werden, bis eine gefunden wird, die die nichtnominale Gruppe von Komponenten enthält oder alle Äquivalenzklassen erschöpft sind.

[0067] Bei einem bevorzugten Ausführungsbeispiel werden die Schritte 1–3 oben typischerweise nur einmal für jede Äquivalenzklasse durchgeführt und die resultierenden $U_{(acf1)}$-, $U^*_{(acf2)}$- ... etc. Matrizen werden typischerweise für eine Verwendung bei Schritt 5 gespeichert. Schritt 4 wird gewöhnlich einmal für jede getestete Schaltung durchgeführt. Schritte 5 und 6 werden zusätzlich typischerweise aufeinander folgend für jede Äquivalenzklasse wiederholt, bis eine Äquivalenzklasse (falls es welche gibt) gefunden wird, die die Gruppe von Komponenten enthält, die nichtnominal an der Schaltung sind, die getestet wird. Eventuell wird keine Äquivalenzklasse gefunden, falls es mehr simultan nichtnominale Komponenten gibt als betrachtet wurden, als die Äquivalenzklassen aufgebaut wurden.

[0068] An vielen Schaltungen sind Komponenten nicht auf einen einzigen Nominalwert beschränkt, um als nicht fehlerhaft betrachtet zu werden. Dieser Bereich von Komponentenwerten wird als eine Toleranz bezeichnet. Bei einem bevorzugten Ausführungsbeispiel ist die Null/Nicht-Null-Bestimmung in Schritt 6 oben durch die folgende Gleichung regiert, um mit Komponententoleranzen zurechtzukommen:

$$\gamma_{(ac,f,min)} \leq U^*_{(ac,f)}\Delta V_{(n,ac,meas)} \leq \gamma_{(ac,f,max)} \qquad \text{(Gl. 19)}$$

[0069] Falls mit anderen Worten ein spezielles Element von $U^*_{(ac,f)}\Delta V_{(ac,test)}$ größer oder gleich $\gamma_{(ac,f,min)}$ (für dieses spezielle Element und diesen speziellen Fehler „f") ist und $U^*_{(ac,f)}\Delta V_{(ac)}$ kleiner als oder gleich $\gamma_{(ac,f,max)}$ (für dieses spezielle Element und diesen speziellen Fehler in „f") ist, dann sollte dasselbe als eine Null betrachtet werden. Andernfalls sollte dasselbe als nicht null betrachtet werden. Ein „Betrachten" eines speziellen Elements von $U^*_{(acf)}\Delta V_{(n,ac,meas)}$ als Null/Nicht-Null ermöglicht, dass die Tests von Schritt 6 und 7 oben in dem Fall erzielt werden, in dem Komponenten Toleranzen aufweisen. Durch ein Ermöglichen, dass ein Bereich von Werten für jedes Element von $U^*_{(acf)}\Delta V_{(n,ac,meas)}$ als Null/Nicht-Null betrachtet wird, kann jedoch mehr als eine Äquivalenzklasse dem Test von **Fig. 6** genügen und als ein Mitglied enthaltend identifiziert werden, dessen Komponenten außerhalb der Toleranz sind. Dennoch sollte die Suche nach den Komponenten außerhalb der Toleranz erheblich eingeschränkt werden, da lediglich eine Äquivalenzklasse wirklich ein Mitglied aufweist, dessen Komponenten außerhalb der Toleranz sind.

[0070] Falls $U^*\Delta V_{(n,ac,meas)}$ komplexe Zahlen betrifft, müssen die realen und imaginären Teile beide Begrenzungen erfüllen, um als eine Null betrachtet zu werden. Die Null/Nicht-Null-Bestimmung wird durch den folgenden

Satz von Gleichungen beherrscht:

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

[0071] In beiden Gleichungen 19 und 20 sind die γ-Terme Vektoren mit einzelnen Elementen, die jeweils einer Zeile von U^{*} entsprechen. Die Funktionen real() und imag() extrahieren den realen bzw. den imaginären Teil aus dem Eingangsvektor.

[0072] Bei einem exemplarischen Ausführungsbeispiel ist irgendein Verfahren, das eine Funktion minimiert und maximiert, ausreichend, um jedes Element der γ-Vektoren zu berechnen. Bei einem bevorzugten Ausführungsbeispiel basiert das Verfahren, das verwendet wird, um die γ-Vektoren zu berechnen, auf einer linearen Programmierung (LP = linear programming). Eine Matrixformulierung eines LP-Modells wird eine Standardform-LP genannt und ist gekennzeichnet durch:
min (oder max) cx
unterliegt Dx = b, x ≥ 0.

[0073] Um die Begrenzungsmatrix D aufzubauen, kann die Toleranz an den Elementen von K_v als eine Toleranz an dem realen Abschnitt der komplexen Werte und eine Toleranz an dem imaginären Abschnitt betrachtet werden. Falls lediglich ein Abschnitt existiert (z. B. im Falle eines Widerstands ist der entsprechende Wert in K_v eine reale Zahl und für einen Kondensator weist der Wert lediglich einen imaginären Abschnitt auf), ist die Toleranz an dem anderen Abschnitt null. Da eine lineare Programmierung die implizite Begrenzung aufweist, dass alle Entscheidungsvariablen größer als oder gleich null sein müssen, kann die Toleranz an den realen Abschnitten von K_v beschrieben werden durch:

$$\mathrm{real}(\min K_v) \leq \mathrm{real}(K_v) \leq \mathrm{real}(\max K_v)$$
$$\Leftrightarrow$$
$$\mathrm{real}(K_v) = X_{real} + \mathrm{real}(\min K_v) = \mathrm{real}(\max K_v) - Y_{real} \quad \text{with } X_{real} \geq 0 \text{ and } Y_{real} \geq 0$$
$$\Leftrightarrow$$
$$X_{real} + Y_{real} = \mathrm{real}(\max K_v) - \mathrm{real}(\min K_v)$$

[0074] Gleichermaßen können die imaginären Abschnitte von K_v beschrieben werden durch:

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

[0075] Die obigen Gleichungen können dann wie folgt geschrieben werden:

$$\begin{bmatrix} \begin{bmatrix} 1 & 0 & \cdots & \cdots & 0 & 1 & 0 & \cdots & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & \cdots & 0 & 0 & 1 & 0 & \cdots & 0 \\ \vdots & \ddots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \ddots & \vdots & \vdots & \vdots \\ 0 & \cdots & 0 & 1 & 0 & 0 & \cdots & 0 & 1 & 0 \\ 0 & \cdots & 0 & 0 & 1 & 0 & \cdots & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} & 0 \\ 0 & \begin{bmatrix} 1 & 0 & \cdots & \cdots & 0 & 1 & 0 & \cdots & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & \cdots & 0 & 0 & 1 & 0 & \cdots & 0 \\ \vdots & \ddots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \ddots & \vdots & \vdots & \vdots \\ 0 & \cdots & 0 & 1 & 0 & 0 & \cdots & 0 & 1 & 0 \\ 0 & \cdots & 0 & 0 & 1 & 0 & \cdots & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \begin{bmatrix} X_{real,1} \\ \vdots \\ X_{real,b} \\ Y_{real,1} \\ \vdots \\ Y_{real,b} \end{bmatrix} \\ \begin{bmatrix} X_{imag,1} \\ \vdots \\ X_{imag,b} \\ Y_{imag,1} \\ \vdots \\ Y_{imag,b} \end{bmatrix} \end{bmatrix} =$$

$$\begin{bmatrix} \begin{bmatrix} \text{real}(\max K_{v,11}) - \text{real}(\min K_{v,11}) \\ \text{real}(\max K_{v,22}) - \text{real}(\min K_{v,22}) \\ \vdots \\ \text{real}(\max K_{v,bb}) - \text{real}(\min K_{v,bb}) \end{bmatrix} \\ \begin{bmatrix} \text{imag}(\max K_{v,11}) - \text{imag}(\min K_{v,11}) \\ \text{imag}(\max K_{v,22}) - \text{imag}(\min K_{v,22}) \\ \vdots \\ \text{imag}(\max K_{v,bb}) - \text{imag}(\min K_{v,bb}) \end{bmatrix} \end{bmatrix}$$

(Gl. 21)

[0076] Man beachte, dass die obige Gleichung 21 die Form Dx = b aufweist, die mit der Form der Begrenzungen bei einer Standardform-LP übereinstimmt.

[0077] Die Zielfunktion, die optimiert werden soll, entspricht jeder Zeile der rechten Seite der folgenden Gleichung, die aus der Gleichung 17 abgeleitet ist:

$$U^{*}_{(ac,f)}\Delta V_{(n,ac)} = U^{*}_{(ac,f)}Z_{(ac)}\Delta K_v A^T(V_n + \Delta V_n) = \left[U^{*}_{(ac,f)}\right]\left[Z_{(ac)}\right]\left[\text{diag}\left(A^T(V_n + \Delta V_n)\right)\right]\left[\text{vekt}(\Delta K_v)\right]$$

(Gl. 22)

[0078] Hier transformiert die diag()-Funktion einen Vektor in eine diagonale Matrix, bei der die diagonalen Elemente die Vektorelemente sind und der Rest der Elemente 0 ist. Die vect()-Funktion nimmt die Elemente entlang der Diagonalen einer diagonalen Matrix und transformiert dieselben in einen Vektor. Dies weist die Form cx auf, wobei ΔK_v die Entscheidungsvariable ist. Hinsichtlich X_1 (der reale Teil) und X_2 (der imaginäre Teil) von ΔK_v sowie E_1 (der reale Teil) und E_2 (der imaginäre Teil) des Rests von Gleichung 22 geschrieben ergibt sich:

$$\left[U^{*}_{(ac,f)}\right]\left[Z_{(ac)}\right]\left[\text{diag}\left(A^T(V_n + \Delta V_n)\right)\right]\begin{bmatrix} X_{real,1} + jX_{imag,1} \\ X_{real,2} + jX_{imag,2} \\ X_{real,3} + jX_{imag,3} \\ \vdots \\ X_{real,b} + jX_{imag,b} \end{bmatrix} = \left(E_{real} + jE_{imag}\right)\left(X_{real} + jX_{imag}\right) =$$

$$\left(E_{real}X_{real} - E_{imag}X_{imag}\right) + j\left(E_{real}X_{imag} + E_{imag}X_{real}\right)$$

(Gl. 23)

[0079] Durch ein Trennen von Gleichung 23 in die reale und die imaginäre Komponente derselben werden zwei Zielfunktionen erhalten. Eine Zielfunktion ist für den realen Teil von Gleichung 23 und eine ist für den ima-

ginären Teil. Jede dieser Zielfunktionen muss unabhängig minimiert und maximiert werden. Die Zielfunktionen lauten:

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

und

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

[0080] Diese Funktionen sind nicht linear, weil sowohl ΔK_v als auch ΔV_n unbekannt sind. Dies kann durch ein geeignetes Zuweisen von Werten für die Elemente in ΔV_n und ein anschließendes Optimieren, um eine ΔK_v zu finden, gelöst werden. Fig. 6 ist ein Flussdiagramm, das die Schritte darstellt, um die Zielfunktion zu optimieren, in Übereinstimmung mit einem Ausführungsbeispiel der vorliegenden Erfindung. Bei einem Schritt **602** wird der Prozess durch ein Setzen von ΔVK_n zu null eingeleitet. Bei einem Schritt **604** wird die Zielfunktion unter Verwendung des aktuell zugewiesenen Werts von ΔV_n und des herkömmlichen Simplex-Verfahrens optimiert. Diese Optimierung kann eine Minimierung oder eine Maximierung sein, abhängig davon, ob $\gamma_{(ac,f,min)}$ bzw.

$\gamma_{(ac,f,max)}$ berechnet wird. Bei einem Schritt **606** geht dann der Prozess zu einem Schritt **608** über, falls dies der erste Durchlauf ist (d. h. ΔV_{vn} null ist). Falls es nicht der erste Durchlauf ist, dann geht der Prozess zu einem Schritt **610** über. Bei einem Schritt **608** wird ΔV_n aus der bei dem Schritt **604** gefundenen ΔK_v berechnet. Der Prozess kehrt dann in einer Schleife zu dem Schritt **604** zurück, um die Zielfunktion mit der neuen ΔV_n zu optimieren.

[0081] Falls sich die Zielfunktion, die bei dem Schritt **604** optimiert wird, von dem letzten Durchlauf verbessert hat, geht bei einem Schritt **610** der Prozess zu einem Schritt **614** über. Falls sich die Zielfunktion von dem letzten Durchlauf nicht verbessert hat, wird k bei einem Schritt **612** durch 2 dividiert und dann geht der Prozess zu dem Schritt **614** über. Bei einem Schritt **614** wird eine neue ΔV_n berechnet als $\Delta V_{vn} \leftarrow (1 + k)\, \Delta V_n$. Bei einem Schritt **616** wird eine Überprüfung vorgenommen, um zu sehen, wie nahe die neue ΔV_n der letzten ΔV_n ist. Falls die neue ΔV_n nahe genug ist, z. B. 1%, dann endet der Prozess bei einem Schritt **618**. Falls die neue ΔV_n nicht nahe genug ist, dann kehrt der Prozess in einer Schleife zurück zu dem Schritt **604**, um die Zielfunktion erneut mit der neuen ΔV_n zu optimieren.

[0082] Die Schritte in Fig. 6 bilden ein Suchverfahren, das eine ΔV_n findet, der die optimierteste Zielfunktion erzeugt. In diesem Fall ist dieselbe eine Halbierungssuche. Andere Suchverfahren könnten ebenfalls verwendet werden. Beispiele von Suchtypen, die verwendet werden könnten, sind die Fibonacci-Suche, die Golden-Section-Suche und die Dichotomus-Suche. Andere Suchtypen, die verwendet werden könnten, sind detailliert dargelegt in Algorithms von R. Sedgewick, Addison-Wesley, Reading Mass., 1988.

[0083] Wenn der Algorithmus einmal bei eine ΔK_v endet, die die Zielfunktion entweder minimiert oder maximiert, können die realen und imaginären $\gamma_{(ac,f,min)}$ und $\gamma_{(ac,f,max)}$ aus der Optimierungsroutine erhalten werden oder können aus ΔK_v und der letzten ΔV_n unter Verwendung der folgenden Gleichung berechnet werden, die von der Zielfunktion abgeleitet ist:

$$\gamma_{(ac,f)} = U^*_{(ac,f)} \Delta V_{(n,ac)} = U^*_{(ac,f)} Z_{(ac)} \Delta K_v A^T (V_n + \Delta V_n) \qquad \text{(Gl. 26)}$$

[0084] Unter erneuter Bezugnahme auf Fig. 2 werden bei einem Schritt **210** Stimulus- und Messungsknoten ausgewählt, um jede Komponente in dem reduzierten Cluster zu testen. Dieser Prozess eines Auswählens von Stimulus- und Messungsknoten könnte an größeren Komponentengruppen durchgeführt werden, einschließlich Clustern oder der ganzen Schaltung. Bei einem bevorzugten Ausführungsbeispiel jedoch verwendet der Prozess zum Auswählen die Komponenten in einem resultierenden Cluster, um eine Effizienz zu verbessern und eine Komplexität zu reduzieren. Um den Prozess zum Auswählen von Stimulus- und Messungsknoten darzustellen, nehme man Fig. 7 als ein exemplarisches reduziertes Cluster an. Fig. 7 zeigt die Schaltung von Fig. 4, wobei die Stromquelle, die durch die Testhardware, J_1, bereitgestellt ist, entfernt ist, in Übereinstimmung mit einem Ausführungsbeispiel der vorliegenden Erfindung. Bei dem in Fig. 7 dargestellten Beispiel sind Knoten V_{n0}, V_{n1} und V_{n2} erneut die einzigen zugreifbaren Knoten. Fig. 4 stellt nur eine von drei möglichen Stimuluspositionen dar, die gewählt worden sein könnten. Die anderen zwei sind in Fig. 8 und Fig. 9 gemäß einem Ausführungsbeispiel der vorliegenden Erfindung dargestellt. Man beachte, 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, die in Fig. 9 gezeigt ist, nicht ausgewählt werden, um zu versuchen, R_1 zu testen.

[0085] Um eine Komponente zu testen, ist es erwünscht, die Spannung über diese Komponente zu maximieren. Dies maximiert die Abhängigkeit zumindest einer Knotenspannung von dem Komponentenwert. Ein Prozess zum Wählen eines Stimulus, der die Verzweigungsspannung über eine Komponente maximiert, ist in Fig. 10 in Übereinstimmung mit einem Ausführungsbeispiel der vorliegenden Erfindung dargestellt.

[0086] Bei einem Schritt **1022** werden die Verzweigungsspannungen für jede Komponente für jede Stimulusposition berechnet. Bei einem Schritt **1024** wird eine Kostenfunktion auf die Verzweigungsspannungen angewendet. Eine Kostenfunktion könnte verwendet werden, um die Erwünschtheit einiger Stimuli gegenüber anderen zu reduzieren (oder zu erhöhen). Zum Beispiel benötigen Spannungsmessungen bei niedrigeren Frequenzen länger, weil das Messungsintervall die Periode (oder einen Bruchteil derselben) der angelegten Frequenz umfassen muss. Um eine Kostenfunktion aufzunehmen, können die Knotenspannungswerte von verschiedenen Stimuli mit geeigneten Zahlen multipliziert werden. Eine Multiplikation mit einer positiven Zahl kleiner als 1 verringert die Erwünschtheit des Stimulus. Eine Multiplikation mit positiven Zahlen größer als 1 erhöht die Erwünschtheit dieser Quelle.

