



(10) **DE 11 2008 001 173 B4** 2012.12.20

(12)

Patentschrift

(21) Deutsches Aktenzeichen: **11 2008 001 173.7**
(86) PCT-Aktenzeichen: **PCT/EP2008/010787**
(87) PCT-Veröffentlichungs-Nr.: **WO 2010/069344**
(86) PCT-Anmeldetag: **17.12.2008**
(87) PCT-Veröffentlichungstag: **24.06.2010**
(43) Veröffentlichungstag der PCT Anmeldung
in deutscher Übersetzung: **30.09.2010**
(45) Veröffentlichungstag
der Patenterteilung: **20.12.2012**

(51) Int Cl.: **G01R 31/28 (2006.01)**

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

(73) Patentinhaber:
Advantest (Singapore) Pte. Ltd., Singapur, SG

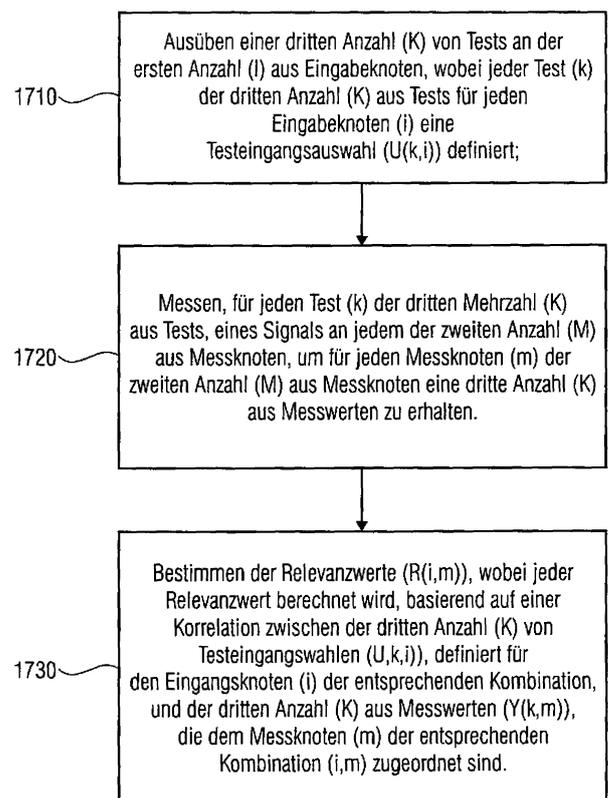
(72) Erfinder:
Rivoir, Jochen, 71106, Magstadt, DE

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

(56) Für die Beurteilung der Patentfähigkeit in Betracht
gezogene Druckschriften:
siehe Folgeseiten

(54) Bezeichnung: **Verfahren zum Bestimmen von Relevanzwerten für eine Erfassung eines Fehlers auf einem Chip, Verfahren zum Bestimmen einer Fehlerwahrscheinlichkeit eines Orts auf einem Chip und Computerprogramm**

(57) Hauptanspruch: Verfahren zum Bestimmen von Relevanzwerten ($R(i, m)$), wobei jeder Relevanzwert eine Relevanz einer Kombination ((i, m)) eines Eingabeknotens (i) einer ersten Anzahl (I) aus Eingabeknoten mit einem Messknoten (m) einer zweiten Anzahl (M) aus Messknoten für eine Erfassung eines Fehlers auf einem Chip darstellt, wobei das Verfahren folgende Schritte aufweist:
Anwenden (1710) einer dritten Anzahl (K) von Tests an die erste Anzahl (I) von Eingabeknoten, wobei jeder Test (k) der dritten Anzahl (K) von Tests für jeden Eingabeknoten (i) eine Testeingangswahl ($U(k, i)$) definiert;
Messen (1720) für jeden Test (k) der dritten Anzahl (K) aus Tests, eines Signals an jedem der zweiten Anzahl (M) aus Messknoten, um für jeden Messknoten (m) der zweiten Anzahl (M) aus Messknoten eine dritte Anzahl (K) aus Messwerten zu erhalten, wobei jeder Messwert ($Y(k, m)$) dem Test (k), für den er gemessen wurde, und dem Messknoten (m), an dem er gemessen wurde, zugeordnet...



(56) Für die Beurteilung der Patentfähigkeit in Betracht
gezogene Druckschriften:

**Liu, F et. al: Efficient Simulation of Parametric
Faults for Multi-Stage Analog Circuits. In:
International Test Conference ITC, 2007, Paper
24.2.**

Beschreibung

[0001] Die vorliegende Erfindung bezieht sich auf das Testen von Chips oder anderen Bauelementen und auf das Diagnostizieren von Fehlern auf diesen Chips oder Bauelementen, z. B. in analogen oder Hochfrequenz-(HF-)Schaltungen.

[0002] Bei einem bekannten Verfahren wird das Schaltungsverhalten für jeden möglichen Fehler unter jeder relevanten Kombination aus Prozessparametern simuliert und wird in einem Fehlerverzeichnis gespeichert. Die Messungen einer Diagnoseschaltung oder eines zu testenden Bauelements (DUT; device under test) werden mit allen Einträgen in dem Fehlerverzeichnis verglichen, wobei der ähnlichste Eintrag des Fehlerverzeichnisses den diagnostizierten Fehler identifiziert. Dieses Verfahren ist einfach, erfordert jedoch eine große Anzahl von lang laufenden Simulationen. Ferner erfordert es das Modellieren von Testbedingungen. Ein Beispiel wird beschrieben von F. Liu, S. O. Ozev: „Efficient Simulation of Parametric Faults for Multi-Stage Analog Circuits“, ITC 2007.

[0003] Die Fähigkeit zum Diagnostizieren von Fehlern ist wesentlich, um ein Lernen zu erzielen, z. B. den Ertrag während der Produktion zu verbessern, aber eine korrigierende Wirkung ist nur möglich, wenn das physische Wesen eines Fehlers bekannt ist. Im Gegensatz zur Fehlerdiagnose für digitale Systeme ist kein praktikierbares Verfahren bekannt für Fehler, die sich z. B. als eine parametrische Abweichung in analogen oder Hochfrequenz-(HF-)Schaltungen zeigen.

[0004] Es ist die Aufgabe der Erfindung, eine praktikable Fehlerdiagnose von parametrischen Fehlern während einer großvolumigen Herstellung zu ermöglichen.

[0005] Diese Aufgabe wird durch ein Verfahren gemäß Anspruch 1, durch ein Verfahren gemäß Anspruch 11 und durch ein Computerprogramm gemäß Anspruch 18 gelöst.

[0006] Die Unteransprüche geben vorteilhafte Ausführungsarten der Erfindung an.

[0007] Die vorliegende Erfindung liefert ein Verfahren zum Bestimmen von Relevanzwerten $R(i, m)$, wobei jeder Relevanzwert eine Relevanz einer Kombination (i, m) eines Eingabeknotens i einer ersten Anzahl I aus Eingabeknoten mit einem Messknoten m einer zweiten Anzahl M aus Messknoten für eine Erfassung eines Fehlers auf einem Chip darstellt, wobei das Verfahren folgende Schritte aufweist: Anwenden einer dritten Anzahl K von Tests an die erste Anzahl I von Eingabeknoten, wobei jeder Test k der dritten Anzahl K von Tests für jeden Eingabeknoten i eine

Testeingabewahl $U(k, i)$ definiert; Messen für jeden Test k der dritten Anzahl K aus Tests, eines Signals an jedem der zweiten Anzahl M aus Messknoten, um für jeden Messknoten m der zweiten Anzahl M aus Messknoten eine dritte Anzahl K aus Messwerten zu erhalten, wobei jeder Messwert $Y(k, m)$ dem Test k , für den er gemessen wurde, und dem Messknoten m , an dem er gemessen wurde, zugeordnet ist; Bestimmen der Relevanzwerte $R(i, m)$, wobei jeder Relevanzwert berechnet wird basierend auf einer Korrelation $C(i, m)$ zwischen der dritten Anzahl K aus Testeingabewahlen $U(k, i)$, definiert für den Eingabeknoten i der entsprechenden Kombination, und der dritten Anzahl K aus Messwerten $Y(k, m)$, zugeordnet zu dem Messknoten m der entsprechenden Kombination (i, m) .