[0087] Bei einem Schritt **1026** werden die Beträge der Verzweigungsspannungswerte sortiert und doppelte Werte werden eliminiert. Bei einem bevorzugten Ausführungsbeispiel werden dieselben von dem kleinsten zu

dem größten sortiert. Bei einem Schritt **1028** werden nicht nützliche Verzweigungsspannungen zu null gesetzt. Bei dem Schritt **1028** werden ferner Verzweigungsspannungen, die innerhalb eines vorbestimmten Faktors voneinander sind, zu dem gleichen Wert gerundet. Eine Verzweigungsspannung über eine Vorrichtung wird lediglich als nützlich betrachtet, falls eine Veränderung bei dieser Spannung dazwischen erfassbar ist, wenn die Vorrichtung den Minimalwert derselben aufweist und wenn die Vorrichtung den Maximalwert derselben aufweist. Zum Beispiel ist eventuell eine Veränderung bei einer Spannung lediglich erfassbar, falls dieselbe größer als 1 Mikrovolt ist. Verzweigungsspannungen, die darin resultieren können, dass Veränderungen zwischen einem Minimal- und einem Maximalwert einer Vorrichtung unerfassbar sind, können einer Rangordnungszahl null zugewiesen werden oder äquivalent vor einem in Rangordnung Stellen zu null gesetzt werden. Dies hilft die Messgenauigkeit der Testerhardware durch ein Behandeln von Verzweigungsspannungen, die eventuell nicht in erfassbaren Veränderungen resultieren, als „Kein-Strom"-Verzweigungen zu berücksichtigen.

[0088] Schließlich können Verzweigungsspannungen, die innerhalb eines vorbestimmten Faktors voneinander sind, zu der gleichen Zahl gerundet werden oder denselben kann die gleiche Rangordnung zugewiesen werden. Bei einem bevorzugten Ausführungsbeispiel werden Verzweigungsspannungen, die innerhalb eines Faktors von zwei sind, zu der gleichen Zahl vor einem in Rangordnung Stellen gerundet. Dieses Runden hilft die Anzahl von ausgewählten Stimuli zu reduzieren.

[0089] Bei einem Schritt **1030** wird jedem Verzweigungsspannungswert dann eine Rangordnungszahl zugewiesen. Bei einem bevorzugten Ausführungsbeispiel wird die Rangordnungszahl beginnend bei null mit der kleinsten Verzweigungsspannung und sich für jeden unterschiedlichen Verzweigungsspannungswert um eins inkrementierend zugewiesen. Diese Wahl ist jedoch beliebig. Viele andere Rangordnungsschemata, wie beispielsweise eine absteigende Rangordnung oder um eine unterschiedliche positive oder negative Zahl inkrementierend könnte verwendet werden, solange geeignete Einstellungen bei späteren Schritten vorgenommen wurden, wenn bestimmt wird, welcher Stimulus verwendet werden soll.

[0090] Bei einem Schritt **1032** wird dann eins von allen Rangordnungszahlen subtrahiert, falls irgendeine der Verzweigungsspannungen null war. Bei einem Schritt **1034** wird ein Gütefaktor jeder Stimulusposition zugewiesen. Der Gütefaktor wird typischerweise durch ein Ersetzen des Verzweigungsspannungswerts über jede Komponente mit der entsprechenden Rangordnungszahl und ein anschließendes Summieren der Rangordnungszahlen für jede Komponente zugewiesen.

[0091] Bei einem Schritt **1036** werden die Stimulusposition oder -positionen ausgewählt. Die Stimuluspositionen können gemäß einer Vielfalt von Kriterien basierend auf den Informationen gewählt werden, die bei den vorhergehenden Schritten entwickelt werden. Falls z. B. maximale Verzweigungsspannungen erwünscht sind, kann der folgende Prozess verwendet werden:

1. Jegliche Stimuluspositionen eliminieren, die nicht die höchste Rangordnungszahl für zumindest eine Komponente aufweisen.
2. Die Stimulusposition mit dem höchsten Gütefaktor auswählen.
3. Diese Komponenten aus einer Betrachtung eliminieren, bei denen die ausgewählte Stimulusposition die höchste Rangordnungszahl für diese Komponente aufweist.
4. Den ausgewählten Stimulus aus einer Betrachtung eliminieren.
5. Die Schritt 1–4 wiederholen, bis es keine weiteren zu betrachtenden Komponenten gibt.

[0092] Ein Weg eines Auswählens der Stimuluspositionen, um einen Testdurchsatz zu maximieren, kann darin bestehen, zuerst den Stimulus (falls es irgendwelche gibt) mit dem höchsten Gütefaktor auszuwählen, der keine Komponenten mit einer Rangordnungszahl null aufwies. Falls es keine Stimulusposition gab, die nicht zumindest eine Komponente mit einer Rangordnungszahl null aufwies, würde der Stimulus mit dem höchsten Gütefaktor ausgewählt und alle Komponenten mit Rangordnungszahlen von nicht null würden aus einer Betrachtung eliminiert. Dann könnte eine andere Stimulusposition ausgewählt werden und der Prozess wiederholt werden, bis es keine zu betrachtenden Komponenten mehr gäbe.

[0093] Ein dritter Weg eines Auswählens von Stimuluspositionen bestünde darin, ein Maximieren von Verzweigungsspannungen mit einem Testdurchsatz in Ausgleich zu bringen. Dies kann durch ein Hinzufügen eines Stimulus zu einer Zeit erzielt werden, bis ein Maß an Abdeckung und/oder Maß an Zeit erreicht ist. Dieser Ausgleich kann dem Benutzer überlassen sein oder durch einen automatisierten Regelsatz ausgewählt werden.

[0094] Ein Beispiel der Prozesse in Fig. 10 folgt. Zur Einfachheit 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. Gleichermaßen 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, resultiert 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

[0095] Bei einer Untersuchung der Tabelle 2 kann beobachtet werden, dass die Stimulusposition $\sigma_{n2,n2}$ eine größere Spannung über R_3 als jede der anderen zwei Stimuluspositionen erzeugt. Gleichermaßen ist zu sehen, 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.

[0096] Wenn die Verzweigungsspannungen in Tabelle 2 gemäß den Werten derselben sortiert werden, Duplikate eliminiert werden, und eine Rangordnungszahl zugewiesen wird, resultiert 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

[0097] Wenn die Verzweigungsspannungswerte in Tabelle 2 durch die entsprechende Rangordnungszahl und einen berechneten Gütefaktor ersetzt werden, resultiert Tabelle 4.

	R_1	R_2	R_3	R_4	R_5	Gütefaktor
$\sigma_{n1,n0}$	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

[0098] Man beachte, dass in Tabelle 4 die besten Einträge (d. h. mit der höchsten Rangordnung) für jede Komponente mit einem Sternchen (*) markiert wurden. Die Informationen in Tabelle 4 können dann verwendet werden, um die geeigneten Stimulusauswahlkriterien anzuwenden.

[0099] Das vorhergehende Beispiel basierte auf einer reinen Widerstandsschaltung und der Stimulus war auf eine einzige Frequenz (einschließlich DC) begrenzt. Wenn andere Komponenten als Widerstände ein Teil der Schaltung sind, können komplexe Knotenspannungen vorliegen. Diese Knotenspannungen sind eine Funktion einer Stimulusfrequenz. Das vorhergehend beschriebene Verfahren kann erweitert werden, um diese Situation abzudecken, durch ein Berechnen der Verzweigungsspannungen mit dem Stimulus bei einer Anzahl von Frequenzen bei jeder möglichen Quellenposition. Der normale Prozess eines in Rangordnung Stellens, eines Berechnens eines Gütefaktors und einer Auswahl könnte dann verwendet werden, um auszuwählen, welche Sti-

mulusposition oder -positionen und welche Frequenzen verwendet werden sollen. Die Form von Tabelle 2, wenn dieselbe auf mehrere Frequenzen erweitert ist, 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

[0100] Wie vorhergehend dargelegt, kann auch eine Kostenfunktion auf die Verzweigungsspannungsdaten angewendet werden. Eine Kostenfunktion könnte verwendet werden, um die Erwünschtheit einiger Stimuli gegenüber anderen zu reduzieren (oder zu erhöhen). Zum Beispiel benötigen Spannungsmessungen bei niedrigeren Frequenzen länger, weil das Messungsintervall die Periode (oder einen Bruchteil derselben) der angelegten Frequenz umfassen muss. Um eine Kostenfunktion aufzunehmen, können die Knotenspannungswerte von 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. Die Kostenfunktion, die bei dem obigen Beispiel verwendet wurde, war eins.

[0101] Wie es oben bei dem Schritt **1028** erörtert ist, werden die Verzweigungsspannungswerte, die eventuell nicht in erfassbaren Veränderungen resultieren, zu null gesetzt oder denselben wird eine Rangordnungszahl null zugewiesen. Ein Daumenregel-Prozess zum Bestimmen, welche Verzweigungsspannungswerte zu null zu setzen sind, basiert auf einer Gleichung 27.

$$\frac{2tV_b}{100} > Schwelle \qquad \text{(Gl. 27)}$$

wobei V_b der Verzweigungsspannungswert ist, der überprüft wird, und t die Toleranz in Prozent der Vorrichtung ist, die die Verzweigung ist, die überprüft wird. Schwelle ist eine vordefinierte Zahl, die die Genauigkeit der Messungshardware widerspiegelt. Bei einem bevorzugten Ausführungsbeispiel würde, falls die Testerhardware Spannungsdifferenzen kleiner als 1 Mikrovolt nicht erfassen kann, dann Schwelle gewählt, um 1 Mikrovolt zu betragen.

[0102] Bei einem bevorzugten Ausführungsbeispiel wird ein effizientes Verfahren zum Berechnen der Tabelle 2 verwendet. Ein Modell des Clusters in der Form eines vereinfachten Tableaus von Gleichung 1 ist der Anfangspunkt. Gleichung 1 ist zu einer Zweckmäßigkeit erneut gegeben.

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

[0103] Man beachte, dass durch ein Anordnen der Zeilen von Gleichung 1, um die Verzweigungsströme der Testkomponenten und die Verzweigungsströme der Stromquellenverzweigungen zu trennen, (unter der Annahme, dass es keine Spannungsquellen gibt) I_b geschrieben werden kann als:

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

wobei $I_{(b,test)}$ der Satz von Verzweigungsströmen der Testkomponenten in Vektorform ist und –J der Satz von Verzweigungsströmen in den Stromquellenverzweigungen (in Vektorform) ist. Ein Vornehmen ähnlicher Teilungen bei K_i, K_v und A ergibt:

$$K_i = \begin{bmatrix} \mathbf{1} & 0 \\ 0 & \mathbf{1} \end{bmatrix} \qquad \text{(Gl. 29)}$$

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

$$A = \begin{bmatrix} A_{(b,test)} & A_J \end{bmatrix} \qquad \text{(Gl. 31)}$$

wobei 1 eine Identitätsmatrix ist, sodass K_i gleich einer Identitätsmatrix ist. $K_{(v,test)}$ ist die Teilmatrix von K_v, die den Testkomponenten entspricht. Die Einträge in K_v, die den Stromquellen entsprechen, sind null. Ein Substituieren der Gleichungen 29–31 in Gleichung 1 und ein Vereinfachen ergibt.

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

[0104] Man rufe sich ins Gedächtnis, dass $A_{(b,test)}$, $I_{(b,test)}$ und $K_{(v,test)}$ normalerweise den Testkomponenten entsprechen und nicht irgendeinem Abschnitt des Stimulus entsprechen. Verzweigungsspannungen sind auf Knotenspannungen bezogen durch:

$$V_b = A^T V_n \qquad \text{(Gl. 33)}$$

[0105] Gleichung 33 kann in die Verzweigungsspannungen der Testkomponenten und die Verzweigungsspannungen der Stromquellenverzweigungen ähnlich der Weise getrennt werden, in der I_b in Gleichung 2 getrennt wurde, um Folgendes zu ergeben:

$$V_b = \begin{bmatrix} V_b \\ V_j \end{bmatrix} = A^T V_n = \begin{bmatrix} A^T_{(b,test)} \\ A^T_J \end{bmatrix} V_n \qquad \text{(Gl. 34)}$$

[0106] Ein Lösen von Gleichung 32 nach

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

und ein Partitionieren ergibt:

$$\begin{bmatrix} I_{(b,test)} \\ V_n \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & -K_{(v,test)}A^T_{(b,test)} \\ A_{(b,test)} & 0 \end{bmatrix}^{-1} \begin{bmatrix} 0 \\ A_J J \end{bmatrix} = \left[\begin{array}{c|c} & \\ \hline & W \end{array}\right] \begin{bmatrix} 0 \\ A_J J \end{bmatrix} \qquad \text{(Gl. 35)}$$

[0107] Aus Gleichung 34 und Gleichung 35 folgt, dass:

$$v_b = A^T_{(b,test)} V_n = A^T_{(b,test)} W A_J J \qquad \text{(Gl. 36)}$$

[0108] Bei einem bevorzugten Ausführungsbeispiel wird der Stimulus eine Quelle zu einer Zeit angelegt, sodass der Vektor J einen einzigen Eintrag von nicht null aufweist, der dem Verzweigungsstrom zugeordnet ist, und null anderswo. Ein Anlegen dieses Stimulus resultiert in einem Vektor einer Verzweigungsspannung, v_b. Falls J als eine Matrix von einzelnen Stimuluspositionen definiert wäre, wobei der Stimulus lediglich bei mög-

lichen Stimuluspositionen ist, wie es in Gleichung 37 gezeigt ist, gibt es nun eine einzige Stromquelle bei jeder möglichen Stimulusposition.

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

[0109] Wenn v_b unter Verwendung des J_{matrix} von Gleichung 37 berechnet wird, ist das Ergebnis eine Matrix, bei der die Zeilen Verzweigungsspannungen sind und die Spalten die möglichen Quellenkonfigurationen sind. Für eine Zweckmäßigkeit könnte J_{matrix} auch angeordnet sein, sodass derselbe diagonal wäre. Falls dies transponiert wird, resultiert eine Matrix mit Einträgen in der Form von Tabelle 2:

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

[0110] Gleichung 38 kann erweitert werden, um mehrere Frequenzen zu unterstützen. Das ursprüngliche System von Gleichungen kann verwendet werden, um mehrere Frequenzen durch ein Wiederholen der Berechnungen bei dem Stimulus bei unterschiedlichen Frequenzen zu analysieren.

[0111] Die vorhergehenden Erörterungen waren hauptsächlich auf den Fall fokussiert, bei dem der angelegte Stimulus und die Messungshardware ideal sind oder vernachlässigbare nichtideale Eigenschaften aufweisen. Aufgrund von praktischen Erwägungen jedoch, die den Entwurf und Aufbau einer modernen Testhardware betreffen, können sowohl die Hardware zum Anlegen eines Stimulus als auch die Messungsvorrichtung erhebliche nichtideale Eigenschaften aufweisen. Diese nichtidealen Eigenschaften werden auch parasitäre Wirkungen genannt. Diese Situation ist in Fig. 11A und Fig. 11B dargestellt, in Übereinstimmung mit einem Ausführungsbeispiel der vorliegenden Erfindung. Fig. 11A und Fig. 11B zeigen die gleiche 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 als das Thevenin-Äquivalent des Stimulus in Fig. 11A gezeigt – eine Stromquelle **1118** parallel zu einem Quellimpedanzwiderstand **1120**, auch R_s.

[0112] Sowohl in Fig. 11A als auch Fig. 11B ist der Satz von Komponenten, der getestet wird, allgemein als eine Form **1102** gezeigt. Die nichtidealen Eigenschaften der Stimulushardware sind als Widerstandswerte **1114**, Z_i, **1116**, Z_g und eine Kapazität **1108**, y_s gezeigt. Die nichtidealen Eigenschaften der Messungshardware sind als eine Kapazität **1112**, y_d, die mit einem Knoten aus dem Satz von Komponenten, der getestet wird, und dem Referenzknoten verbunden. Da die dominante Komponente der nichtidealen Eigenschaften des Detektors und der Quelle dazu neigt, eine Kapazität zu sein, sind y_s und y_d als kapazitiv gezeigt. Dieselben könnten jedoch auch Widerstands- und induktive Eigenschaften umfassen. Z_i und Z_g stellen einen verschiedenen Widerstandswert dar, der einem Anlegen des Stimulus an die Schaltung, die getestet wird, zugeordnet ist.

[0113] Diese nichtidealen Eigenschaften der Stimulushardware, wie des Stimulus selbst, können in dem Modell des Satzes von Komponenten eingeschlossen werden. Die Werte für Z_i und Z_g können sich jedoch jedes Mal verändern, wenn eine Platine getestet wird, da der Widerstandswert zwischen einer Platine und dem Sondenstift unter anderem sich jedes Mal verändern kann, wenn eine Platine in der Testhalterung platziert wird. Bei einem Fall schließlich, bei dem es weniger Detektoren als Knoten gibt, die gemessen werden müssen, bewegen sich die nichtidealen Eigenschaften der Messungshardware von Knoten zu Knoten bei jeder Messungsposition. Dies bedeutet, dass der Wert von y_d sich von Messungsposition zu Messungsposition verändert. Die Werte von y_d und y_s werden sich ebenfalls jedes Mal verändern, wenn eine Testhalterung befestigt wird. Anstelle eines Umfassens all dieser nichtidealen Eigenschaften in dem Modell, wenn der Testprogrammgenerator ausgeführt wird, wird folglich bei einem bevorzugten Ausführungsbeispiel eine Testzeitkorrektur innerhalb der Fehleranalyseroutine ausgeführt, um die Werte, die durch die Messungshardware gemessen werden, in Werte zu übersetzen, die gemessen worden wären, falls die Messungs- und Stimulushardware ideal wäre. Diese korrigierten Werte können dann bei den U^*-Matrizen und Testbegrenzungen verwendet werden, die aus einem Modell ohne diese nichtidealen Eigenschaften erzeugt werden.