[0008] Außerdem liefert die Erfindung ein Verfahren zum Bestimmen einer Fehlerwahrscheinlichkeit $F(x, y, z)$ eines Orts (x, y, z) auf einem Chip, das folgende Schritte aufweist: Bestimmen von Relevanzwerten $R(i, m)$, wobei jeder Relevanzwert eine Relevanz einer Kombination (i, m) eines Eingabeknotens i einer ersten Anzahl I aus Eingabeknoten mit einem Messknoten m einer zweiten Anzahl M aus Messknoten für eine Erfassung eines Fehlers auf einem Chip darstellt; Bestimmen für jeden Signalweg p einer vierten Anzahl P aus Signalwegen des Chips, einer Distanz $L((x, y, z), i, m, p)$ von dem Ort (x, y, z) zu jedem der vierten Anzahl P aus Signalwegen des Chips, wobei jeder Signalweg p sich von einem Eingabeknoten i der ersten Anzahl I aus Eingabeknoten zu einem Messknoten m der zweiten Anzahl M aus Messknoten erstreckt; und Bestimmen der Fehlerwahrscheinlichkeit $F(x, y, z)$ basierend auf dem Addieren der Distanzen $L((x, y, z), i, m, p)$ zu jedem der vierten Anzahl P aus Signalwegen, gewichtet durch den Relevanzwert $R(i, m)$ der Kombination des Eingabeknotens i , von dem sich der entsprechende Signalweg p erstreckt, und des Messknotens m , zu dem sich der entsprechende Signalweg p erstreckt.

[0009] Die vorliegende Erfindung basiert auf der Erkenntnis, dass, wenn eine Abweichung einer Messung m mit einer Eingabe i über eine Testfolge korreliert, der diagnostizierte Fehlerort zwischen dem Ort $A(i)$, wo die Eingabe i angelegt ist, und dem Ort $B(m)$, wo die Messung m ausgeführt wird, liegt. Dabei wird angenommen, dass die Eingabe i den Fehler sensibilisiert.

[0010] Wenn die Eingabe i nur die Fehlererfassbarkeit beeinflusst und wenn ein Signalgraph bekannt ist, ist ein diagnostizierter Fehlerort auf einem Signalweg durch $A(i)$ zu $B(m)$.

[0011] Eine Überlagerung aller Korrelationen $C(i, m)$ der Messungen m mit den Eingaben i , gewichtet mit den Gesamtabweichungen der Messung m , reduziert die Ortszweideutigkeit.

[0012] Ausführungsbeispiele der vorliegenden Erfindung benötigen kein Fehlermodell, keine detaillierte Kenntnis des Bauelements, keine Modellierung von Tests und keine Simulation überhaupt.

[0013] Für bestimmte Ausführungsbeispiele müssen nur der Ort des Eingabeknotens, wo die Eingaben i angelegt sind, und die Positionen der Messknoten m , wo die Messungen m genommen werden, bekannt sein.

[0014] Für weitere Ausführungsbeispiele ist zusätzlich der Ort der Signalwege p , die bestimmte Eingabeknoten i mit bestimmten Messknoten m verbinden, bekannt. Diese Ausführungsbeispiele ermöglichen eine präzise, automatische Lokalisierung eines fehlerhaften Schaltungselements des Chips.

[0015] Ausführungsbeispiele der vorliegenden Erfindung werden hierin nachfolgend unter Bezugnahme auf die beiliegenden Zeichnungen beschrieben:

[0016] **Fig. 1** zeigt ein Schaltungsdiagramm eines Hochfrequenz-Sende-/Empfangs-Geräts.

[0017] **Fig. 2** zeigt eine exemplarische Tabelle mit Messwerten an dem ersten Mischer M_x -TI abhängig von den Eingabewahlen des ersten Digital-zu-Analog-Wandlers DAC-I und des ersten Tiefpassfilters LP-TI.

[0018] **Fig. 3** zeigt eine perspektivische Ansicht einer Schaltung gemäß **Fig. 1** in einem System-auf-Paket-Entwurf.

[0019] **Fig. 4** zeigt exemplarische Eingabewahlen $U(k, i)$ und entsprechende Messwerte $Y_d(k, m)$, die durch ein Ausführungsbeispiel der Erfindung erzeugt werden.

[0020] **Fig. 5** zeigt eine exemplarische Eingabetabelle, die alle möglichen Kombinationen von Eingabewahlen $U(k, i)$ aufweist, und eine zweite Eingabetabelle, die zufällige Eingabewahlen $U(k, i)$ aufweist, erzeugt durch ein Ausführungsbeispiel der Erfindung.

[0021] **Fig. 6** zeigt die exemplarische Eingabetabelle von **Fig. 4** in einer spezifizierten Version der Eingabewahlentabelle von **Fig. 4** und die Abweichungen $\mu_Y(k, m)$ der entsprechenden Messungen, die in **Fig. 4** gezeigt sind, über D Bauelemente, die durch ein Ausführungsbeispiel der Erfindung erzeugt werden.

[0022] **Fig. 7** zeigt die Tabelle aus **Fig. 2**, die zusätzliche, exemplarische Messwerte für ein fehlerhaftes Bauelement aufweist.

[0023] **Fig. 8** zeigt die exemplarischen Eingabewahlen $U(k, i)$ aus **Fig. 4** und Messwerte $Y(k, m)$ des

fehlerhaften Bauelements, erzeugt durch ein Ausführungsbeispiel der Erfindung.

[0024] **Fig. 9** zeigt normierte Eingabewahlen $V(k, i)$, hergeleitet aus den Eingabewahlen $U(k, i)$ aus **Fig. 8**, und normierte Abweichungswerte $Z(k, m)$, hergeleitet aus den Messwerten $Y(k, m)$ aus **Fig. 8**.

[0025] **Fig. 10** zeigt eine exemplarische Relevanzmatrix $R(i, m)$, erzeugt durch ein Ausführungsbeispiel der Erfindung.

[0026] **Fig. 11** zeigt die perspektivische Ansicht aus **Fig. 3** und die Distanz L eines Orts (400, 500, 0) zu dem Signalweg von dem ersten Stimulusknoten DAC-I zu dem dritten Messknoten PA.

[0027] **Fig. 12** zeigt eine exemplarische Fehlerortswahrscheinlichkeitsdarstellung, erzeugt durch ein Ausführungsbeispiel der vorliegenden Erfindung mit Kenntnis der Signalwege.

[0028] **Fig. 13** zeigt einen Pseudocode eines Algorithmus eines Ausführungsbeispiels zum Finden von Wegen in einem Signalgraphen.

[0029] **Fig. 14** zeigt einen Ort x und seine Distanz d zu einem Leitungssegment eines Signalwegs.

[0030] **Fig. 15** zeigt Pseudocodes für Algorithmen von Ausführungsbeispielen der vorliegenden Erfindung, um die kürzeste Distanz von einem Ort zu einem Polygon zu berechnen, und für eine Berechnung einer Distanz eines Orts zu einem Leitungssegment.

[0031] **Fig. 16** zeigt eine exemplarische Fehlerortswahrscheinlichkeit, erzeugt durch ein Ausführungsbeispiel der vorliegenden Erfindung ohne Kenntnis des Orts der Signalwege.

[0032] **Fig. 17** zeigt ein Flussdiagramm eines Ausführungsbeispiels eines Verfahrens zum Bestimmen von Relevanzwerten $R(i, m)$ für eine Erfassung eines Fehlers auf einem Chip.

[0033] **Fig. 18** zeigt ein Flussdiagramm eines Ausführungsbeispiels eines Verfahrens zum Bestimmen einer Fehlerwahrscheinlichkeit eines Orts auf einem Chip.

[0034] Nachfolgend werden dieselben Bezugszeichen in unterschiedlichen Zeichnungen zur Bezugnahme auf dieselben Merkmale oder Merkmale einer ähnlichen Funktionalität verwendet.

[0035] Innerhalb des Kontexts dieser Anmeldung werden zwei Typen von Eingaben oder Testeingaben unterschieden: „Stimuli“ und „Bedingungen“. Stimuli „stimulieren“ oder erzeugen üblicherweise ein Signal, um einen potentiellen Fehler zu sensibilisieren.

[0036] Stimuli können z. B. Folgendes sein:

- Versorgungsspannungen, z. B. Vdd
- externe Wellenformgeneratoren
- interne Digital-zu-Analog-Wandler (DACs).

[0037] Die Orte, wo die Stimuli geliefert werden, entweder intern oder extern, werden als Stimulusknoten bezeichnet.

[0038] Der zweite Eingabetyp, die Bedingungen, beeinflussen die Fehlererfassbarkeit durch Beeinflussen eines Signals auf einem Signalweg von einem Stimulusknoten zu einem Messknoten.

[0039] Bedingungen können z. B. Folgende sein:

- Gewinn- oder Filtereinstellungen
- digitale Abstimmungswörter
- Umgehungsmodi
- Signalwegauswahlen, Schalter
- Korrektur-DAC, z. B. Versatzkorrektur
- Temperatur.

[0040] Orte, wo diese Bedingungsingaben angewendet werden, werden als Bedingungsknoten oder im Allgemeinen als Eingabeknoten bezeichnet. Sowohl Stimulusknoten als auch Bedingungsknoten werden auch als Eingabeknoten bezeichnet. Ferner werden Stimuli auch als Stimuluseingaben, Stimuluseingabewahlen oder Signale bezeichnet, und Bedingungen als Bedingungsingaben, Eingabewahlen oder Parameter, wobei sowohl Stimuli als auch Bedingungen im Allgemeinen auch als Eingaben, Testeingaben oder Testeingabewahlen bezeichnet werden. Der Ausdruck „Wahl“ zeigt nur an, dass diese Eingaben üblicherweise aus einer Mehrzahl von möglichen Eingaben gewählt oder ausgewählt werden.

[0041] Die Stimuli und Bedingungen können z. B. als eines der Folgenden modelliert sein:

- Gleitkommazahlen, z. B. Versorgungsspannung,
- ganze Zahlen, z. B. DAC-Codewort,
- Boolesche Werte,
- Aufzähltypen, z. B. ist der Stimulus ein schneller Sinus, langsamer Sinus oder eine Rampenfunktion, wobei die aufgezählten Typen modelliert sind als mehrere Boolesche Eingaben an demselben Ort.

[0042] Es sollte darauf hingewiesen werden, dass Wellenformen üblicherweise als Wahlen aus verfügbaren Wellenformen modelliert sind, wie z. B. oben für die aufgezählten Typen erklärt ist, und nicht als Arrays.

[0043] Die Orte, wo die Messungen ausgeführt werden, oder anders ausgedrückt, wo Signalwerte gemessen werden, werden als Messknoten bezeichnet.

[0044] Jede Messung ist als eine skalare Gleitkommazahl modelliert. Mehrere Charakteristika, z. B. THD und SINAD, die aus einer erfassten Wellenform extrahiert sind, wie mit Bezug auf die aufgezählten Eingabetypen erklärt wurde, zählen als mehrere Messungen an demselben Ort bzw. an demselben Messknoten.

[0045] Beispiele sind:

- externe Versorgungsstrommessung, z. B. Iddq
- eingebauter Strom- oder Leistungs- oder Geschwindigkeitssensor
- THD-Wert aus einer erfassten Wellenform
- Überbereich erfasst: „ja“ = +1 oder „nein“ = -1.

[0046] [Fig. 1](#) zeigt ein exemplarisches Diagramm einer Hochfrequenz-(HF-)Sende-/Empfangsschaltung mit vier Eingaben oder Eingabeknoten und acht Messungen oder Messknoten. Der Sender oder das Senderteil **110** des Sende-/Empfangsgeräts **100** weist einen ersten Digital-zu-Analog-Wandler DAC_I **112** zum Umwandeln digitaler I-Signale in analoge I-Signale auf, einen zweiten Digital-zu-Analog-Wandler DAC_Q **114** zum Umwandeln digitaler Q-Signale in analoge Q-Signale, eine Phasenregelschleife PLL **116**, ein erstes Tiefpassfilter LP_TI **118** zum Tiefpassfiltern des analogen I-Signals, ein zweites Tiefpassfilter LP_TQ **120** zum Tiefpassfiltern des analogen Q-Signals, einen Phasenschieber **122**, einen ersten Mischer Mx-TI **124**, einen zweiten Mischer Mx-TQ **126**, einen Summierer S **128** und einen Leistungsverstärker PA **130**.

[0047] Der Empfänger oder das Empfängerteil **140** weist einen rauscharmen Verstärker LNA (low noise amplifier) **142**, eine zweite Phasenregelschleife **144**, einen zweiten Phasenschieber **146**, einen dritten Mischer Mx-RI **148**, einen vierten Mischer Mx-RQ **150**, einen ersten Analog-zu-Digital-Wandler ADC_I **152** zum Wandeln eines analogen I-Signals in ein digitales I-Signal und einen zweiten Analog-zu-Digital-Wandler ADC_Q **154** zum Wandeln eines analogen Q-Signals in ein digitales Q-Signal auf.

[0048] Ferner weist die Sende-/Empfangsschaltung **100** ein Dämpfungselement Att (attenuator) **160** auf.

[0049] Die Pfeile in [Fig. 1](#) zeigen die Signalwege von den unterschiedlichen Schaltungselementen der Sende-/Empfangsschaltung **100** und die Richtung des entsprechenden Signalflusses.

[0050] Wie aus [Fig. 1](#) ersichtlich ist, ist ein Ausgangsport des ersten Digital-zu-Analog-Wandlers DAC_I **112** mit einem Eingangsport des ersten Tiefpassfilters LP_TI **118** verbunden, ein Ausgangsport des zweiten Digital-zu-Analog-Wandlers DAC_Q **114** ist mit einem Eingangsport des zweiten Tiefpassfilters LP_TQ **120** verbunden, ein Ausgangsport der Phasenregelschleife **116** ist mit einem Eingangsport

des Phasenschiebers **122** verbunden, und ein Ausgangsport des ersten Tiefpassfilters LP_TI **118** und ein 0°-Ausgangsport des Phasenschiebers **122** sind mit Eingangsports des ersten Mischers Mx-TI **124** verbunden, ein Ausgangsport des zweiten Tiefpassfilters LP_TQ **120** und ein 90°-Ausgangsport des Phasenschiebers **122** sind mit Eingangsports des zweiten Mischers Mx-TQ **126** verbunden, ein Ausgangsport des ersten Mischers Mx-TI **124** und ein Ausgangsport des zweiten Mischers Mx-TQ **126** sind mit Eingangsports des Summierers S **128** verbunden, ein Ausgangsport des Summierers **128** ist mit einem Eingangsport des Leistungsverstärkers **130** verbunden, und ein Ausgangsport des Leistungsverstärkers **130**, der das Sendesignal TX liefert, ist mit dem Dämpferelement **160** verbunden.