[0114] Fig. 15 stellt einen Prozess dar, der diese nichtidealen Eigenschaften korrigiert, um eine korrigierte Version der gemessenen Spannungen bei zugreifbaren Knoten zu erzeugen, die die Spannungen approximiert, die an den gemessenen zugreifbaren Knoten wären, wenn die Messungs- und Stimulushardware ideal

gewesen wäre, in Übereinstimmung mit einem Ausführungsbeispiel der vorliegenden Erfindung. Bevor die gemessenen Spannungen korrigiert werden, werden typischerweise mehrere Messungen vorgenommen, um die Testhardware zu kennzeichnen. Eine dieser Messungen wird von der Quellenspannung, V_s, genommen. Dies ist eine Wechselsignalspannung bzw. Wechselstromspannung (AC-Spannung), sodass spätere Messungen, die vorgenommen werden, wobei diese Spannung angelegt ist, verwendet werden können, um die Kapazität an bestimmten Knoten zu berechnen. Insbesondere wird dieser Messwert verwendet, um die Testkopfkapazität für sowohl die Quelle als auch den Detektor zu berechnen.

[0115] Es können ferner mehrere andere hardwareabhängige Messungen vorgenommen werden. Diese Messungen ermöglichen eine Berechnung der parasitären Kapazität an jedem Quellenknoten und dem Referenzknoten aufgrund der Testerhardware. Dies liefert den y_s-Wert für jede angelegte Stimulusposition. Gleichermaßen ermöglichen diese Messungen auch die Berechnung der parasitären Kapazität an jedem Messungsknoten aufgrund der Testerhardware. Dies liefert den y_d-Wert für jeden Knoten, der durch die Messungshardware gemessen wird. Da die parasitäre Kapazität des Detektors von Messungsknoten zu Messungsknoten schwanken wird, wird die Notierung $y_{(X,d)}$ verwendet, um den Wert der parasitären Kapazität bei einem Knoten X (in Admittanzform) aufgrund dessen anzugeben, dass der Detektor mit diesem Knoten verbunden ist. Die Quellkapazität wird von Stimulusposition zu Stimulusposition schwanken. Die folgende Erörterung ist jedoch auf lediglich eine Quellstimulusposition gerichtet, sodass lediglich die Notierung y_s verwendet wird, um die Quellkapazität (in Admittanzform) anzugeben. Jeder Prozess kann auf mehr Stimuluspositionen durch ein Verwenden unterschiedlicher Werte von y_s und unterschiedlicher Inzidenzmatrizen für jede Stimulusposition erweitert werden.

[0116] Nachdem diese Kennzeichnungsmessungen vorgenommen wurden, kann ein Stimulus an eine Platine angelegt werden und können Messungen an derselben vorgenommen werden. Diese Messungen können dann hinsichtlich der nichtidealen Eigenschaften der Testumgebung gemäß **Fig. 15** korrigiert werden.

[0117] Bei einem Schritt **1502** werden die Spannungsmessungen genommen. Diese Messungen werden mit einem Stimulus genommen, der an die Platine angelegt wird. Die Ergebnisse dieser Messungen werden in einem Vektor, V'_m, gespeichert. Um ein einzelnes Element dieses Vektors anzugeben, beispielsweise die Knotenspannung bei einem Knoten X, wird die Notierung $V'_{(X,m)}$ in dieser Erörterung verwendet. Eine ähnliche Notierung wird verwendet, um einzelne Elemente von anderen Vektorgrößen anzugeben.

[0118] Zusätzlich zu einem Messen der Knotenspannungen an den zugreifbaren Knoten an der Testplatine (oder alternativ dem Cluster oder reduzierten Cluster) werden Messungen von dem Referenzknoten an der Platine V'_g, der angelegten Stimulusspannung an der Platine, V'_s, und der Spannung an der gegenüberliegenden Seite des Referenzwiderstands von der Stimulusquelle, V'_r, genommen. Bei einem Schritt **1504** wird die Messung, die an der gegenüberliegenden Seite des Referenzwiderstands, V'_r, genommen wird, unter Verwendung einer Gleichung 39 hinsichtlich der Wirkungen der Detektorkapazität korrigiert, wie dieselbe die Spannung V'_r gemessen hat. Die Detektorkapazität, wie dieselbe die Spannung V'_r gemessen hat, ist $y_{(r,d)}$

$$V''_r = \frac{V'_s \cdot V'_r}{V'_s - \left(y_{(r,d)} \cdot R'_s \cdot V'_r\right)} \qquad \text{(Gl. 39)}$$

[0119] Bei einem Schritt **1506** wird eine Z-Matrix unter Verwendung der Nominalwerte der Platinenkomponenten, von Vorgabewerten für Z_i und Z_g und einem Messwert des Referenzwiderstands, R'_s, berechnet. Vorgabewerte für Z_i und Z_g können durch ein Messen und Mitteln von Z_i und Z_g für eine Anzahl von unterschiedlichen Wegen von einer Quelle zu einer Testplatine entwickelt werden. Das Tableau sollte ferner Einträge für y_d und y_s enthalten. Der Eintrag für y_s kann eine Spalte in der Inzidenzmatrix, die eine Verbindung zwischen V_r und dem Referenzknoten definiert, und ein Eintrag in der K_v-Matrix von null sein. Der Eintrag für y_d kann eine Spalte in der Inzidenzmatrix mit nur Nullen und ein Eintrag in der K_v-Matrix von null sein. Dies ermöglicht, dass der Wert $y_{(x,d)}$ in eine spätere Gleichung eingeschoben werden kann, um die korrigierte Knotenspannung an dem Knoten X zu berechnen, ohne eine Z-Matrix neu berechnen oder mehrere andere in **Fig. 15** gezeigte Schritte wiederholen zu müssen. Bei einem Schritt **1508** werden 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 entfernen. V'_g wird unter Verwendung einer Gleichung 40 korrigiert. V'_i wird unter Verwendung einer Gleichung 41 korrigiert.

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

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

[0120] In den Gleichungen 40 und 41 ist $Z_{(g,d)}$ der Eintrag in der letzten Berechneten Z-Matrix entsprechend dem Knoten V_g und der Spalte entsprechend der Verzweigung y_d. Gleichermaßen ist $Z_{(i,d)}$ der Eintrag in der letzten berechneten Z-Matrix entsprechend dem Knoten V_i und der Spalte entsprechend der Verzweigung y_d. $Z_{(g,s)}$ ist der Eintrag in der letzten berechneten Z-Matrix entsprechend dem Knoten V_g und der Spalte entsprechend der Verzweigung y_s. $Z_{(i,s)}$ ist der Eintrag in der letzten berechneten Z-Matrix entsprechend dem Knoten V_i und der Spalte entsprechend der Verzweigung y_s.

[0121] Bei einem Schritt **1510** wird V''_r hinsichtlich der Wirkungen der Quellkapazität, y_s, unter Verwendung einer Gleichung 42 korrigiert.

$$V_r^* = \frac{V_s' \cdot V_r''}{V_s' - \left(y_s \cdot R_s' \cdot V_r''\right)} \qquad \text{(Gl. 42)}$$

[0122] Bei einem Schritt **1512** werden Z'_i und Z_g unter Verwendung von Gleichungen 43 bzw. 44 berechnet.

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

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

[0123] Falls dies eine erste Berechnung von Z_i und Z_g war, muss der Prozess bei einem Schritt **1514** dann einmal iterativ wiederholen und geht zu einem Schritt **1516** über. Falls dies das zweite Mal ist, dass Z_i und Z_g berechnet wurden, dann geht der Prozess zu einem Schritt **1518** über.

[0124] Bei einem Schritt **1516** wird eine Z-Matrix unter Verwendung von Werten von Z_i und Z_g berechnet, die gerade berechnet wurden. Diese Werte für Z_i und Z_g sollten in das Tableau als Admittanzen in der K_v-Matrix eingeschoben werden. Der Prozess kehrt dann in einer Schleife zu dem Schritt **1508** zurück, bei dem die gerade berechnete Z-Matrix einige der Terme in den Gleichungen 42 und 43 liefern wird.

[0125] Bei einem Schritt **1518** wird noch eine andere Z-Matrix berechnet. Diese Matrix wird unter Verwendung von Z_i und Z_g aus der zweiten Iteration der Schritte **1508** bis **1512** berechnet. Der Messwert des Referenzwiderstands R'_s wird ebenfalls bei der Berechnung der Z-Matrix verwendet. Diese Matrix wird dann reduziert, um lediglich diese Zeilen zu umfassen, die Knoten entsprechen, die bei dem Schritt **1502** gemessen wurden. Diese reduzierte Matrix lautet Z_{corr}.

[0126] Bei einem Schritt **1520** wird eine erste Korrektur an jeder gemessenen Knotenspannung berechnet. Falls $V'_{(x,m)}$ die gemessene Spannung bei einem Knoten X ist, dann wird die erste Korrektur gemäß einer Gleichung 45 berechnet.

$$V''_{(x,m)} = V'_{(x,m)} \cdot Z_{(x,d)} \cdot y_{(x,d)} - V_r^* \cdot Z_{(x,s)} \cdot y_s \qquad \text{(Gl. 45)}$$

[0127] Bei einem Schritt **1522** wird ein Messwert des Stroms, der durch den Referenzwiderstand fließt, I'_s, unter Verwendung des Ohmschen Gesetzes aus dem Messwert der Quelle, V'_s, und dem Messwert des Referenzwiderstands, R'_s, berechnet. I'_s wird dann in einem Quellvektor S' platziert. Der Quellvektor S' wird durch ein Platzieren von I'_s in einem Vektor mit einer Spalte und einer Zeile entsprechend der Verzweigung in der Schaltung erzeugt. I'_s wird in der Zeile entsprechend der Stimulusverzweigung platziert. Die restlichen Zeileneinträge sind 0.

[0128] Bei einem Schritt **1524** wird eine Modifiziert-Modell-Spannung für jeden gemessenen Knoten unter Verwendung einer Gleichung 46 berechnet. V_{mod} ist ein Vektor, wobei eine Spalte und jede Zeile einem gemessenen Knoten entsprechen.

$$V_{mod} = Z_{corr} S' \qquad \text{(Gl. 46)}$$

[0129] Bei einem Schritt **1526** wird ein Korrekturfaktor Cf für jeden gemessenen Knoten berechnet. Dieser Korrekturfaktor ist einfach der Idealwert jeder gemessenen Knotenspannung, wie derselbe durch ein Tableau mit nominalen Komponenten und keinem Detektor oder parasitären Quellenwirkungen geteilt durch die Modifiziert-Modell-Spannung für diesen Knoten modelliert wird. Dies ist in Gleichung 47 gezeigt.

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

[0130] Schließlich wird bei einem Schritt **1528** ein korrigierter Wert für jede gemessene Knotenspannung unter Verwendung von Gleichung 48 erzeugt.

$V_{(x,corrected)} = C_x V''_{(}$(Gl. 48)

[0131] Diese Werte können dann verwendet werden, um den Vektor $\Delta V_{(n,ac,meas)}$ zu erzeugen, der mit den verschiedenen U^*-Matrizen modifiziert und gegenüber Begrenzungen überprüft werden kann, die unter Verwendung eines Tableaumodells erzeugt wurden, das die nichtidealen Eigenschaften der Testerhardware nicht umfasste.

[0132] Viele Messungssysteme werden einen gewissen Fehler bei den Messungen aufweisen, die dieselben vornehmen. Dieser Fehler bedeutet, dass eine berichtete Messung von beispielsweise 0,15 V einer tatsächlichen Knotenspannung von nur 0,149 Volt oder sogar 0,151 Volt entspricht. Folglich könnte jede einzelne gemessene Knotenspannung in V'_m innerhalb eines Bereichs mit einem Minimum und einem Maximum liegen. Ein Knoten X könnte z. B. innerhalb des Bereichs liegen, der durch Gleichung 49 gegeben ist.

$V'_{(X,m,min)} \leq V'_{(X,m,actual)} \leq V'_{(X,m,max)}$(Gl. 49)

[0133] Diese Minima und Maxima können aus $V'_{(X,m)}$ berechnet werden, die durch die Messungshardware zurückgegeben wird. Dieselben können dann durch die Prozedur, die in Fig. 15 oben detailliert dargestellt ist, geleitet werden, um eine $V_{corr,min}$ und eine $V_{corr,max}$ zu erzeugen. $V_{corr,min}$ und $V_{corr,max}$ können dann verwendet werden, um eine ΔV_{min} und eine ΔV_{max} zu erzeugen. Diese Bereiche für die einzelnen Elemente von ΔV können als die Begrenzungen bei einem linearen Programmierungsproblem verwendet werden, um eine minimale $U^*\Delta V$ und eine maximale $U^*\Delta V$ zu finden. Gleichungen 50 und 51 können dann verwendet werden, um zu bestimmen, ob ein spezieller Eintrag in $U^*\Delta V$ als Null oder Nicht-Null betrachtet werden sollte.

$$\gamma_{(ac,f,min)} \leq LP_{min}(U^*_{(ac,f)}\Delta V) \leq \gamma_{(ac,f,max)} \qquad \text{(Gl. 50)}$$

$$\gamma_{(ac,f,min)} \leq LP_{max}(U^*_{(ac,f)}\Delta V) \leq \gamma_{(ac,f,max)} \qquad \text{(Gl. 51)}$$

wobei LP_{min} $(U^*\Delta V)$ und LP_{max} $(U^*\Delta V)$ minimierte und maximierte Ergebnisse des linearen Programmierungsproblems sind. Falls ein spezielles Element des Ergebnisses der Minimierung von $U^*\Delta V$, das den Begrenzungen von ΔV_{min} und ΔV_{max} unterliegt, größer oder gleich $\gamma_{(ac,f,min)}$ ist und das Ergebnis der Maximierung von $U^*\Delta V$, das den Begrenzungen von ΔV_{min} und ΔV_{max} unterliegt, kleiner als oder gleich $\gamma_{(ac,f,max)}$ für dieses spezielle Element und diesen speziellen Fehler „f" ist, dann sollte dasselbe mit anderen Worten als eine Null betrachtet werden. Auf diese Weise kann ein Messungsfehler des Detektors berücksichtigt werden und immer noch bei den oben detailliert dargelegten Verfahren verwendet werden.

[0134] Unter erneuter Bezugnahme auf die Erörterung von Fig. 2 rufe man sich in Erinnerung, dass bei einem Schritt **206** die Schaltung in elektrisch getrennte bzw. elektrisch isolierte Gruppen von Komponenten zerlegt wurde, die „Cluster" genannt werden. Der Definition nach weist ein Cluster zumindest einen Knoten auf, der unzugreifbar ist, und weist nicht mehr als einen Weg auf, der denselben mit irgendeinem anderen Cluster verbindet. Man rufe sich ferner ins Gedächtnis, dass diese Cluster bei einem Schritt **208** durch ein Erzeugen von kleineren „reduzierten" Clustern weiter zerlegt wurden, die weniger Komponenten enthalten und weniger zugreifbare Knoten benötigen, um zu testen, wodurch die Berechnungskomplexität und Ausführungszeit reduziert wird, die benötigt wird, um die Äquivalenzklassen, U*-Matrizen und Testbegrenzungen zu erzeugen. Um die Größe von Clustern reduzieren zu helfen, werden bei einem Erzeugen von Clustern typischerweise mehrere Regeln befolgt.

[0135] Die erste Regel befasst sich mit offenen oder scheinbar offenen Vorrichtungen, bzw. Vorrichtungen im Leerlauf oder Vorrichtungen scheinbar im Leerlauf. Bei einem bevorzugten Ausführungsbeispiel sind die Testspannungen, die durch die Testhardware angelegt werden, klein genug, dass aktive Vorrichtungen, wie beispielsweise Transistoren und integrierte Schaltungen nicht aktiviert werden. Als solches können diese aktiven Vorrichtungen entweder hinsichtlich der parasitären Wirkungen derselben oder als offene oder scheinbar offene Vorrichtungen modelliert sein. Deshalb werden die meisten integrierten Schaltungsvorrichtungen, nicht platzierten Jumper, offenen Schalter und Verbinder als offene Vorrichtungen betrachtet. Falls eine Vorrichtung eine intrinsische Impedanz zeigt oder erhebliche parasitäre Wirkungen aufweist, sollte dieselbe nicht als eine offene

Vorrichtung betrachtet werden und sollte in der Schaltungstopologie beschrieben werden. Ein Beispiel dessen wäre eine integrierte Monoflop-Schaltung, die einen eingebauten Widerstandswert zwischen bestimmten Stiften aufweist. Andere scheinbar offene Vorrichtungen umfassen aktive Vorrichtungen, wie beispielsweise Transistoren, Dioden, Zener-Dioden und selbstsperrende Feldeffekttransistoren (FETs). Offene und scheinbar offene Vorrichtungen werden während des Clustererzeugungsprozesses aus der Schaltungstopologie entfernt, da dieselben nicht zu der Clustertopologie beitragen. Wenn diese Vorrichtungen entfernt sind, hilft dasselbe die Größe von Clustern zu verringern, weil es weniger Verbindungen in der Schaltung gibt.