[0051] Wie weiter aus [Fig. 1](#) ersichtlich ist, ist das Dämpferelement **160**, das das Empfangssignal RX liefert, mit einem Eingangsport des rauscharmen Verstärkers **142** verbunden, ein Ausgangsport des rauscharmen Verstärkers **142** ist mit einem Eingangsport des dritten Mischers Mx-RI **148** verbunden und mit einem Eingangsport des vierten Mischers Mx-RQ **150**, ein Ausgangsport der zweiten Phasenregelschleife PLL (phase locked loop) **144** ist mit einem Eingangsport des zweiten Phasenschiebers **146** verbunden, ein 0°-Ausgangsport der Phase des zweiten Phasenschiebers **146** ist mit einem anderen Eingangsport des dritten Mischers **148** verbunden, ein 90°-Ausgangsport des zweiten Phasenschiebers **146** ist mit einem weiteren Eingangsport des vierten Mischers **150** verbunden, ein Ausgangsport des dritten Mischers **148** ist mit einem Eingangsport des dritten Tiefpassfilters **152** verbunden, ein Ausgangsport des vierten Mischers **150** ist mit einem Eingangsport des vierten Tiefpassfilters LP_RQ **154** verbunden, ein Ausgangsport des dritten Tiefpassfilters **152** ist mit dem ersten Analog-zu-Digital-Wandler ADC_I **156** verbunden, und ein Ausgangsport des vierten Tiefpassfilters LP_RQ **154** ist mit einem Eingangsport des zweiten Analog-zu-Digital-Wandlers ADC_Q **158** verbunden.

[0052] Zusätzlich dazu sind in [Fig. 1](#) vier exemplarische Eingabeknoten gezeigt, siehe Zahlen 1 bis 4 in gepunkteten Kreisen in [Fig. 1](#), die auch als erster bis vierter Eingabeknoten oder 1" bis 4" innerhalb der Beschreibung bezeichnet werden. Die acht Messknoten, die in [Fig. 1](#) gezeigt sind, siehe Zahlen 1 bis 8 in gestrichelten Quadraten, werden in der nachfolgenden Beschreibung auch als erster bis achter Messknoten oder 1' bis 8' bezeichnet.

[0053] Die Eingabeknoten 1" und 2" sind Stimulusknoten, wobei die Position des Eingabeknotens 1' der Position des Ausgangsports des ersten Digital-zu-Analog-Wandlers DAC_I **112** entspricht oder allgemeiner der Position des ersten Digital-zu-Analog-Wandlers DAC_I **112** selbst entsprechen kann,

und die Position des zweiten Eingabeknotens 2" entspricht dem Ort des Ausgangsports des zweiten Digital-zu-Analog-Wandlers DAC_Q **114** oder kann allgemeiner ausgedrückt dem Ort des zweiten Digital-zu-Analog-Wandlers DAC_Q **114** selbst entsprechen. Die Eingabeknoten 3" und 4" sind Bedingungsknoten, wobei die Position des Eingabeknotens 3" der Position des ersten Tiefpassfilters **118** entspricht, und wobei die Position des Eingabeknotens 4" der Position des zweiten Tiefpassfilters **120** entspricht.

[0054] Die Position des Messknotens 1' entspricht der Position des Ausgangsports des ersten Mischers **124** oder der Position des ersten Mischers **124** selbst, die Position des zweiten Messknotens 2' entspricht der Position des Ausgangsports des zweiten Mischers oder dem zweiten Mischer **126** selbst, die Position des dritten Messknotens 3' entspricht der Position des Ausgangsports des Leistungsverstärkers **130** oder der Position des Leistungsverstärkers **130** selbst. Die Position des vierten Messknotens 4' entspricht der Position des Ausgangsknotens des rauscharmen Verstärkers **142** oder der Position des rauscharmen Verstärkers **142** selbst, die Position des fünften Messknotens 5' entspricht der Position des Ausgangsports des dritten Mischers **148** oder der Position des Mischers **148** selbst, die Position des sechsten Messknotens 6' entspricht der Position des Ausgangsports des vierten Mischers **150** oder der Position des vierten Mischers **150** selbst, die Position des siebten Messknotens 7' entspricht der Position des Eingabeknotens des ersten Analog-zu-Digital-Wandlers ADC_I **156** oder der Position des ersten Analog-zu-Digital-Wandlers **156** selbst, und die Position des achten Messknotens 8' entspricht der Position des Eingangsports des zweiten Analog-zu-Digital-Wandlers ADC_Q **158** oder der Position des zweiten Analog-zu-Digital-Wandlers **158** selbst.

[0055] Anders ausgedrückt ist jeder der Eingabeknoten und Messknoten einem spezifischen Schaltungselement der Sende-/Empfangsschaltung zugeordnet, z. B. ist der erste Eingabeknoten dem ersten Digital-zu-Analog-Wandler **112** zugeordnet. Somit wird die Lokalisierung eines fehlerhaften Schaltungselements ermöglicht, wie nachfolgend beschrieben wird.

[0056] Nachfolgend werden Ausführungsbeispiele der Erfindung detaillierter basierend auf der Sende-/Empfangsschaltung erklärt, die in [Fig. 1](#) gezeigt ist, und unter weiterer Vereinfachung folgender Annahmen, d. h.: die Digital-zu-Analog-Wandler (DAC) **112**, **114** erzeugen einen 1-MHz- oder 10-MHz-Ton mit einem Amplitudenwert von „1“, die Tiefpassfilter (LP; low pass) leiten immer einen 1-MHz-Ton und leiten einen 10-MHz-Ton nur, wenn sie in einem 20-MHz-Modus sind, der erste Mischer Mx-I **124** und der zweite Mischer Mx-TQ **126** summieren die Amplituden der geleiteten Töne. Anders ausgedrückt wird an dem

ersten und dem zweiten Mischer **124** und **126** die Summe der passierenden bzw. geleiteten Töne mit einer Amplitude mit Werten 0 oder 1 gemessen, wie aus **Fig. 2** ersichtlich ist. An dem Leistungsverstärker PA **130** wird die Summe der Amplituden der Töne, die durch den ersten und den zweiten Mischer **124**, **126** ausgegeben werden, und geteilt durch 2 gemessen. An allen anderen Messknoten werden der Einfachheit halber dieselben Messwerte, wie sie an dem Leistungsverstärker **130** gemessen werden, zurückgegeben.

[0057] **Fig. 2** zeigt die Tabelle für die Signalwerte, die an dem Ausgangsport des ersten Mixers Mx-TI **124** gemessen werden, gemäß der oben erwähnten, vereinfachten Bauelementfunktionalität abhängig von der Testeingabe, angewendet an den ersten Eingabeknoten 1", der ein Stimulusknoten ist, durch den der 1-MHz- oder 10-MHz-Ton, der durch den ersten Digital-zu-Analog-Wandler **112** erzeugt wird, angewendet wird, und für die zwei Knoten des ersten Tiefpassfilters LP-TI **118**, wobei entweder der 2-MHz- oder der 20-MHz-Modus angewendet wird. Wie aus **Fig. 2** ersichtlich ist, wird der 1-MHz-Ton, der an dem ersten Eingabeknoten 1" von dem ersten Digital-zu-Analog-Wandler **112** angelegt wird, ohne Dämpfung weitergeleitet, wohingegen der 10-MHz-Ton ungedämpft geleitet wird, siehe Wert „1“, gemessen an dem ersten Mischer Mx-TI **124**, wenn das erste Tiefpassfilter LP-TI **118** einen 20-MHz-Ton aufweist und vollständig geblockt wird, siehe Wert „0“, gemessen an dem ersten Mischer Mx-TI **124**, wenn das erste Tiefpassfilter LP-TI **118** in dem 2-MHz-Modus ist.

[0058] **Fig. 3** zeigt eine Realisierung der Sende-/Empfangsschaltung gemäß **Fig. 1** als eine „System im Paket“- (SIP-; system in package) Implementierung, die einen ersten oder unteren Chip oder Halbleiterstück mit 50 µm Dicke und einen zweiten Chip oder ein Halbleiterstück, befestigt auf dem ersten Chip bzw. Halbleiterstück, aufweist. Wie aus **Fig. 3** ersichtlich ist, sind alle Schaltungselemente außer dem Leistungsverstärker **130**, dem rauscharmen Verstärker **142** und dem Dämpferelement **160** innerhalb des ersten oder unteren Halbleiterstücks angeordnet, wohingegen die oben erwähnten Elemente innerhalb des zweiten oder oberen Chips angeordnet sind.

[0059] Im Hinblick auf **Fig. 3** wurden 29 Knoten $n = 1 \dots 29$ definiert, um den Ort der Schaltungselemente und der Signalwege, die die Schaltungselemente verbinden, zu beschreiben.

[0060] Somit kann z. B. jeder Signalweg als eines oder eine Mehrzahl von verbundenen, geraden Signalwegelementen beschrieben sein, jeweils definiert durch zwei Knoten $n = 1 \dots 29$. Anders ausgedrückt kann das Signalwegsegment **302** durch Knoten 16 und 17 beschrieben sein, und das Signalweg-

segment **304** durch Knoten 17 und 18. Der Graph der Schaltung kann somit durch seine Signalwegsegmente oder Knotenverbindungen beschrieben sein, z. B. {..., (16, 17) (17, 18)...}.

[0061] Wie weiter aus **Fig. 3** ersichtlich ist, entspricht der erste Eingabeknoten 1" dem Knoten 1, der zweite Eingabeknoten 2" entspricht Knoten 2, der dritte Eingabeknoten 3" entspricht Knoten 3, der vierte Eingabeknoten 4" entspricht Knoten 4, der erste Messknoten 1' entspricht Knoten 5, der zweite Messknoten 2' entspricht Knoten 6, die erste Phasenregelschleife PLL entspricht Knoten 7, der erste Phasenschieber **122** entspricht Knoten 8, der dritte Messknoten 3' entspricht Knoten 13, der vierte Messknoten 4' entspricht Knoten 17, der fünfte Messknoten 5' entspricht Knoten 22, der sechste Messknoten entspricht Knoten 23, der siebte Messknoten 7' entspricht Knoten 26 und der achte Messknoten 8' entspricht Knoten 27. Der Schaltungsteil der Sende-/Empfangsschaltung **100**, der auf dem oberen Halbleiterstück implementiert ist, ist durch eine Aufwärtsverknüpfung, definiert durch Knoten 11 und 12, und eine Abwärtsverknüpfung, definiert durch Knoten 18 und 19, mit dem Schaltungsteil der Sende-/Empfangsschaltung verbunden, der auf dem unteren Halbleiterstück implementiert ist.

[0062] Bestimmte Ausführungsbeispiele der Erfindung weisen das Liefern der folgenden Informationen auf, um die Diagnose oder den Diagnosealgorithmus auszuführen:

- Informationen über die Knoten wie Name und Ort des Knotens, z. B. für Knoten $n = 9$: Name: DAC_I, Ort: 600, 400, 0);
- Informationen über Eingaben ($i = 1 \dots 4$), wie Knotenzahl und Stimulus- oder Bedingungs-Wahlen, z. B. für Eingabe $i = 3$: Knoten: $n = 3$, Wahlen {2 MHz, 20 MHz};
- Informationen über die Messungen ($m = 1 \dots 8$) wie Messindex und Knotenzahl oder Knotenindex, z. B. für $m = 8$: Knoten: 27;
- Informationen über den Graph und die Knotenverbindungen, z. B. {..., (16, 17), (17, 18),...}.

[0063] Im Hinblick auf die Ausführungsbeispiele der vorliegenden Erfindung werden zwei Phasen, nämlich „Bauelementcharakterisierung“ und „Diagnose“ unterschieden. Nachfolgend wird die Phase der „Bauelementcharakterisierung“ beschrieben.

[0064] Während der Bauelementcharakterisierung werden gute Bauelemente, oder anders ausgedrückt Bauelemente ohne oder mit vernachlässigbaren Fehlern, durch K Tests bewertet, wobei jeder Test m Messwerte $Y(k, m)$ ausgibt, mit $k = 1 \dots K$, $m = 1 \dots M$, unter bekannten Kombinationen von I Eingabewahlen $U(k, i)$, mit $i = 1 \dots I$.

[0065] Nachfolgend werden verschiedene Tabellen in der Form von Matrizen gezeigt und beschrieben, z. B. für Testeingabewahlen, Messwerte, Messabweichungen, Korrelationswerte oder Relevanzwerte. Innerhalb dieses Kontexts werden Ausdrücke wie $U(k, i)$ verwendet, um Bezug auf ein einzelnes Element der Matrix oder Tabelle zu nehmen, wobei das einzelne Element bzw. die Position des einzelnen Elements definiert ist durch seinen Zeilen- oder Linienindex k und seinen Spaltenindex i , und U oder $U_{k \times l}$ werden verwendet, um Bezug auf die Tabelle oder Matrix selbst zu nehmen, wobei K die Anzahl von Zeilen oder Linien spezifiziert und l die Anzahl von Spalten der Matrix spezifiziert.

[0066] [Fig. 4](#) zeigt auf der linken Seite eine exemplarische Testeingabematrix U für die Sende-/Empfangsschaltung gemäß [Fig. 1](#) und die weiteren, vereinfachenden Annahmen, die basierend auf [Fig. 1](#) und [Fig. 2](#) beschrieben sind. Die Testeingabematrix U oder $U_{k \times l}$ **410** ist eine $K \times l$ -Matrix, wobei K die Anzahl von Tests ist und l die Anzahl von unterschiedlichen Eingabeknoten ist. Die Testeingabematrix U **410**, die auch als ein Testeingabeszenario oder eine Strategie **410** bezeichnet werden kann, definiert für jeden der vier ($l = 4$) Eingabeknoten und für jeden der 16 ($K = 16$) Tests eine Wahl oder Auswahl der möglichen Wahlen, wie basierend auf [Fig. 2](#) beschrieben ist. Jede Spalte i der Testeingabematrix U **410** spezifiziert die Eingabewahlen, die an einen spezifischen Eingabeknoten während der $K = 16$ Tests angewendet werden. Jede Reihe oder Zeile k der Testeingabematrix U **410** spezifiziert die Eingabewahlen, die an die $l = 4$ Eingabeknoten angewendet werden, für jeden der entsprechenden Tests.

[0067] Auf der rechten Seite von [Fig. 4](#) ist die Messmatrix Y_d **460** gezeigt, die für jeden der $K = 16$ Tests die Signalwerte enthält, die an jedem der $M = 8$ Messknoten gemessen werden. Jede Spalte m der Messmatrix Y_d **460** enthält den Signalwert, der für jeden der $K = 16$ Tests an dem entsprechenden Messknoten m gemessen werden. Jede Zeile k der Messmatrix **460** enthält die Signalwerte, die an den $M = 8$ unterschiedlichen Messknoten für einen spezifischen Test k der $K = 16$ Tests gemessen werden.

[0068] Anders ausgedrückt weist ein Testeingabeszenario oder ein kurzes Eingabeszenario $U_{k \times l}$ **410** K Tests auf, siehe die Zeilen der Matrix, wobei jeder Test k von K Tests für jeden Eingabeknoten i aus l Eingabeknoten eine Eingabewahl j aus J möglichen Eingabewahlen spezifiziert, wobei die Eingabewahl j der Inhalt ist, der in dem Matrixelement enthalten ist, das durch den Testindex und den Eingabeindex i spezifiziert ist.

[0069] Zurück zu der rechten Seite von [Fig. 4](#) können die Messungen oder die Messwerte $Y_d(k, m)$ auch in der Form einer Messtabelle oder Matrix bzw.

Matrize $Y_{K \times M}$ bzw. Y_d **460** dargestellt sein, die für jeden Test k der K Tests, siehe Zeilen der Matrix, den Signalwert aufweist, der an jedem Messknoten m der M Messknoten gemessen wird, siehe Spalten der Matrix. Anders ausgedrückt enthält die Messmatrix Y_d für jeden Test, dargestellt durch den Testindex k (Zeilen der Matrix), und für jeden der Messknoten, dargestellt durch den Messindex m (siehe Spalten der Matrix), den entsprechenden Signalwert, der an dem entsprechenden Messknoten m während des Tests k gemessen wird.