[0136] Um zu verhindern, dass aktive Vorrichtungen aktiviert werden, sollten die angelegten Testspannungen immer geringer als die 0,7 Volt gehalten werden, die typischerweise benötigt werden, um einen P-N-Übergang einer Siliziumdiode in Flussrichtung zu polen. Testspannungen, die geringer oder gleich 0,2 Volt sind, sind sogar noch erwünschter. Schaltungen, die aktive Vorrichtungen aufweisen, die aus anderen Materialien gefertigt sind, wie beispielsweise Galliumarsenid, oder auf anderen Technologien basieren, wie beispielsweise Vakuumröhren, oder beides, können unterschiedliche Einschaltspannungen aufweisen und die maximale Testspannung kann entsprechend eingestellt werden.

[0137] Die zweite Regel befasst sich mit kurzgeschlossenen oder scheinbar kurzgeschlossenen Vorrichtungen. Kurzgeschlossene Vorrichtungen umfassen Sicherungen bzw. Schmelzstellen, Jumper und geschlossene Schalter. Scheinbar kurzgeschlossene Vorrichtungen umfassen Vorrichtungen, die eine Impedanz aufweisen, die unter einem Schwellenwert liegt. Dieser Schwellenwert kann als eine Umgebungsvariable gesetzt werden oder durch irgendeine andere Form eines Eingangs zu dem Testerzeugungsprogramm spezifiziert werden. Bei einem bevorzugten Ausführungsbeispiel betrachtet die vorgegebene Schwelle eine jegliche Vorrichtung mit einer Impedanz von weniger als 1 Ohm als einen scheinbaren Kurzschluss.

[0138] Die dritte Regel befasst sich mit variablen Vorrichtungen. Diese umfassen typischerweise variable Widerstände, Potentiometer, variable Kondensatoren und variable Induktoren. Diese Vorrichtungen können nicht an einem unzugreifbaren Knoten angebracht werden, aber dieselben können ein Teil einer Clustertopologie sein. Bei einem Ausführungsbeispiel der vorliegenden Erfindung wird, falls eine variable Vorrichtung an einem unzugreifbaren Knoten verbunden ist, eine Fehlerbedingung erzeugt und der Benutzer wird benachrichtigt, dass ein anderer zugreifbarer Knoten notwendig ist, um die variable Vorrichtung zu testen.

[0139] Fig. 12 ist ein Flussdiagramm, das einen Prozess zum Erzeugen von Clustern aus einer Platinentopologie in Übereinstimmung mit einem Ausführungsbeispiel der vorliegenden Erfindung darstellt. Der Prozess beginnt mit einem Erzeugen eines Clusters aus der existierenden Platinentopologie bei einem Schritt **1202**. Bei einem Schritt **1204** wählt der Prozess eine Startvorrichtung durch ein Durchsuchen der Platinentopologie nach einer Vorrichtung aus, die mit einem zugreifbaren Knoten und einem unzugreifbaren Knoten verbunden ist. Bei einem Schritt **1206** wird eine topologische Darstellung erzeugt. Eine topologische Darstellung stellt Vorrichtungen, Knoten und die Verbindung derselben dar. Bei einem bevorzugten Ausführungsbeispiel ist diese topologische Darstellung ein Topologiegraph.

[0140] Der Topologiegraph wird durch ein Hinzufügen der Startvorrichtung zu einem leeren ungerichteten Graphen erzeugt. Vorrichtungen werden zu dem Topologiegraphen als Kanten hinzugefügt und die Knoten, die mit dieser Vorrichtung verbunden sind, werden zu dem Topologiegraphen als Vertizen hinzugefügt. Die Vorrichtungen, die mit den Startvorrichtungen verbunden sind, werden zu dem Graphen hinzugefügt. Dann werden die Vorrichtungen, die mit diesen Vorrichtungen verbunden sind, hinzugefügt usw., bis alle Vorrichtungen, die einen Weg zu der Startvorrichtung verfolgen können, hinzugefügt wurden. Wenn Vorrichtungen zu dem Graphen hinzugefügt werden, wird die erste oben dargelegte Regel befolgt, sodass offene oder scheinbar offene Vorrichtungen nicht zu dem Graphen hinzugefügt werden. Dies weist die Wirkung eines „Entfernens" von offenen oder scheinbar offenen Vorrichtungen von der Platine und der Clustertopologie auf. Ferner werden lose Komponenten nicht zu der Clustertopologie hinzugefügt. Dies weist die Wirkung eines Entfernens von losen Komponenten von der Clustertopologie auf.

[0141] Wenn derselbe einmal aufgebaut ist, wird der Graph bei einem Schritt **1208** gemäß der zweiten Regel reduziert, die oben dargelegt ist, Bei einem Schritt **1208** werden Kanten, die kurzgeschlossenen und scheinbar kurzgeschlossenen Vorrichtungen zugeordnet sind, von dem Graphen entfernt und die Vertizen dieser Vorrichtungen werden in einen einzigen Scheitelpunkt kombiniert. Dies entfernt wirksam jegliche Vorrichtungen, die durch diese Vorrichtungen kurzgeschlossen werden, aus der Clustertopologie.

[0142] Bei einem Schritt **1210** wird der Topologiegraph rekursiv überquert, beginnend bei dem unzugreifbaren Knoten, der mit der Startvorrichtung verbunden ist. Wenn der Graph überquert wird, hält die Rekursion bei zu-

greifbaren Knoten an, aber läuft Kanten (Vorrichtungen) weiter hinunter, die mit unzugreifbaren Knoten verbunden sind. Auf diese Weise werden alle der zugreifbaren Knoten, die entlang einem Weg von dem anfänglichen unzugreifbaren Knoten durch lediglich unzugreifbare Knoten erreichbar sind, überquert. Bei einem Schritt **1212** werden die zugreifbaren Knoten, bei denen angehalten wurde, in eine Liste von möglichen Testpunkten platziert.

[0143] Prinzipien, die verwendet werden, um den Topologiegraphen aufzubauen und zu überqueren (und die anderen Graphen, die bei aufeinander folgenden Schritten und in Fig. 13 aufgebaut und überquert werden), können bei unterschiedlichen topologischen Darstellungen und unterschiedlichen Überquerungsverfahren verwendet werden. Diese Darstellung und Überquerungsverfahren sind auf dem Gebiet bekannt.

[0144] Bei einem Schritt **1214** werden alle Wege zwischen irgendwelchen zwei Knoten in der Liste von möglichen Testpunkten gefunden. Bei einem Schritt **1216** werden alle Vorrichtungen entlang dieser Wege als in dem Cluster, der erzeugt wird, befindlich markiert. Bei einem Schritt **1218** werden jegliche zugreifbare Knoten entlang oder an dem Ende der Wege, die bei dem Schritt **1214** gefunden wurden, die nicht bereits in der Liste von möglichen Testpunkten sind, zu der Liste von möglichen Testpunkten hinzugefügt.

[0145] Bei einem Schritt **1220** werden unzugreifbare Knoten, die vorhergehend nicht bei dem Schritt **1210** oder dem Schritt **1220** überquert wurden (unüberquerte Knoten), als ein Startpunkt zum Überqueren des Topologiegraphen verwendet. Der Topologiegraph wird rekursiv überquert, beginnend bei dem unüberquerten unzugreifbaren Knoten. Wenn der Graph überquert wird, hält die Rekursion bei zugreifbaren Knoten an, aber läuft Kanten (Vorrichtungen) weiter hinunter, die mit unzugreifbaren Knoten verbunden sind. Auf diese Weise werden alle zugreifbaren Knoten überquert, die entlang einem Weg von dem anfänglichen unüberquerten unzugreifbaren Knoten durch lediglich unzugreifbare Knoten erreichbar sind. Bei einem Schritt **1222** werden die zugreifbaren Knoten, bei denen angehalten wurde, in der Liste von möglichen Testpunkten platziert, falls dieselben nicht bereits dort waren.

[0146] Falls irgendwelche Knoten zu der Liste von möglichen Testpunkten bei dem Schritt **1218** oder dem Schritt **1220** hinzugefügt wurden, kehrt der Prozess in einer Schleife zu dem Schritt **1214** zurück. Falls keine Knoten zu der Liste von möglichen Testpunkten hinzugefügt wurden, bewegt sich der Prozess zu einem Schritt **1226**, bei dem alle Vorrichtungen, die als in dem Cluster, das erzeugt wird, befindlich markiert sind, gespeichert werden und dann von der Platinentopologie entfernt werden. Bei einem Schritt **1228** endet dann der Prozess in einem Schritt **1230**, falls keine Vorrichtungen in der Platinentopologie übrig sind. Falls immer noch Vorrichtungen in der Platinentopologie übrig sind, dann kehrt der Prozess in einer Schleife zu dem Schritt **1202** zurück um ein Erzeugen eines neuen Clusters aus den Vorrichtungen zu beginnen, die in der Platinentopologie übrig sind.

[0147] In Fig. 2 wird bei einem Schritt **208** jeder Cluster weiter in reduzierte Cluster zerlegt. Ein reduzierter Cluster ist eine Gruppe von gezielten Komponenten, die die Größe und Komplexität der Testerzeugung, Messung und Fehleranalyseprobleme bei aufeinander folgenden Stufen des Testprozesses reduziert. Fig. 13 ist ein Flussdiagramm, das den Prozess zum Erzeugen von reduzierten Clustern aus einem Cluster in Übereinstimmung mit einem Ausführungsbeispiel der vorliegenden Erfindung darstellt.

[0148] Bei einem Schritt **1302** wird ein Topologiegraph erzeugt, der die Vorrichtungen in dem Cluster erzeugt, der in reduzierte Cluster zerlegt wird. Für diese Erörterung wird dies der Clustertopologiegraph genannt. Um den Clustertopologiegraph aufzubauen, beginnt der Prozess mit einem leeren ungerichteten Graphen. Jede Vorrichtung in dem Cluster wird einzeln nacheinander zu dem Clustertopologiegraphen hinzugefügt. Jede Vorrichtung wird zu dem Clustertopologiegraphen als eine Kante hinzugefügt und die Knoten, die mit dieser Vorrichtung verbunden sind, werden zu dem Topologiegraphen als Vertizen hinzugefügt, falls dieselben nicht bereits in dem Clustertopologiegraphen sind.

[0149] Der Prozess zum Erzeugen eines einzelnen reduzierten Clusters beginnt bei einem Schritt **1304**. Bei einem Schritt **1306** wird ein unzugreifbarer Knoten aus dem Clustertopologiegraphen ausgewählt. Bei einem Schritt **1308** wird der Clustertopologiegraph rekursiv überquert, beginnend bei dem ausgewählten unzugreifbaren Knoten. Wenn der Clustertopologiegraph überquert wird, hält die Rekursion bei zugreifbaren Knoten an, aber läuft weiter Kanten (Vorrichtungen) herunter, die mit unzugreifbaren Knoten verbunden sind. Auf diese Weise werden alle zugreifbaren Knoten überquert, die entlang einem Weg von dem anfänglichen unzugreifbaren Knoten und durch lediglich unzugreifbare Knoten erreichbar sind.

[0150] Bei einem Schritt **1310** werden die Vorrichtungen, die bei dem Schritt **1308** überquert werden, in dem

aktuellen reduzierten Cluster platziert. Bei einem Schritt **1311** werden die zugreifbaren Knoten, bei denen bei dem Schritt **1308** angehalten wird, in einer Liste von möglichen Stimulusknoten für diesen reduzierten Cluster platziert. Bei einem Schritt **1312** werden diese Vorrichtungen als ein reduzierter Cluster gespeichert und die Liste von möglichen Stimulusknoten für diesen reduzierten Cluster wird gespeichert.

[0151] Bei einem Schritt **1314** werden die Vorrichtungen (Kanten) des reduzierten Clusters von dem Clustertopologiegraphen gelöscht. Bei einem Schritt **1316** werden jegliche Knoten (Vertizen), die nicht mehr mit irgendwelchen Vorrichtungen verbunden sind, von dem Clustertopologiegraphen entfernt. Bei einem Schritt **1318** kehrt, falls immer noch unzugreifbare Knoten in dem Clustertopologiegraphen übrig sind, der Prozess in einer Schleife zurück zu dem Schritt **1304**, um ein Erzeugen eines anderen reduzierten Clusters zu beginnen. Falls keine unzugreifbaren Knoten in dem Clustertopologiegraphen übrig sind, endet der Prozess bei einem Schritt **1320**. Jegliche Vorrichtungen, die in dem Clustertopologiegraphen übrig sind, wenn der Prozess bei dem Schritt **1320** endet, können durch herkömmliche Testtechniken innerhalb einer Schaltung getestet werden.

[0152] Mehrere der Schritte in Fig. 12 und Fig. 13 beziehen sich auf ein rekursives Überqueren eines Graphen. Um diese Funktion auf eine exemplarische Weise darzustellen, untersuche man den exemplarischen ungerichteten Topologiegraphen, der in Fig. 16 dargestellt ist, in Übereinstimmung mit einem Ausführungsbeispiel der vorliegenden Erfindung. Die Scheitelpunkte des Graphen, die in Fig. 16 dargestellt sind, entsprechen Knoten. Die Knotenzahl ist im Inneren jedes Kreises gezeigt. Zugreifbare Knoten sind mit einem Sternchen (*) neben der Knotenzahl gezeigt. Die restlichen Knoten sind unzugreifbar. Die Kanten des Graphen, der in Fig. 16 dargestellt ist, sind als Linien gezeigt. Jede Kante entspricht einer Komponente (oder Verzweigung). Der Name der Komponente ist neben der Linie gezeigt. Man beachte, dass der Topologiegraph in Fig. 16 der Schaltung entspricht, die in Fig. 4 gezeigt ist, außer mit unterschiedlichen zugreifbaren Knoten.

[0153] Die Überquerung beginnt beispielsweise bei einem Knoten 2. Der Knoten 2 ist ein unzugreifbarer Knoten, sodass alle der Verzweigungen (oder Kanten), die mit dem Knoten 2 verbunden sind, rekursiv überquert werden müssen. Dies bedeutet, dass Kanten R_4 und R_3 überquert werden müssen. Welche zuerst überquert wird, spielt keine Rolle. Falls R_4 zuerst überquert wird, führt dieselbe zu einem Knoten 4. Da der Knoten 4 ebenfalls unzugreifbar ist, müssen alle Verzweigungen, die mit dem Knoten 4 verbunden sind, außer der Verzweigung, der gefolgt wurde, um zu dem Knoten 4 zu gelangen, rekursiv überquert werden. Folglich wird dann R_5 überquert, was zu einem Knoten 0 führt.

[0154] Da der Knoten 0 ein zugreifbarer Knoten ist, hält die Überquerung bei diesem Knoten an und überquert die Verzweigungen, die mit dem Knoten 0 verbunden sind, nicht weiter. Die Überquerung kehrt dann zu dem Knoten 4 zurück. Bei dem Knoten 4 wurden bereits alle Verzweigungen, die mit dem Knoten 4 verbunden sind, durchquert (d. h. R_5), sodass die Überquerung zu dem Knoten 2 zurückkehrt. Bei dem Knoten 2 wurde R_4 bereits überquert, aber ein Knoten 3 nicht. Deshalb fährt die Überquerung R_3 fort hinunter zu dem Knoten 3.

[0155] Bei dem Knoten 3 wurden R_2 und R_1 nicht überquert. Erneut spielt es keine Rolle, welche zuerst überquert wird. Folglich wird R_2 beliebig für dieses Beispiel zuerst gewählt. Wenn R_2 überquert wird, führt dieselbe zu dem Knoten 0. Da der Knoten 0 ein zugreifbarer Knoten ist, werden die Verzweigungen, die mit dem Knoten 0 verbunden sind, erneut nicht überquert. Man beachte, dass, um eine unendliche Schleife zu vermeiden, eine Überquerung ebenfalls bei Knoten anhält, die vorhergehend überquert wurden.

[0156] Nachdem die Überquerung zu dem Knoten 3 zurückkehrt, überquert dieselbe die Verzweigung R_1 herunter zu dem Knoten 1. Der Knoten 1 ist ein zugreifbarer Knoten, sodass die Verzweigungen, die mit dem Knoten 1 verbunden sind, nicht überquert werden. Die Überquerung kehrt dann zu dem Knoten 3 zurück. Bei dem Knoten 3 kehrt die Überquerung zu dem Knoten 2 zurück weil alle Verzweigungen, die mit dem Knoten 3 verbunden sind, überquert wurden. Alle Verzweigungen, die mit dem Knoten 2, dem Startknoten, verbunden sind, wurden rekursiv überquert. Da alle Verzweigungen, die mit dem Startknoten verbunden sind, nun überquert wurden, endet der Prozess.

[0157] Folglich 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, bei denen angehalten wurde, sind die Knoten 0 und 1.

[0158] Es ist eventuell nicht notwendig, alle der zugreifbaren Knoten, die mit Vorrichtungen verbunden sind, in dem ganzen Cluster zu messen, um die Komponenten in einem reduzierten Cluster zu testen. Folglich wird für jeden reduzierten Cluster eine Zugriffsabschneidung durchgeführt, um einen minimierten Satz von zugreifbaren Knoten zu bestimmen, die gemessen werden müssen. Durch ein Reduzieren der Anzahl von gemesse-

nen Knoten, wird auch die Größe der U*-Matrizen, etc. reduziert. Dies vereinfacht die Berechnungen, die notwendig sind, um zu bestimmen, ob ein Fehler auftrat, und beschleunigt eine Testzeit.

[0159] Fig. 14 ist ein Flussdiagramm, das die Schritte darstellt, die unternommen werden, um eine Knotenabschneidung für einen reduzierten Cluster in Übereinstimmung mit einem Ausführungsbeispiel der vorliegenden Erfindung durchzuführen. Bei einem Schritt **1402** werden die Vorrichtungen in dem reduzierten Cluster in Äquivalenzklassen geteilt. Dies wird typischerweise durch zuerst ein Erzeugen einer Z-Matrix für das gesamte Cluster vorgenommen. 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 einem Cluster. Die Äquivalenzklassen werden dann durch ein Überprüfen der Spalten und Gruppen von Spalten, die den Vorrichtungen in dem reduzierten Cluster entsprechen, auf eine Unabhängigkeit hin erzeugt. Dies folgt der grundlegenden Prozedur zum Erzeugen von Äquivalenzklassen, die oben beschrieben ist, außer dass lediglich eine Kombination von Spalten überprüft wird, die Vorrichtungen in dem reduzierten Cluster entsprechen.

[0160] Bei einem Schritt **1404** werden die Knoten in der Liste von möglichen Stimulusknoten, die erzeugt wurden, als der reduzierte Cluster erzeugt wurde, in der Liste von Testpunkten für diesen reduzierten Cluster platziert. Diese Knoten werden ebenfalls aus einer späteren Betrachtung eliminiert. Dies bedeutet, dass diese Knoten bei späteren Schritten nicht als Testpunkte eliminiert werden. Bei einem Schritt **1406** wird ein Knoten ausgewählt, der immer noch für eine Eliminierung betrachtet wird. Dieser Knoten ist ein zugreifbarer Knoten, da lediglich zugreifbare Knoten mögliche Testpunkte sein können.

[0161] Bei einem Schritt **1408** wird eine Überprüfung vorgenommen, um zu sehen, ob der ausgewählte Knoten als ein Testpunkt eliminiert werden kann, ohne die Äquivalenzklassen des reduzierten Clusters zu verändern. Diese Überprüfung wird durch zuerst ein Entfernen der Zeile, die dem ausgewählten Knoten entspricht, aus der Z-Matrix erzielt, die bei dem Schritt **1402** verwendet wird. Dann wird diese ausgeräumte Z-Matrix verwendet, um die Vorrichtungen des reduzierten Clusters in Äquivalenzklassen zu teilen. Falls es einen Unterschied bei dem Äquivalenzklassen, die gerade erzeugt wurden, und denselben gibt, die bei dem Schritt **1402** erzeugt wurden, dann wird dieser Knoten als ein Testpunkt für diesen reduzierten Cluster benötigt und der Prozess geht zu einem Schritt **1412** über. Falls es keinen Unterschied gab, wird dieser Knoten nicht als ein Testpunkt für diesen reduzierten Cluster benötigt und der Prozess geht zu einem Schritt **1410** über.

[0162] Bei einem Schritt **1412** wird ein Knoten, der als ein Testpunkt benötigt wird, in der Liste von Testpunkten für den reduzierten Cluster platziert. Der Knoten wird ferner aus einer weiteren Betrachtung eliminiert, sodass derselbe nicht noch einmal ausgewählt wird. Der Prozess geht dann zu einem Schritt **1414** über.

[0163] Bei einem Schritt **1410** wird ein Knoten, der nicht als ein Testpunkt benötigt wird, aus einer weiteren Betrachtung eliminiert, sodass derselbe nicht noch einmal für eine mögliche Platzierung in der Liste von Testpunkten für diesen reduzierten Cluster ausgewählt wird.

[0164] Bei einem Schritt **1414** kehrt der Prozess in einer Schleife zu dem Schritt **1406** zurück, falls es immer noch zugreifbare Knoten gibt, die betrachtet werden. Falls alle zugreifbaren Knoten getestet wurden, um zu sehen, ob dieselben Testpunkte werden sollten, geht der Prozess zu einem Schritt **1416** über. Bei einem Schritt **1416** wird die Liste von Testpunkten für diesen reduzierten Cluster gespeichert. Dann endet der Prozess bei dem Schritt **1418**. Bei einem bevorzugten Ausführungsbeispiel werden lediglich die zugreifbaren Knoten in der Liste von Testpunkten verwendet, um die U*-Matrizen zu erzeugen und Begrenzungen für die Äquivalenzklassen dieses reduzierten Clusters zu testen.

[0165] Obwohl mehrere spezifische Ausführungsbeispiele der Erfindung beschrieben und dargestellt wurden, ist die Erfindung nicht auf die spezifischen Formen, Anordnungen und Schritte begrenzt, die so beschrieben und dargestellt sind. Zum Beispiel sind viele der Stimuli, die bei dem spezifischen Ausführungsbeispielen gezeigt sind, als Stromquellen gezeigt. Diese könnten jedoch auch Spannungsquellen sein. Die Erfindung ist lediglich durch die Ansprüche begrenzt.

Patentansprüche

1. Ein Verfahren zum Auswählen und Testen von Komponenten einer zu testenden Schaltung (**110**), wobei das Verfahren folgende Schritte umfasst:
(a) Erstellen (**1206**; **1302**) einer topologischen Darstellung einer ersten Gruppe von Komponenten der zu testenden Schaltung (**110**), wobei die erste Gruppe von Komponenten durch einen ersten Satz von Knoten miteinander verbunden sind und wobei der erste Satz von Knoten in einen ersten Teilsatz von Knoten, die unzu-

gänglich sind, und einen zweiten Teilsatz von Knoten, die zugänglich sind, unterteilt ist;
(b) Auswählen (**1210**; **1306**) eines ersten unzugänglichen Knotens aus dem ersten Teilsatz von Knoten;
(c) Überqueren (**1210**; **1308**) der topologischen Darstellung, beginnend mit dem ersten unzugänglichen Knoten, wobei das Überqueren an Knoten des zweiten Teilsatzes von Knoten anhält und das Überqueren ein Überqueren an Knoten des ersten Teilsatzes von Knoten fortgesetzt wird;
(d) Auswählen eines ersten Satzes von Komponenten aus der ersten Gruppe von Komponenten, die bei Schritt (c) überquert wurden;
(e) Anlegen eines Stimulus an eine ausgewählte Stimulusposition, wobei die ausgewählte Stimulusposition ein Knoten des zweiten Teilsatzes von Knoten ist; und
(f) Messen eines Satzes von Reaktionen auf den an die ausgewählte Stimulusposition angelegten Stimulus, wobei der Satz von Reaktionen an einer ausgewählten Messposition gemessen wird, wobei die ausgewählte Messposition ein Knoten des zweiten Teilsatzes von Knoten ist,
wobei die Stimulusposition und die Messposition auf der Basis von Verzweigungsspannungen über Komponenten hinweg zwischen den Knoten, die der Stimulus- und der Messposition zugeordnet sind, ausgewählt werden.

2. Das Verfahren gemäß Anspruch 1, das ferner folgende Schritte umfasst:
(g) Eliminieren des ersten Satzes von Komponenten aus der topologischen Darstellung.

3. Das Verfahren gemäß Anspruch 1 oder 2, das ferner folgenden Schritt umfasst:
(h) Eliminieren eines dritten Teilsatzes von Knoten aus dem ersten Teilsatz von Knoten, wobei der dritte Teilsatz von Knoten keine Verbindungen in der topologischen Darstellung aufweist.

4. Das Verfahren gemäß Anspruch 3, das ferner folgenden Schritt umfasst:
(i) Auswählen eines zweiten Satzes von Komponenten, wenn der erste Teilsatz von Knoten nicht leer ist.

5. Ein Programmspeicherungsmedium, das durch einen Computer lesbar ist und das ein Programm einer durch den Computer ausführbaren Anweisung zum Durchführen von Verfahrensschritten zum Auswählen und Testen von Komponenten einer zu testenden Schaltung (**110**) verkörpert, wobei das Verfahren folgende Schritte umfasst:
(a) Erstellen (**1206**; **1302**) einer topologischen Darstellung einer ersten Gruppe von Komponenten der zu testenden Schaltung (**110**), wobei die erste Gruppe von Komponenten durch einen ersten Satz von Knoten miteinander verbunden sind und wobei der erste Satz von Knoten in einen ersten Teilsatz von Knoten, die unzugänglich sind, und einen zweiten Teilsatz von Knoten, die zugänglich sind, unterteilt ist;
(b) Auswählen (**1210**; **1306**) eines ersten unzugänglichen Knotens aus dem ersten Teilsatz von Knoten;
(c) Überqueren (**1210**; **1308**) der topologischen Darstellung, beginnend mit dem ersten unzugänglichen Knoten, wobei das Überqueren an Knoten des zweiten Teilsatzes von Knoten anhält und das Überqueren ein Überqueren an Knoten des ersten Teilsatzes von Knoten fortgesetzt wird;
(d) Auswählen eines ersten Satzes von Komponenten aus der ersten Gruppe von Komponenten, die bei Schritt (c) überquert wurden;
(e) Anlegen eines Stimulus an eine ausgewählte Stimulusposition, wobei die ausgewählte Stimulusposition ein Knoten des zweiten Teilsatzes von Knoten ist; und
(f) Messen eines Satzes von Reaktionen auf den an die ausgewählte Stimulusposition angelegten Stimulus, wobei der Satz von Reaktionen an einer ausgewählten Messposition gemessen wird, wobei die ausgewählte Messposition ein Knoten des zweiten Teilsatzes von Knoten ist,

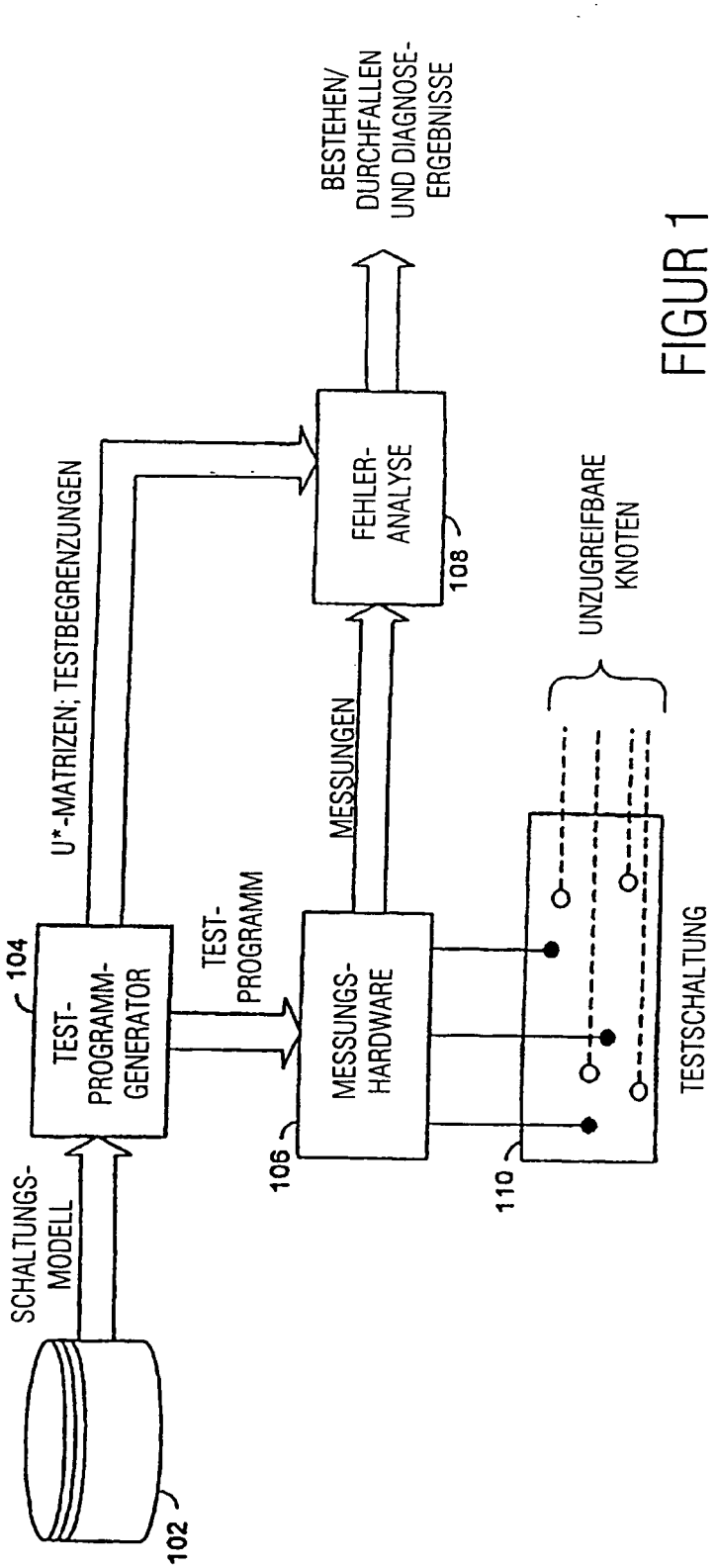
6. Das Programmspeicherungsmedium gemäß Anspruch 5, das ferner folgenden Schritt umfasst:
(g) Eliminieren des ersten Satzes von Komponenten aus der topologischen Darstellung.

7. Das Programmspeicherungsmedium gemäß Anspruch 5 oder 6, das ferner folgenden Schritt umfasst:
(h) Eliminieren eines dritten Teilsatzes von Knoten aus dem ersten Teilsatz von Knoten, wobei der dritte Teilsatz von Knoten keine Verbindungen in der topologischen Darstellung aufweist.

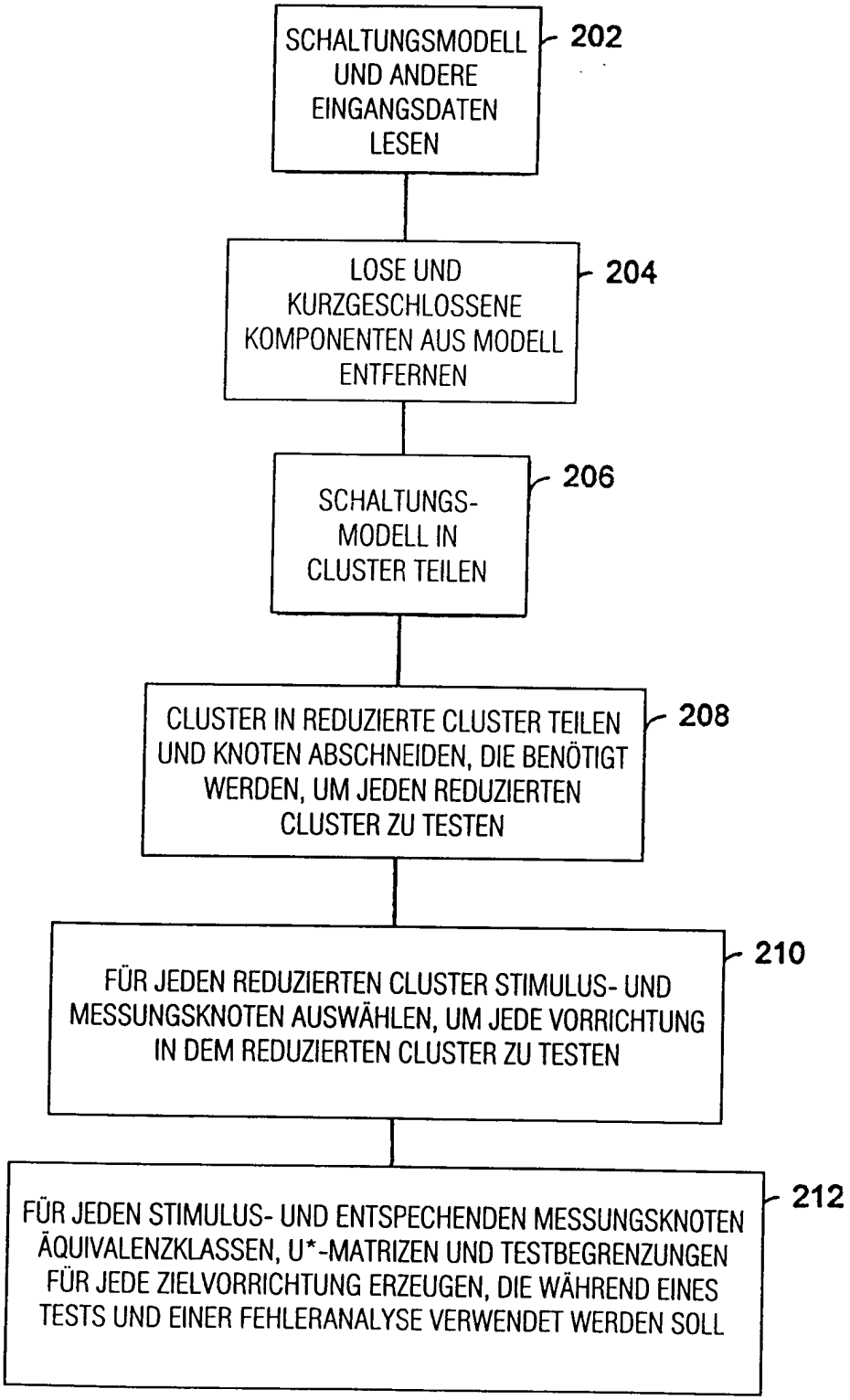
8. Das Programmspeicherungsmedium gemäß Anspruch 7, das ferner folgenden Schritt umfasst:
(i) Auswählen eines zweiten Satzes von Komponenten, falls der erste Teilsatz von Knoten nicht leer ist.