[0070] Für ein leichteres Verständnis sind in [Fig. 4](#) die Testindizes k von 1 bis 16 gezeigt, wobei anstatt der Eingabeindizes i und der Messindizes m die entsprechenden Schaltungselemente gemäß [Fig. 1](#) gezeigt sind.

[0071] Zum Beispiel legen für Test $k = 1$ beide Digital/Analog-Wandler DAC-I und DAC-Q einen 1-MHz-Ton als Eingabeauswahl an, und beide Tiefpassfilter LP-TI und LP-TQ befinden sich in dem oder den legen 2-MHz-Modus als Eingabewahl an, so dass die 1-MHz-Signale ungedämpft durch die zwei Tiefpassfilter passieren. Wenn das getestete Bauelement ein „gutes Bauelement“ ohne Fehler ist, wird an dem Messknoten 1' bzw. Mx-TI und an dem Messknoten 2' bzw. Mx-TQ der Signalwert „1“ gemessen. Der Leistungsverstärker PA misst die Summe der Werte, die durch die zwei Mischer Mx-TI und Mx-TQ geliefert werden geteilt durch 2, so dass an dem Messknoten 3' auch der Wert „1“ gemessen wird. Wie vorangehend beschrieben wurde, geben alle anderen Messungen der Einfachheit halber an den anderen Messknoten denselben Wert aus wie der Leistungsverstärker PA, wie ersichtlich ist für die gemessenen Werte für Test $k = 1$ in der äußersten Zeile der Messmatrix **460**.

[0072] Für Test $k = 2$ wendet der erste Digital/Analog-Wandler DAC-I einen 10-MHz-Ton an, der zweite Digital/Analog-Wandler DAC-Q legt einen 1-MHz-Ton an, und wie bei Test $k = 1$ wenden beide Tiefpassfilter LP-TI und LP-TQ den 2-MHz-Modus als Eingabewahl an. Wie basierend auf [Fig. 2](#) beschrieben wurde, filtert der erste Mischer Mx-TI das 10-MHz-Signal und nur der zweite Mischer Mx-TQ leitet ein Signal mit einem Signalwert von „1“ zu dem Summierer S **128** und dem Leistungsverstärker PA **130** weiter. Der Leistungsverstärker PA misst die Summe der gefilterten Signale geteilt durch 2, so dass an dem dritten Messknoten PA nur ein Wert von 0,5 gemessen wird. Die folgenden Messknoten geben denselben Wert aus, d. h. 0,5, wie der Leistungsverstärker PA.

[0073] Für Test $k = 16$ wenden beide Digital/Analog-Wandler DAC-I und DAC-Q einen 10-MHz-Ton als Eingabeauswahl an und beide Tiefpassfilter LP-TI und LP-TQ wenden den 20-MHz-Modus als Eingabe-

bewahl an, so dass beide 10-MHz-Signale zu den zwei Mischern Mx-TI und Mx-TQ geleitet werden, wobei an jedem Mischer der Signalwert „1“ gemessen wird, und entsprechend auch an dem Leistungsverstärker PA (siehe [Fig. 4](#): 20-MHz-LP-Filter leitet 10-MHz-Ton).

[0074] Die Testeingabewahlen $U(k, i)$ oder das Eingabeszenario U kann definiert werden durch Testingenieure z. B. basierend auf Erfahrung, Kenntnissen über typische, kritische Wege oder Schaltungselemente oder kann automatisch erzeugt werden in dem Sinn einer automatischen Testprogrammerzeugung (ATPG; automatic test program generation). Diese automatisch erzeugten oder ausgewählten Eingabewahlen können auf zufälligen Wahlen basieren, siehe z. B. die Testeingabewahl $U(k, i)$ auf der rechten Seite von [Fig. 5](#), oder können alle möglichen Kombinationen von Testeingabewahlen umfassen, siehe z. B. $U(k, i)$ auf der linken Seite von [Fig. 5](#). Innerhalb der automatischen Erzeugung von Testeingabewahlen können illegale, bedeutungslose oder doppelte Kombinationen entfernt werden.

[0075] Bei weiteren Ausführungsbeispielen kann ein erster Testsatz erzeugt werden durch Testtechniker und kann dann durch einen zweiten Satz aus automatisch erzeugten Eingabewahlen verbessert werden, um ein vollständiges Testszenario auf effiziente Weise zu erzeugen.

[0076] Bei einem nächsten Schritt werden während der Charakterisierung Durchschnittswerte $\mu_Y(k, m)$ und Standardabweichungen $\sigma_Y(k, m)$ gesammelt oder bestimmt für alle $K \cdot M$ Messungen aus einer statistisch ausreichend großen Zahl von Bauelementen D , wobei jedes individuelle Bauelement für die Charakterisierung indiziert ist durch $d = 1 \dots D$.

[0077] [Fig. 6](#) zeigt auf der rechten Seite exemplarische Durchschnittsmessungen $\mu_Y(k, m)$, die in der Form einer Durchschnittsmessmatrix $\mu_{Y, K \times M}$ dargestellt sein können wie die individuellen Messmatrizen $Y_{K \times M}$, wie basierend auf [Fig. 4](#) beschrieben ist. Zu Zwecken der statistischen Bewertung während der Charakterisierung werden diese individuellen Messmatrizen der Bauelemente d auch als $Y_d(k, m)$ bezeichnet.

[0078] Anders ausgedrückt weist die Durchschnittsmessmatrix μ_Y für jeden der K Test, siehe Zeilen der Matrix, einen Durchschnittssignalwert für jeden Messknoten m der M Messknoten auf, erhalten durch Anwenden desselben Eingabeszenarios $U(k, i)$ auf die D guten Bauelemente. Zum Zweck der Einfachheit sei angenommen, dass alle $K \cdot M$ Standardabweichungen $\sigma_Y(k, m) = 0,1$ sind.

[0079] Auf der linken Seite von [Fig. 6](#) ist eine alternative Darstellung des Testeingabeszenarios U **410** aus

[Fig. 4](#) gezeigt, wo anstelle der Text- oder Zahlendarstellung der unterschiedlichen Eingabewahlen ein indexierter oder aufgezählter Typ einer Darstellung verwendet wird. Für die zwei Stimulusknoten DAC-I und DAC-Q stellt der Index $j = 1$ den 1-MHz-Ton dar und der Index $j = 2$ stellt den 10-MHz-Ton dar. Für die Bedingungsknoten LP-TI und LP-TQ stellt der Index $j = 1$ den 2-MHz-Modus dar und der Index $j = 2$ stellt den 20-MHz-Modus dar.

[0080] Der Vorteil einer aufgezählten oder indexierten Darstellung des Eingabeszenarios ist, dass nicht nur individuelle Signalwerte verwendet werden können, sondern auch Wellenformen, wie schneller Sinus, langsamer Sinus oder Rampenfunktionen.

[0081] In der nächsten Phase wird die „Diagnose“ oder das Testen von potentiell fehlerhaften Bauelementen, auch bezeichnet als zu testendes Bauelement (DUT; device under test), während einer Serien- oder Massenherstellung erklärt.

[0082] Nachfolgend sei zu darstellenden Zwecken angenommen, dass ein zu testendes Bauelement (DUT) fehlerhaft ist, insofern, als das erste Tiefpassfilter LP-TI nur die Hälfte der Amplitude des 10-MHz-Tons in einem 20-MHz-Modus weiterleitet. Alle anderen Messungen entsprechen dem angegebenen Durchschnitt oder anders ausgedrückt sind gleich den Durchschnittswerten, die während der Charakterisierung erhalten werden, und bei diesem Beispiel wird keine beliebige Abweichung angenommen.