Es folgen 17 Blatt Zeichnungen

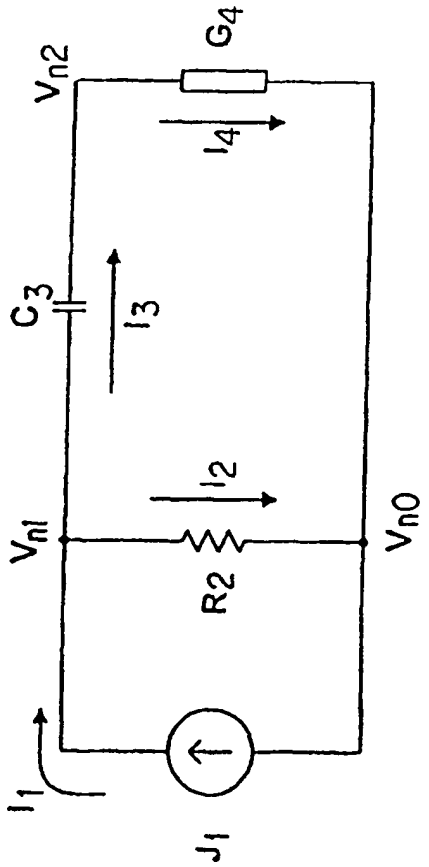
Anhängende Zeichnungen



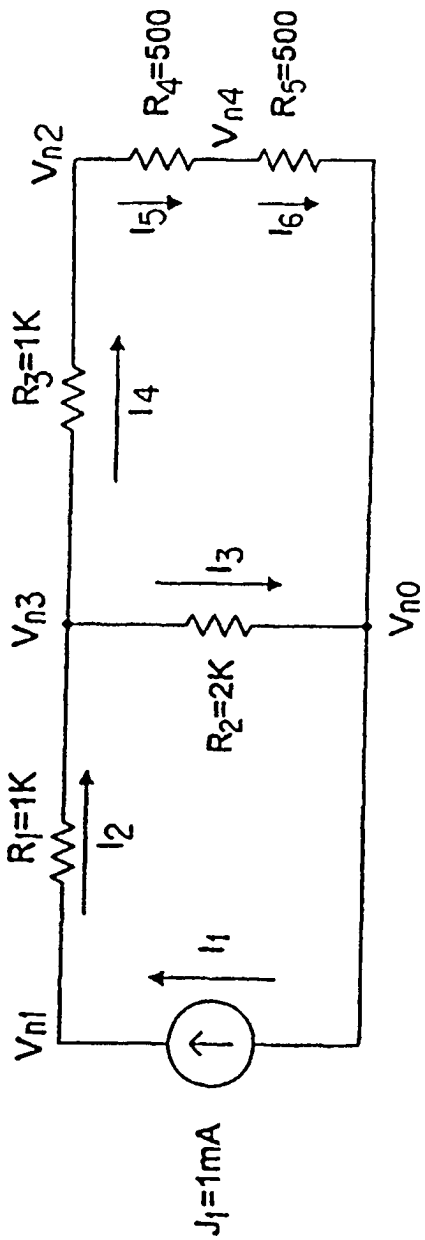
FIGUR 1


SCHALTUNGSMODELL UND ANDERE EINGANGSDATEN LESEN
202
LOSE UND KURZGESCHLOSSENE KOMPONENTEN AUS MODELL ENTFERNEN
204
SCHALTUNGS-MODELL IN CLUSTER TEILEN
206
CLUSTER IN REDUZIERTE CLUSTER TEILEN UND KNOTEN ABSCHNEIDEN, DIE BENÖTIGT WERDEN, UM JEDEN REDUZIERTEN CLUSTER ZU TESTEN
208
FÜR JEDEN REDUZIERTEN CLUSTER STIMULUS- UND MESSUNGSKNOTEN AUSWÄHLEN, UM JEDE VORRICHTUNG IN DEM REDUZIERTEN CLUSTER ZU TESTEN
210
FÜR JEDEN STIMULUS- UND ENTSPECHENDEN MESSUNGSKNOTEN ÄQUIVALENZKLASSEN, U*-MATRIZEN UND TESTBEGRENZUNGEN FÜR JEDE ZIELVORRICHTUNG ERZEUGEN, DIE WÄHREND EINES TESTS UND EINER FEHLERANALYSE VERWENDET WERDEN SOLL
212

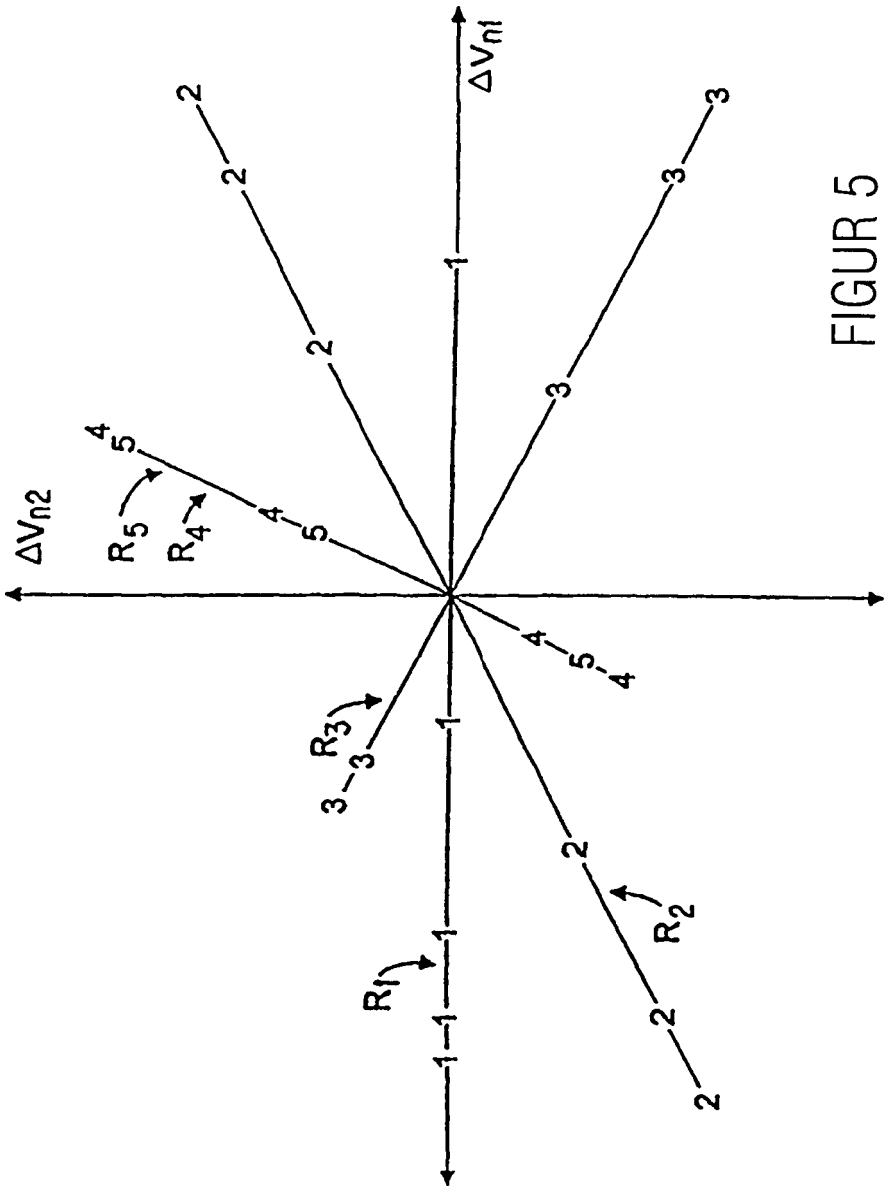
FIGUR 2



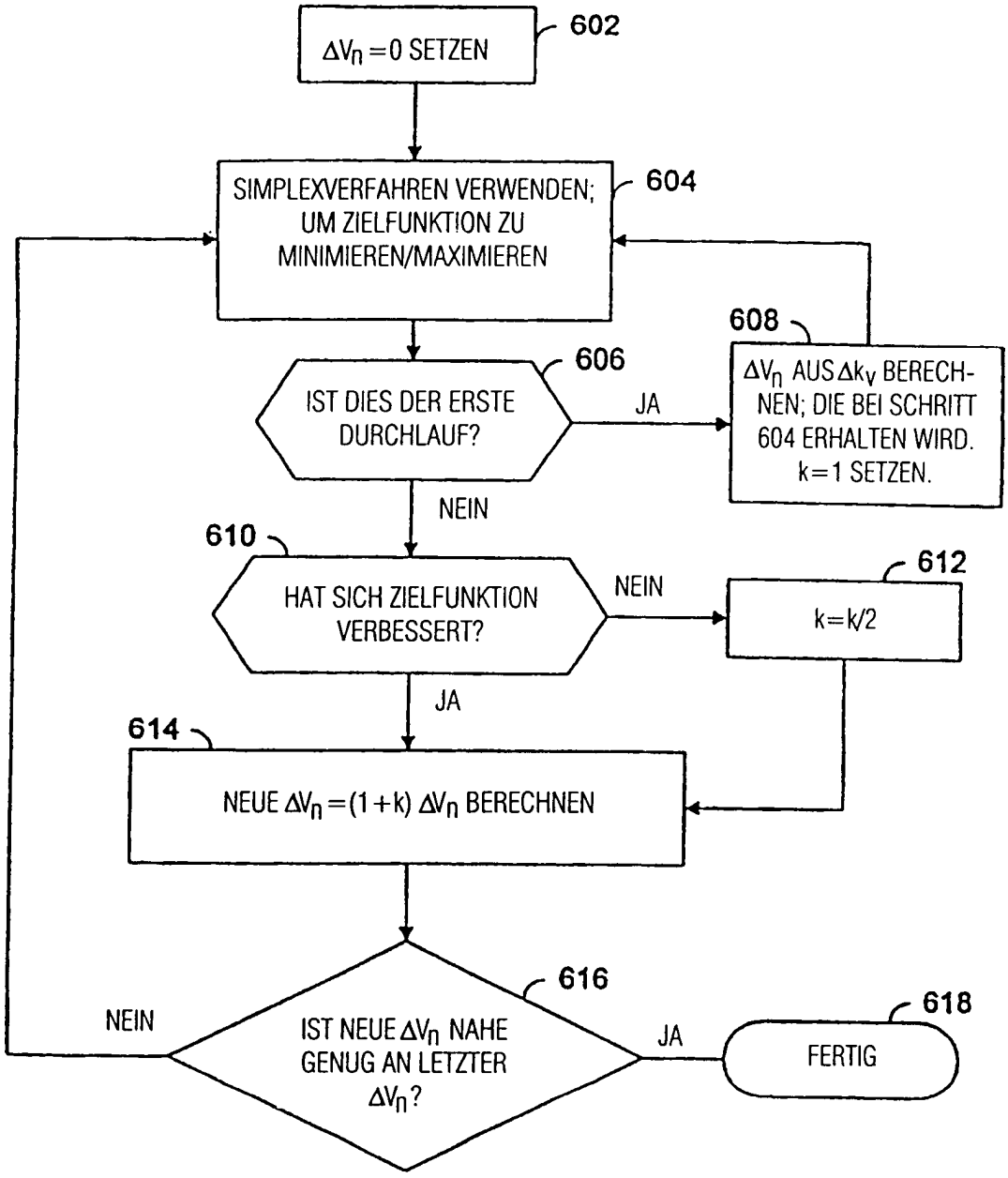
FIGUR 3


R4=500
R5=500
Vn4
Vn2
I5
I6
R3=1K
I4
I3
Vn3
Vn0
R2=2K
R1=1K
I2
I1
Vn1
J1=1mA

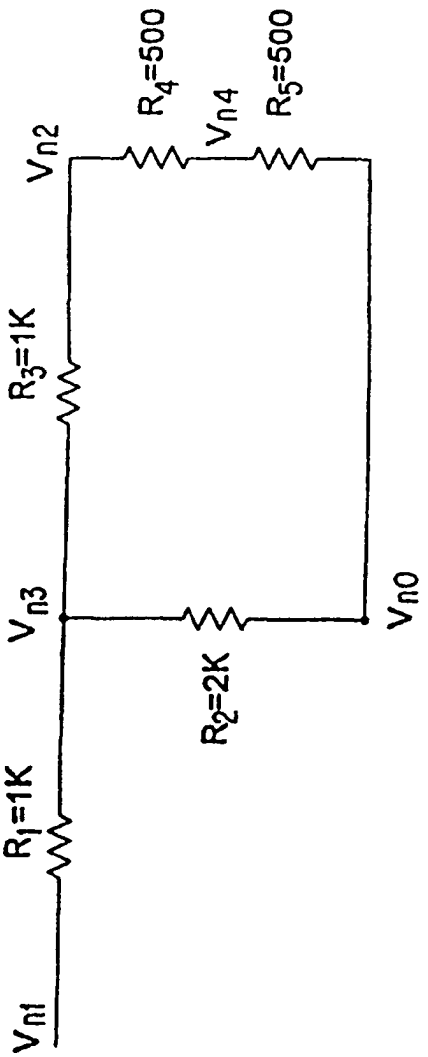
FIGUR 4



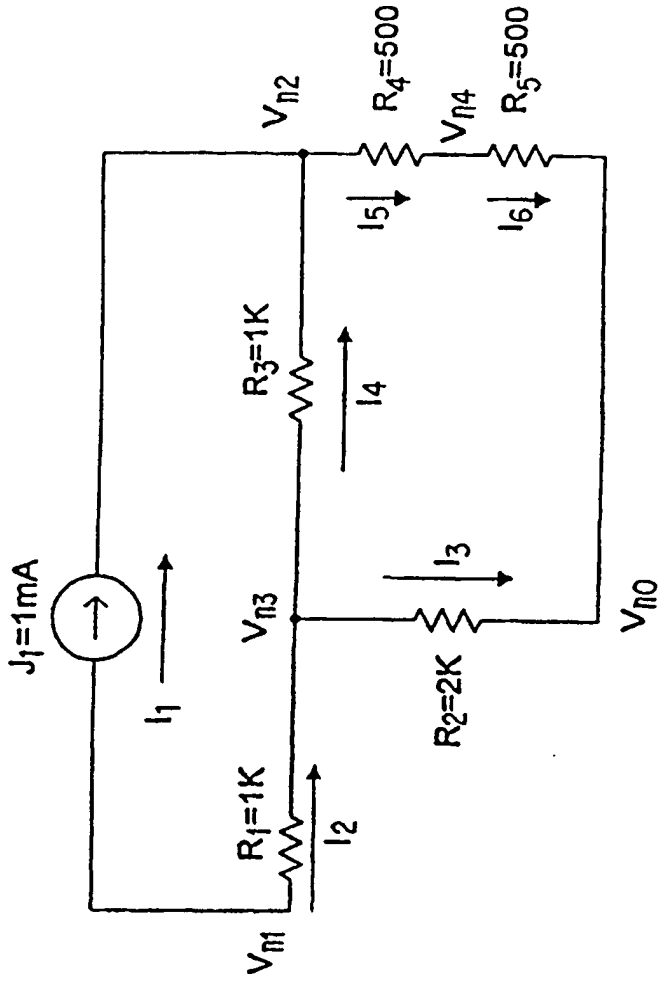
FIGUR 5


$\Delta V_n = 0$ SETZEN
602
SIMPLEXVERFAHREN VERWENDEN; UM ZIELFUNKTION ZU MINIMIEREN/MAXIMIEREN
604
608
606
IST DIES DER ERSTE DURCHLAUF?
JA
ΔV_n AUS Δk_v BERECHNEN; DIE BEI SCHRITT 604 ERHALTEN WIRD. k=1 SETZEN.
NEIN
610
HAT SICH ZIELFUNKTION VERBESSERT?
NEIN
612
k=k/2
JA
614
NEUE $\Delta V_n = (1+k)\ \Delta V_n$ BERECHNEN
616
NEIN
IST NEUE ΔV_n NAHE GENUG AN LETZTER ΔV_n?
JA
618
FERTIG

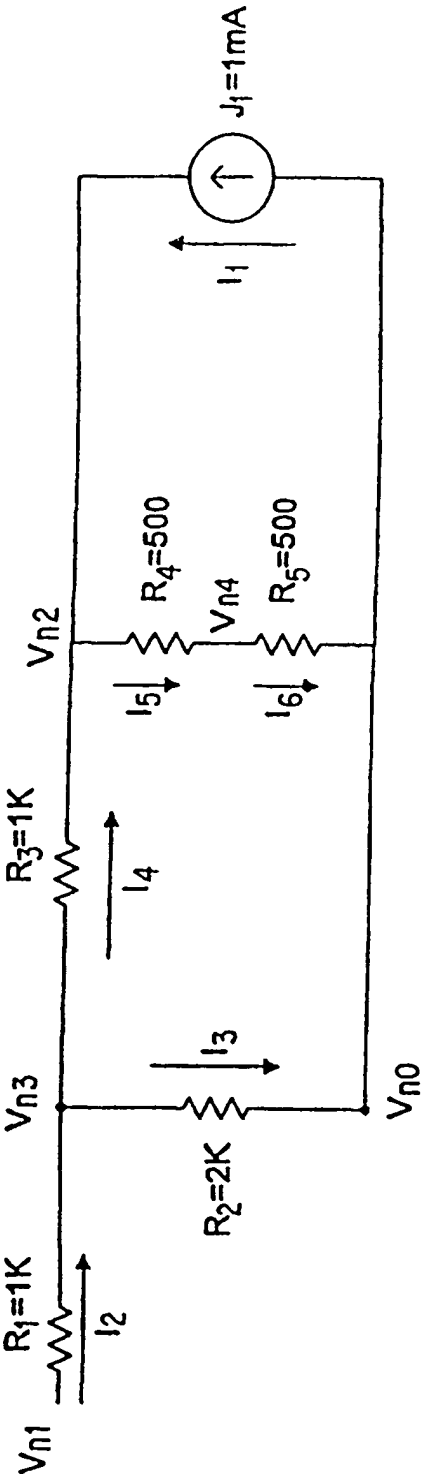
FIGUR 6



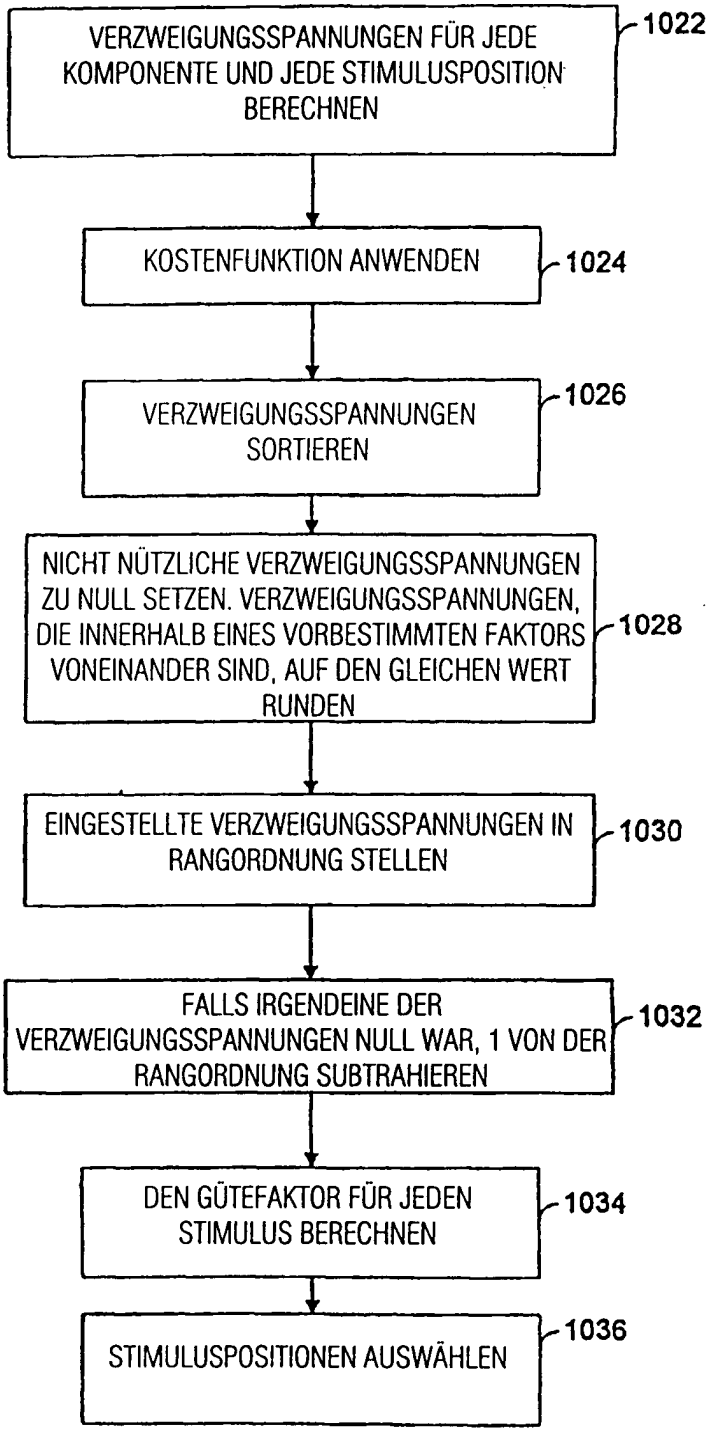
FIGUR 7


J_1=1mA
I_1
V_{n1}
R_1=1K
I_2
V_{n3}
R_3=1K
I_4
V_{n2}
R_4=500
V_{n4}
R_5=500
I_5
I_6
I_3
R_2=2K
V_{n0}

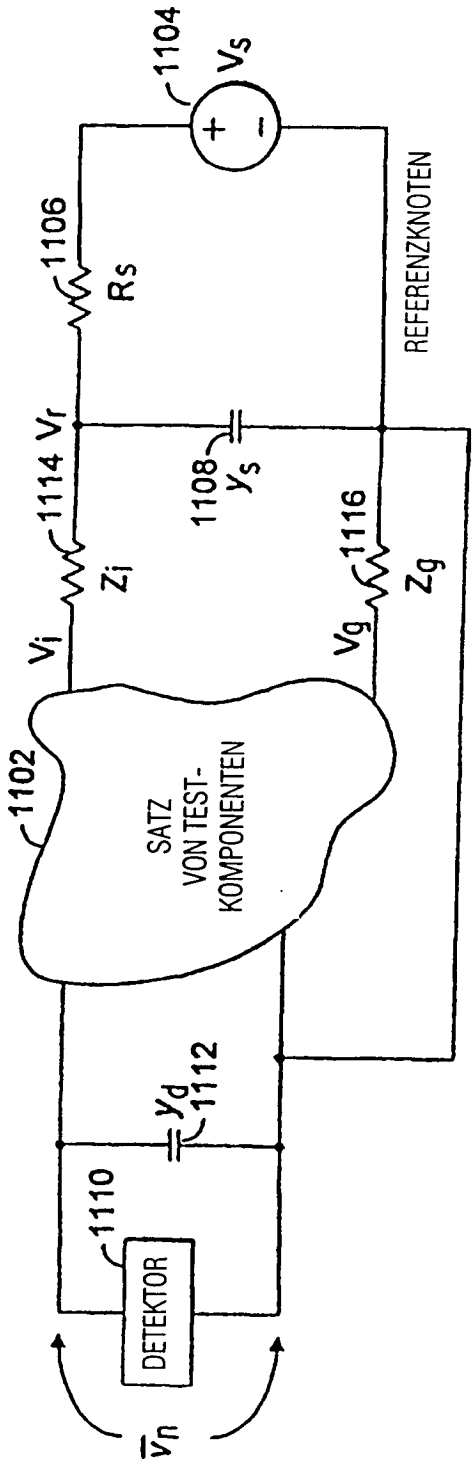
FIGUR 8


J1=1mA
I1
R4=500
Vn4
R5=500
Vn2
I5
I6
R3=1K
I4
I3
Vn3
Vn0
R2=2K
R1=1K
I2
Vn1

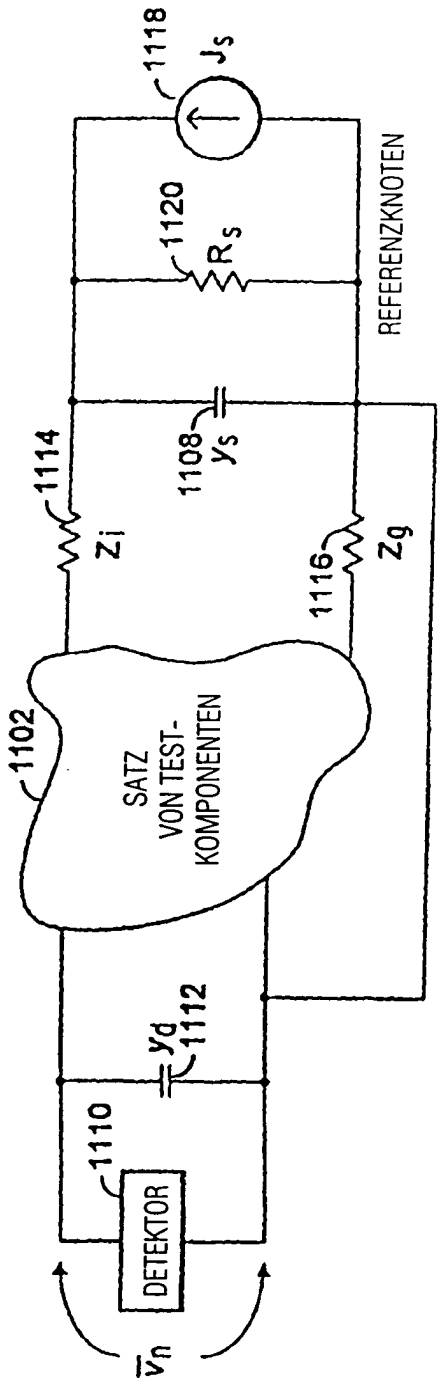
FIGUR 9


VERZWEIGUNGSSPANNUNGEN FÜR JEDE KOMPONENTE UND JEDE STIMULUSPOSITION BERECHNEN
1022
KOSTENFUNKTION ANWENDEN
1024
VERZWEIGUNGSSPANNUNGEN SORTIEREN
1026
NICHT NÜTZLICHE VERZWEIGUNGSSPANNUNGEN ZU NULL SETZEN. VERZWEIGUNGSSPANNUNGEN, DIE INNERHALB EINES VORBESTIMMTEN FAKTORS VONEINANDER SIND, AUF DEN GLEICHEN WERT RUNDEN
1028
EINGESTELLTE VERZWEIGUNGSSPANNUNGEN IN RANGORDNUNG STELLEN
1030
FALLS IRGENDEINE DER VERZWEIGUNGSSPANNUNGEN NULL WAR, 1 VON DER RANGORDNUNG SUBTRAHIEREN
1032
DEN GÜTEFAKTOR FÜR JEDEN STIMULUS BERECHNEN
1034
STIMULUSPOSITIONEN AUSWÄHLEN
1036

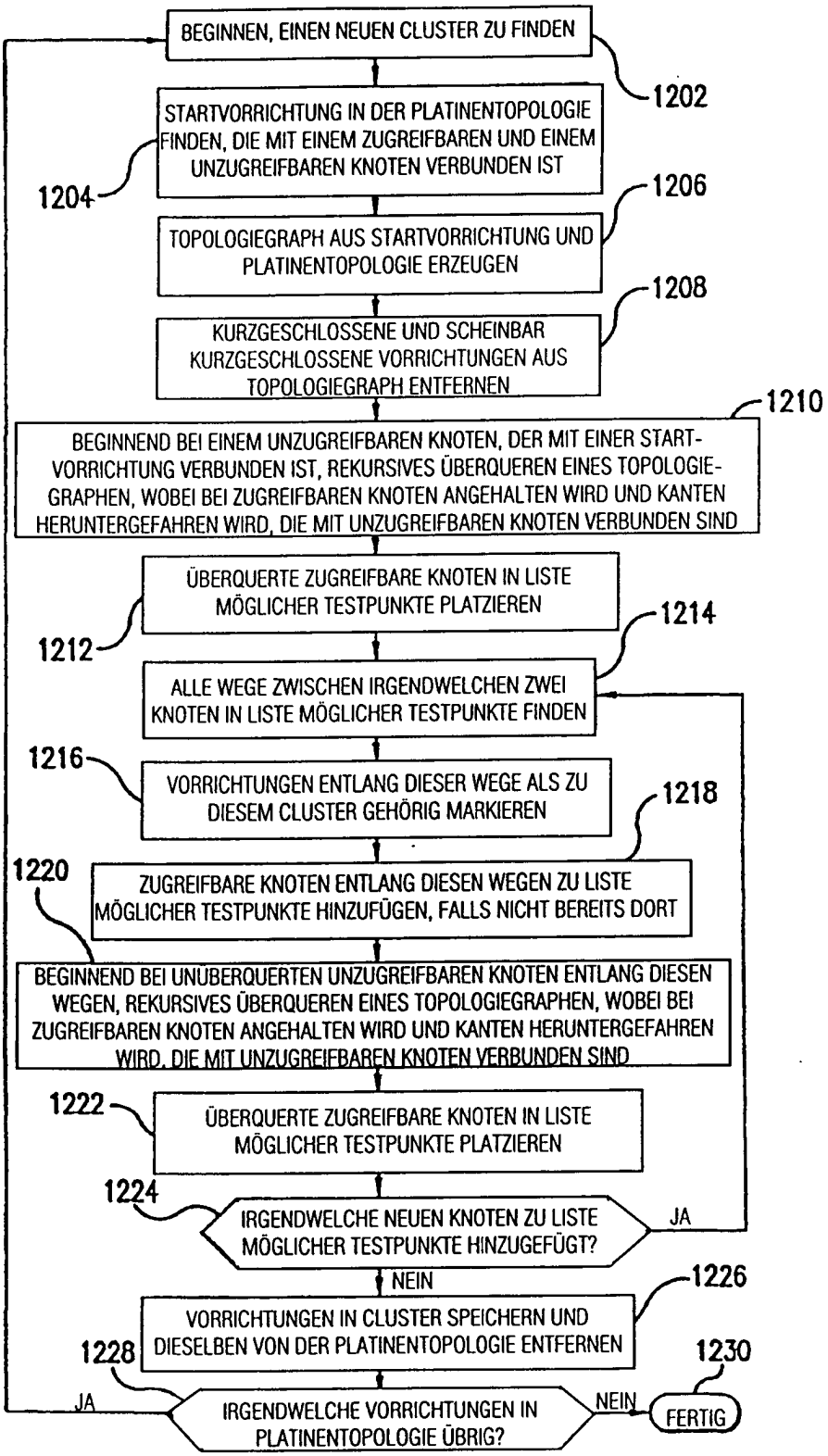
FIGUR 10


1104
V_S
1106
R_S
REFERENZKNOTEN
1114 V_r
1108
y_s
1116
z_i
z_g
V_i
V_g
1102
SATZ VON TEST-KOMPONENTEN
y_d
1112
1110
DETEKTOR
$\bar{v}_n$

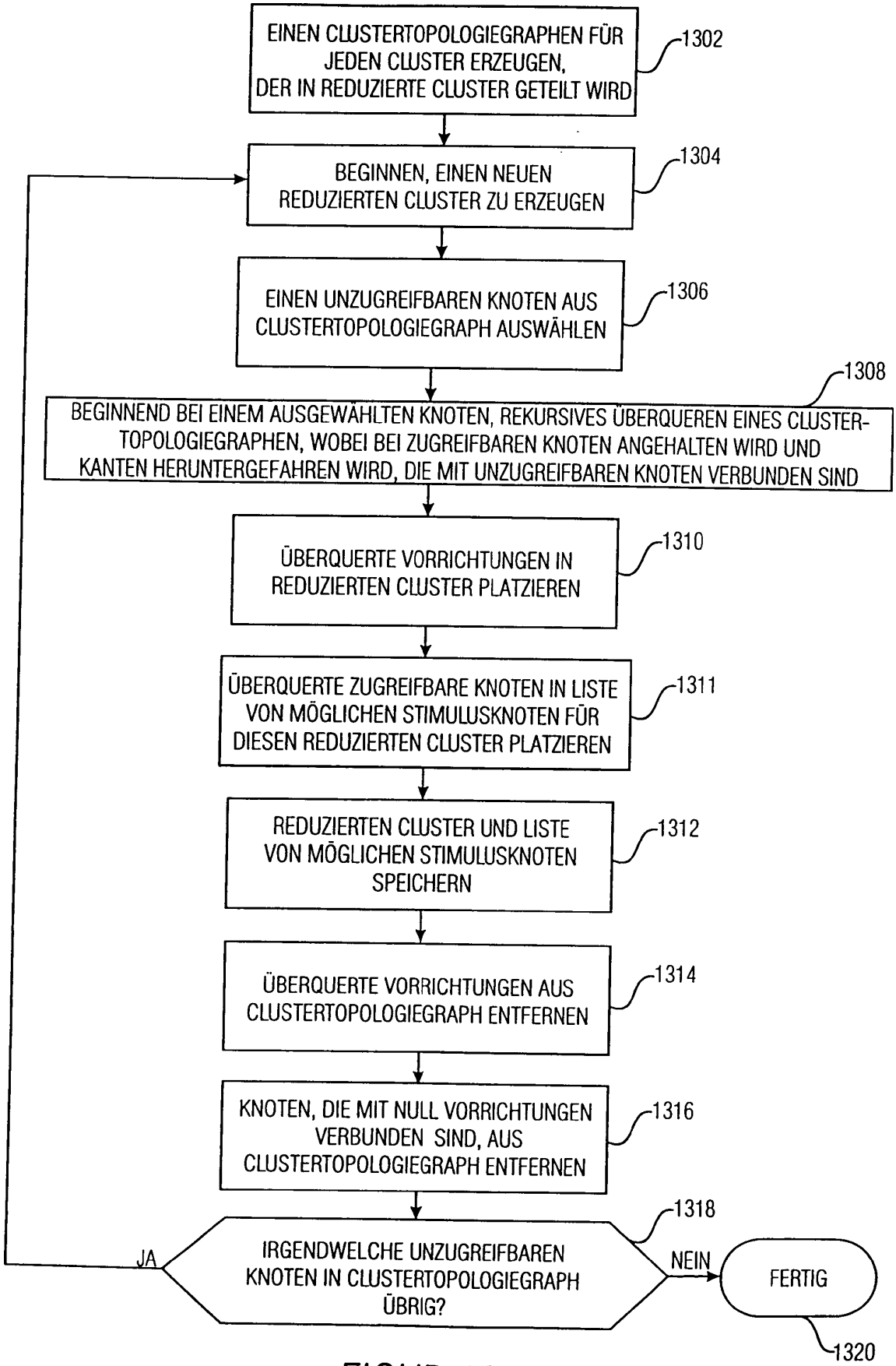
FIGUR 11A


1118
J_S
1120
R_S
REFERENZKNOTEN
1114
z_i
1108
y_S
1116
z_g
1102
SATZ VON TEST-KOMPONENTEN
1112
y_d
1110
DETEKTOR
$\overline{v_n}$