[0083] In [Fig. 7](#) sind die gemessenen Werte an dem ersten Messknoten Mx-TI für Bauelemente „ohne Fehler“ auf der linken Seite des Kommas gezeigt, wohingegen die gemessenen Werte für das oben erwähnte, fehlerhafte Bauelement mit dem oben erwähnten „Fehler“ auf der rechten Seite des Kommas gezeigt sind. Die gemessenen Werte für „kein Fehler“ entsprechen den Werten, wie in [Fig. 2](#) gezeigt ist. Wie aus [Fig. 7](#) ersichtlich ist, tritt der Fehler nur in dem Fall auf, dass der erste Stimulusknoten DAC-I den 10-MHz-Ton anlegt und der erste Bedingungsknoten LP-TI den 20-MHz-Modus anwendet. Anders ausgedrückt wird der Fehler dadurch sensibilisiert, dass der erste Eingabeknoten DAC-I die zweite Eingabewahl anwendet und ist nur in dem Fall erfassbar, dass der erste Bedingungsknoten LP-TI die zweite Eingabewahl anwendet. Dieser Fehler von -6 dB bei 10 MHz ist auch in [Fig. 1](#) gezeigt (siehe Stern und Bezugszeichen **710** in [Fig. 1](#)).

[0084] Für den Diagnosetest des fehlerhaften Bauelements werden dieselben $K \cdot M$ Messungen $Y(k, m)$ aus der fehlerhaft diagnostizierten Schaltung oder dem zu testenden Bauelement genommen.

[0085] Auf der linken Seite von [Fig. 8](#) ist das Eingabeszenario U , wie es bereits für die Charakterisie-

nung verwendet wurde, gezeigt. Auf der rechten Seite von **Fig. 8** sind die Messungen $Y(k, m)$ des fehlerhaften Bauelements gezeigt. Wie aus der Messmatrix ersichtlich ist, tritt der Fehler für die Tests $k = 6, 8, 14$ und 16 auf. Zum Beispiel legt bei Test $k = 16$ der erste Stimulusknoten DAC-I den 10-MHz-Ton an und der erste Bedingungsknoten LP-TI legt den 20-MHz-Modus an, wobei der 10-MHz-Ton normalerweise ohne Dämpfung passieren sollte. Das fehlerhafte 20-MHz-LP-Filter LP-TI (LP = low-pass = Tiefpass) leitet jedoch nur die Hälfte des 10-MHz-Tons weiter, wie aus dem Messwert an dem ersten Messknoten Mx-TI für den 16. Test gezeigt ist, d. h. $Y(16, 1) = 0,5$. Die Messungen an dem zweiten Messknoten Mx-TQ sind nicht durch den Fehler beeinflusst, da bis zu diesem Messknoten die Signale des ersten Stimulusknotens und des zweiten Stimulusknotens auf unterschiedlichen und unabhängigen Signalwegen sind. Beginnend jedoch bei dem dritten Messknoten werden der Leistungsverstärker PA, das modulierte I-Signal und das Q-Signal summiert und somit verursacht das fehlerhafte erste Tiefpassfilter LP-TI eine Abweichung des gemessenen Signalwerts, aber die Abweichung des Messwerts $Y(16, 3) = 0,75$ von dem korrekten Wert „1“ ist kleiner.

[0086] Bei bestimmten Ausführungsbeispielen werden Messungen und Eingaben vergleichbar gemacht, vor der Korrelation, durch Normieren der Abweichungen von ihren Standardabweichungen. Die Eingaben $U(k, i)$ des Eingabeszenarios werden normiert auf Abweichungen von ihren Standardabweichungen über alle Tests $k(1...K)$. Dieses normierte Eingabeszenario $V_{K \times 1}$ kann vorberechnet sein als Teil der Charakterisierung. $V(k, i)$ sind die normierten Eingabewahlen.

$$\mu_U(i) = \frac{1}{K} \sum_{k=1}^K U(k, i)$$

$$\sigma_U(i) = \frac{1}{K} \sqrt{\sum_{k=1}^K (U(k, i) - \mu_U(i))^2}$$

$$V(k, i) = \frac{U(k, i) - \mu_U(i)}{\sigma_U(i)}$$

[0087] Die Messungen $Y(k, m)$ von $Y_{K \times M}$ des diagnostizierten Bauelements sind normiert auf Abweichungen von ihren Standardabweichungen über alle Bauelemente, $d = 1...D$, die für die Charakterisierung verwendet werden. Der erwartete oder durchschnittliche Messwert $\mu_Y(k, m)$ für jeden Messknoten m unter jedem Test k über alle D Bauelemente und die entsprechende Standardabweichung $\sigma_Y(k, m)$ kann auch vorberechnet werden als Teil der Charakterisierung, wie z. B. $\mu_U, \sigma_U(i)$ und $V(k, i)$.

$$\mu_Y(k, m) = \frac{1}{D} \sum_{d=1}^D Y(k, m)$$

$$\sigma_Y(k, m) = \frac{1}{D} \sqrt{\sum_{d=1}^D (Y_d(k, m) - \mu_Y(k, m))^2}$$

$$Z(k, m) = \frac{Y(k, m) - \mu_Y(k, m)}{\sigma_Y(k, m)}$$

[0088] Anders ausgedrückt enthält die normierte Messwertmatrix $Z_{K \times 1}$ mit ihren normierten Messwerten $Z(k, i)$ für das diagnostizierte Bauelement Abweichungen seiner Messwerte von den entsprechenden Durchschnitts- oder erwarteten Werten, die während der Charakterisierung erhalten werden, wobei die Abweichung zusätzlich normiert ist durch die Standardabweichung, die während der Charakterisierung erhalten wird.

[0089] **Fig. 9** zeigt das normierte Eingabeszenario V mit den normierten Eingabewahlen $V(k, i)$ auf der linken Seite und auf der rechten Seite die normierten Messungen $Z(k, m)$ gemäß den oben erwähnten Gleichungen und Annahmen. Wie deutlich aus der normierten Abweichungsmatrix Z ersichtlich ist, weist die Matrix Z nur für vier Tests $k = 6, 8, 13$ und 16 Abweichungswerte auf, die nicht gleich 0 sind.

[0090] Gemäß der Erfindung ist eine Eingabe i relevant für eine Fehlererfassung bei einer Messung m , wenn die normierten Eingaben $V(k, i)$ stark mit Messabweichungen $Z(k, m)$ korrelieren und wenn die Messabweichungen $Z(k, m)$ groß sind.

[0091] Zum Bestimmen des Relevanzmaßes oder des Relevanzwertes $R(i, m)$, wie in **Fig. 10** gezeigt ist, sind bestimmte Ausführungsbeispiele der Erfindung angepasst, um zuerst die Korrelationswerte $C(i, m)$ zwischen den Eingaben i und Messungen m zu berechnen, über die Diagnostetests $k = 1...K$, gemäß der folgenden Gleichung:

$$C(i, m) = \left| \sum_{k=i}^K V(k, i) \cdot Z(k, m) \right|$$

[0092] Die Fehlerrelevanz $R(i, m)$ der Eingabe i für die Messung m ist proportional zu der Korrelation $C(i, m)$ mit den Spaltensummen von C normiert auf die absolute Summe der Messabweichungen m . Bestimmte Ausführungsbeispiele berechnen die entsprechende Relevanzmatrix $R(i, m)$ wie folgt.

$$R(i, m) = C(i, m) \frac{\sum_{k=1}^K |Z(k, m)|}{\sum_{i=1}^I |C(i, m)|}$$

[0093] In [Fig. 10](#) ist die Relevanzmatrix R für die Messmatrix Y bzw. die normierte Messabweichungsmatrix Z aus [Fig. 9](#) gezeigt. Die Relevanzmatrix wird berechnet basierend auf den oben erwähnten zwei Gleichungen für die Berechnung der normierten Korrelation, die die Fehlerrelevanz der Eingabe i für die Messung m definiert. Wie aus [Fig. 10](#) ersichtlich ist, sind R(1, 1) und R(3, 1) die größten Relevanzwerte. Somit sind die zwei Paare (DAC-I, Mx-TI) und (LP-TI, Mx-TI) am relevantesten. An dem Leistungsverstärker PA und den nachfolgenden Knoten ist die Wirkung nur 50% der Wirkung für die zwei oben erwähnten Kombinationen aus Eingabe und Messung.