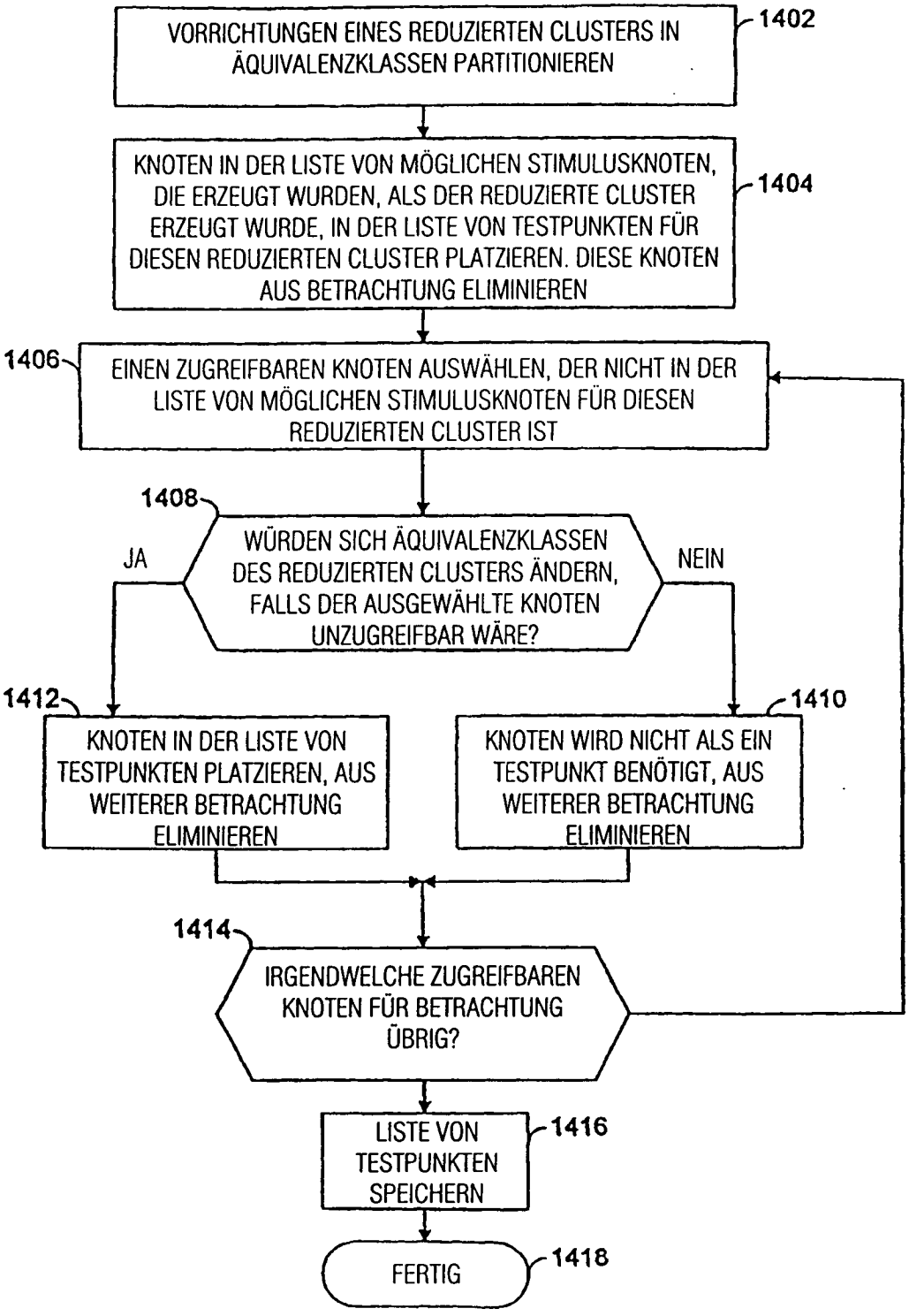
FIGUR 11B


BEGINNEN, EINEN NEUEN CLUSTER ZU FINDEN
1202
STARTVORRICHTUNG IN DER PLATINENTOPOLOGIE FINDEN, DIE MIT EINEM ZUGREIFBAREN UND EINEM UNZUGREIFBAREN KNOTEN VERBUNDEN IST
1204
1206
TOPOLOGIEGRAPH AUS STARTVORRICHTUNG UND PLATINENTOPOLOGIE ERZEUGEN
1208
KURZGESCHLOSSENE UND SCHEINBAR KURZGESCHLOSSENE VORRICHTUNGEN AUS TOPOLOGIEGRAPH ENTFERNEN
1210
BEGINNEND BEI EINEM UNZUGREIFBAREN KNOTEN, DER MIT EINER START-VORRICHTUNG VERBUNDEN IST, REKURSIVES ÜBERQUEREN EINES TOPOLOGIE-GRAPHEN, WOBEI BEI ZUGREIFBAREN KNOTEN ANGEHALTEN WIRD UND KANTEN HERUNTERGEFAHREN WIRD, DIE MIT UNZUGREIFBAREN KNOTEN VERBUNDEN SIND
ÜBERQUERTE ZUGREIFBARE KNOTEN IN LISTE MÖGLICHER TESTPUNKTE PLATZIEREN
1212
1214
ALLE WEGE ZWISCHEN IRGENDWELCHEN ZWEI KNOTEN IN LISTE MÖGLICHER TESTPUNKTE FINDEN
1216
VORRICHTUNGEN ENTLANG DIESER WEGE ALS ZU DIESEM CLUSTER GEHÖRIG MARKIEREN
1218
1220
ZUGREIFBARE KNOTEN ENTLANG DIESEN WEGEN ZU LISTE MÖGLICHER TESTPUNKTE HINZUFÜGEN, FALLS NICHT BEREITS DORT
BEGINNEND BEI UNÜBERQUERTEN UNZUGREIFBAREN KNOTEN ENTLANG DIESEN WEGEN, REKURSIVES ÜBERQUEREN EINES TOPOLOGIEGRAPHEN, WOBEI BEI ZUGREIFBAREN KNOTEN ANGEHALTEN WIRD UND KANTEN HERUNTERGEFAHREN WIRD, DIE MIT UNZUGREIFBAREN KNOTEN VERBUNDEN SIND
1222
ÜBERQUERTE ZUGREIFBARE KNOTEN IN LISTE MÖGLICHER TESTPUNKTE PLATZIEREN
1224
IRGENDWELCHE NEUEN KNOTEN ZU LISTE MÖGLICHER TESTPUNKTE HINZUGEFÜGT?
JA
NEIN
1226
VORRICHTUNGEN IN CLUSTER SPEICHERN UND DIESELBEN VON DER PLATINENTOPOLOGIE ENTFERNEN
1228
1230
JA
IRGENDWELCHE VORRICHTUNGEN IN PLATINENTOPOLOGIE ÜBRIG?
NEIN
FERTIG

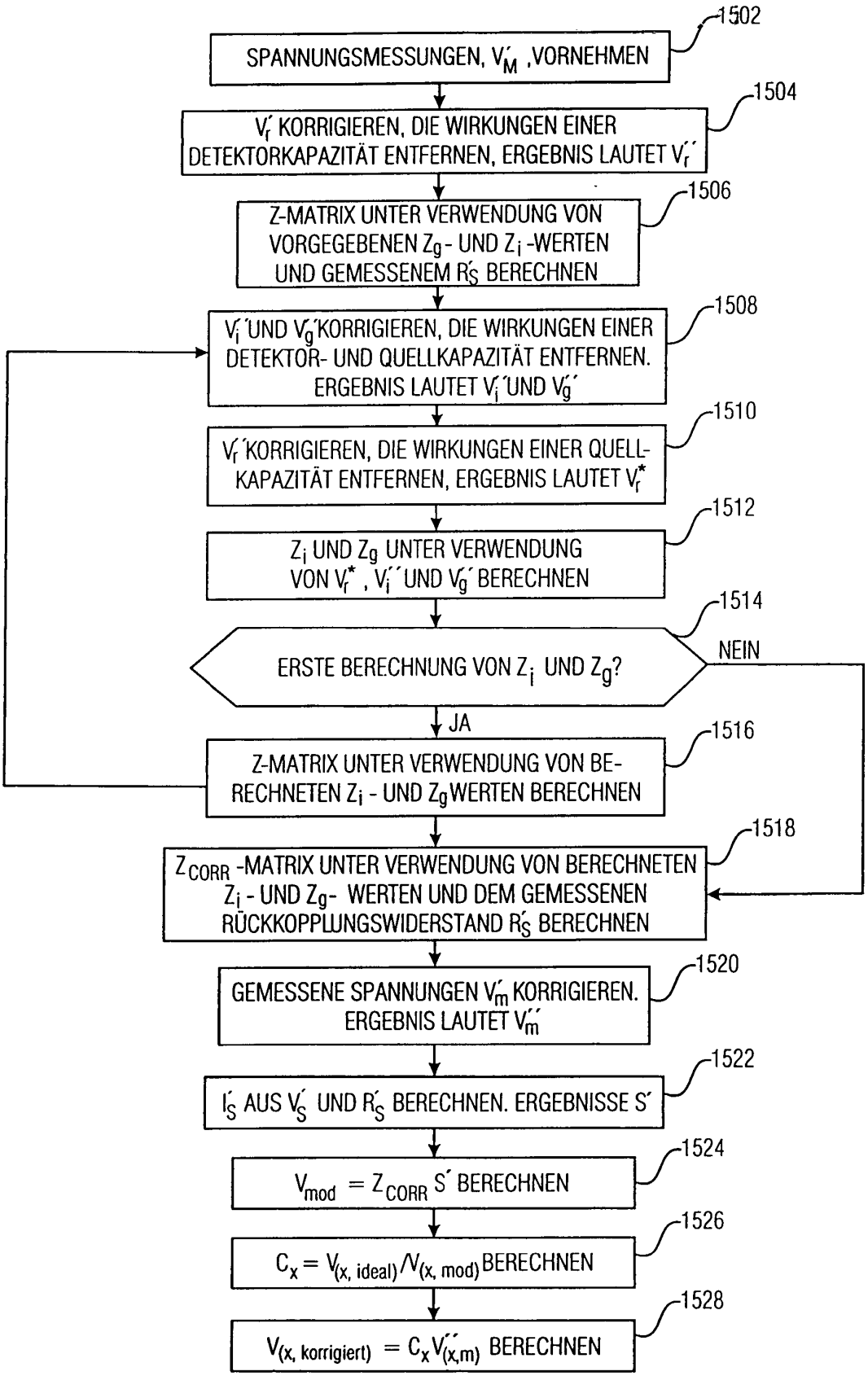
FIGUR 12


EINEN CLUSTERTOPOLOGIEGRAPHEN FÜR JEDEN CLUSTER ERZEUGEN, DER IN REDUZIERTE CLUSTER GETEILT WIRD
1302
BEGINNEN, EINEN NEUEN REDUZIERTEN CLUSTER ZU ERZEUGEN
1304
EINEN UNZUGREIFBAREN KNOTEN AUS CLUSTERTOPOLOGIEGRAPH AUSWÄHLEN
1306
1308
BEGINNEND BEI EINEM AUSGEWÄHLTEN KNOTEN, REKURSIVES ÜBERQUEREN EINES CLUSTER-TOPOLOGIEGRAPHEN, WOBEI BEI ZUGREIFBAREN KNOTEN ANGEHALTEN WIRD UND KANTEN HERUNTERGEFAHREN WIRD, DIE MIT UNZUGREIFBAREN KNOTEN VERBUNDEN SIND
ÜBERQUERTE VORRICHTUNGEN IN REDUZIERTEN CLUSTER PLATZIEREN
1310
ÜBERQUERTE ZUGREIFBARE KNOTEN IN LISTE VON MÖGLICHEN STIMULUSKNOTEN FÜR DIESEN REDUZIERTEN CLUSTER PLATZIEREN
1311
REDUZIERTEN CLUSTER UND LISTE VON MÖGLICHEN STIMULUSKNOTEN SPEICHERN
1312
ÜBERQUERTE VORRICHTUNGEN AUS CLUSTERTOPOLOGIEGRAPH ENTFERNEN
1314
KNOTEN, DIE MIT NULL VORRICHTUNGEN VERBUNDEN SIND, AUS CLUSTERTOPOLOGIEGRAPH ENTFERNEN
1316
1318
IRGENDWELCHE UNZUGREIFBAREN KNOTEN IN CLUSTERTOPOLOGIEGRAPH ÜBRIG?
JA
NEIN
FERTIG
1320

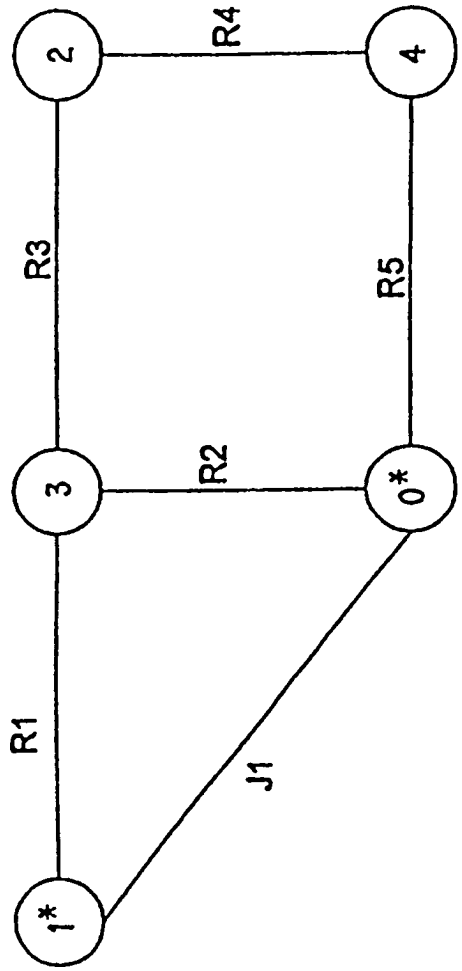
FIGUR 13


VORRICHTUNGEN EINES REDUZIERTEN CLUSTERS IN ÄQUIVALENZKLASSEN PARTITIONIEREN
1402
KNOTEN IN DER LISTE VON MÖGLICHEN STIMULUSKNOTEN, DIE ERZEUGT WURDEN, ALS DER REDUZIERTE CLUSTER ERZEUGT WURDE, IN DER LISTE VON TESTPUNKTEN FÜR DIESEN REDUZIERTEN CLUSTER PLATZIEREN. DIESE KNOTEN AUS BETRACHTUNG ELIMINIEREN
1404
1406
EINEN ZUGREIFBAREN KNOTEN AUSWÄHLEN, DER NICHT IN DER LISTE VON MÖGLICHEN STIMULUSKNOTEN FÜR DIESEN REDUZIERTEN CLUSTER IST
1408
WÜRDEN SICH ÄQUIVALENZKLASSEN DES REDUZIERTEN CLUSTERS ÄNDERN, FALLS DER AUSGEWÄHLTE KNOTEN UNZUGREIFBAR WÄRE?
JA
NEIN
1412
KNOTEN IN DER LISTE VON TESTPUNKTEN PLATZIEREN, AUS WEITERER BETRACHTUNG ELIMINIEREN
1410
KNOTEN WIRD NICHT ALS EIN TESTPUNKT BENÖTIGT, AUS WEITERER BETRACHTUNG ELIMINIEREN
1414
IRGENDWELCHE ZUGREIFBAREN KNOTEN FÜR BETRACHTUNG ÜBRIG?
LISTE VON TESTPUNKTEN SPEICHERN
1416
FERTIG
1418

FIGUR 14


1502
SPANNUNGSMESSUNGEN, V'_M ,VORNEHMEN
1504
V'_r KORRIGIEREN, DIE WIRKUNGEN EINER DETEKTORKAPAZITÄT ENTFERNEN, ERGEBNIS LAUTET V''_r
1506
Z-MATRIX UNTER VERWENDUNG VON VORGEGEBENEN Z_g- UND Z_i -WERTEN UND GEMESSENEM R'_S BERECHNEN
1508
V'_i UND V'_g KORRIGIEREN, DIE WIRKUNGEN EINER DETEKTOR- UND QUELLKAPAZITÄT ENTFERNEN. ERGEBNIS LAUTET V''_i UND V''_g
1510
V'_r KORRIGIEREN, DIE WIRKUNGEN EINER QUELL-KAPAZITÄT ENTFERNEN, ERGEBNIS LAUTET V^*_r
1512
Z_i UND Z_g UNTER VERWENDUNG VON V^*_r , V''_i UND V''_g BERECHNEN
1514
ERSTE BERECHNUNG VON Z_i UND Z_g?
NEIN
JA
1516
Z-MATRIX UNTER VERWENDUNG VON BE-RECHNETEN Z_i - UND Z_gWERTEN BERECHNEN
1518
Z_{CORR} -MATRIX UNTER VERWENDUNG VON BERECHNETEN Z_i - UND Z_g- WERTEN UND DEM GEMESSENEN RÜCKKOPPLUNGSWIDERSTAND R'_S BERECHNEN
1520
GEMESSENE SPANNUNGEN V'_m KORRIGIEREN. ERGEBNIS LAUTET V''_m
1522
I'_S AUS V'_S UND R'_S BERECHNEN. ERGEBNISSE S'
1524
$V_{mod} = Z_{CORR} S'$ BERECHNEN
1526
$C_x = V_{(x, ideal)} / V_{(x, mod)}$ BERECHNEN
1528
$V_{(x, korrigiert)} = C_x V''_{(x,m)}$ BERECHNEN

FIGUR 15



FIGUR 16