[0094] Eine hohe Fehlerrelevanz R(i, m) zeigt eine hohe Wahrscheinlichkeit an, dass ein Fehler nahe an dem Signalweg von Eingabe i zu Messung m oder durch Eingabe i zu Messung m ist.

[0095] Die diagnostizierte Fehlerwahrscheinlichkeit F(x, y, z) an dem Ort (x, y, z), auch bezeichnet als Fehlerortswahrscheinlichkeit F(x, y, z), ist proportional zu der Summe aus gewichteten Distanzen L zu den Signalwegen p von den Eingaben i zur Messung m, jeweils gewichtet mit der Relevanz R(i, m) und geteilt durch die Anzahl von Wegen P(i, m).

$$F(x, y, z) = \sum_{i=1}^I \sum_{m=1}^M \sum_{p=1}^{P(i, m)} \frac{R(i, m) / (P(i, m))}{1 + L((x, y, z) | i, m, p) / L_0}$$

[0096] L((x, y, z), i, m, p) ist die Distanz des Orts (x, y, z) zu dem p-ten Weg von Eingabe i zu Messung m. Die Halb-Abfalllänge (half-decay length) L₀ ist die gewünschte Ortsauflösung.

[0097] In [Fig. 11](#) ist ein Beispiel für einen Weg p und eine Distanz von einem Punkt von diesem Weg gezeigt. Der Signalweg startet von dem Eingabeknoten i = 1 zu dem Messknoten m = 3 und beschrieben durch den Wegindex p = 1. Der Weg p = 1 geht durch die Knoten {1, 3, 5, 9, 11, 12, 13}, die Distanz L von Ort (x, y, z) = 450, 500, 0 ist L((x, y, z), i, m, p) = L((450, 500, 0), 1, 3, 1) = 100, wie in [Fig. 11](#) gezeigt ist.

[0098] Die Fehlerwahrscheinlichkeit F(x, y, z) wird für alle oder zumindest alle relevanten Orte (x, y, z) berechnet und kann z. B. in einer farbcodierten Fehlerortswahrscheinlichkeitsverteilung dargestellt sein, wo unterschiedliche Farben unterschiedlichen Fehlerortswahrscheinlichkeiten zugeordnet sind.

[0099] In [Fig. 12](#) sind auf der rechten Seite anstelle einer farbcodierten Wahrscheinlichkeitsanzeige vier

unterschiedliche Fehlerortswahrscheinlichkeitsbereiche unter Verwendung vier unterschiedlicher Arten von Hash-Werten gezeigt. Wie aus [Fig. 12](#) ersichtlich ist, ist die Fehlerortswahrscheinlichkeit am größten für Bereiche entlang des Signalwegs zwischen dem fehlerhaften dritten Eingabeknoten LP-TI und dem ersten Messknoten Mx-TI, und ist immer noch sehr hoch bis zu dem dritten Messknoten PA.

[0100] Ausführungsbeispiele ermöglichen die Diagnose von verdächtigen Entwurfsstrukturen. Bestimmte Ausführungsbeispiele der vorliegenden Erfindung ermöglichen nicht nur das Testen von bekannten Entwurfsstrukturen, sondern auch das Testen z. B. von fehleranfälligen Entwurfsstrukturen Dritter, wie z. B. Blöcke aus geistigem Eigentum (IP; intellectual property), Verstärkerentwürfe etc.

[0101] Ferner kann eine Sicherungsentwurfsansicht basierend auf dem Layout in Kombination mit der Fehlerwahrscheinlichkeitsansicht, wie in [Fig. 12](#) gezeigt ist, eine menschliche „Korrelation“ unterstützen, um Fehler schneller oder einfacher zu lokalisieren.

[0102] Alternativ kann die Lokalisierung von verdächtigen Entwurfsstrukturen algorithmisch ausgeführt werden durch Korrelieren von (x, y, z) Orten spezifischer Entwurfsstrukturen, z. B. der Schaltungselemente der Sende-/Empfangsschaltung aus [Fig. 1](#) mit Fehlerortswahrscheinlichkeiten (x, y, z). Bereiche ohne Entwurfsstruktur weisen den Wert „0“ auf und Orte mit einer Entwurfsstruktur sind dem Wert „1“ zugeordnet. Somit ist die Fehlerortswahrscheinlichkeitsverteilung, die in [Fig. 12](#) gezeigt ist, auf die Orte tatsächlicher Schaltungselemente fokussiert und schließlich auf Signalwege. Die höchste Korrelation zeigt die verdächtigste Entwurfsstruktur an.

[0103] Ausführungsbeispiele der vorliegenden Erfindung unterstützen die Diagnose von nicht sichtbaren Defekten und benötigen keine physische Fehleranalyse.

[0104] [Fig. 13](#) zeigt ein Ausführungsbeispiel eines rekursiven Suchalgorithmus durch einen gerichteten Graphen für alle Wege von Knoten n1 zu n2, um Wege in einem Graphen zu finden.

[0105] Grundlegend hat der rekursive Suchalgorithmus die folgende Struktur:

1. Beginnen mit n = n1.
2. Alle Knoten mit n verbinden.
3. Stopp, wenn keine Knoten mit n verbunden sind.
4. Wenn nur ein Knoten verbunden ist, weiter bei 2. mit dem verbundenen Knoten.
5. Wenn mehrere Knoten verbunden sind, rekursives Aufnehmen aller verbundenen Teilwege.

[0106] Die Distanz zu einem Weg ist gleich der geringsten Distanz d zu jedem der Leitungssegmente zwischen Folgeknoten von dem Wegstartknoten zu dem Wegendknoten.

[0107] **Fig. 14** zeigt die Distanz d zu einem Leitungssegmentpunkt durch die Knoten x_1 und x_2 .

[0108] **Fig. 15** zeigt einen Suchalgorithmus zum Bestimmen der geringsten Distanz von einem Punkt x und einem n -dimensionalen Raum zu einem Polygon oder einem Liniensegment eines Polygons.

[0109] Bestimmte Ausführungsbeispiele der vorliegenden Erfindung sind implementiert, um einen geraden Signalweg von Eingabe i zu Messung m zu verwenden, wenn der Signalweg nicht bekannt ist. Die Annahme eines geraden Signalwegs von Eingabe i zu Messung m ist für viele Hochfrequenzschaltungen vernünftig.

[0110] **Fig. 16** zeigt die Fehlerortswahrscheinlichkeitsverteilung $F(x, y, z)$ für eine Diagnose des fehlerhaften Hochfrequenz-Sende-/Empfangsgeräts gemäß **Fig. 1** und **Fig. 3**, wenn der Signalweg nicht bekannt ist und nicht verwendet werden kann zum Bestimmen der Distanz zu dem Signalweg. Wie vorangehend erwähnt wurde, können in diesem Fall gerade Signalwege zwischen Eingaben i und Messungen m angenommen sein. Die Distanz $L((x, y, z), i, m, p)$ und ihre Fehlerortswahrscheinlichkeit $F(x, y, z)$ werden berechnet basierend auf diesen geraden Signalwegen. Wie in **Fig. 16** gezeigt ist, ist die Fehlerortswahrscheinlichkeit $F(x, y, z)$ am höchsten für den fehlerhaften dritten Eingabeknoten LP-TI. Dies beweist, dass auch ohne Kenntnis des Signalgraphen hilfreiche Hinweise des Fehlerorts durch Ausführungsbeispiele der vorliegenden Erfindung erhalten werden können.

[0111] **Fig. 17** zeigt ein Flussdiagramm eines Ausführungsbeispiels eines Verfahrens zum Bestimmen von Relevanzwerten $R(i, m)$, wobei jeder Relevanzwert eine Relevanz einer Kombination (i, m) eines Eingabeknotens i einer ersten Anzahl I aus Eingabeknoten mit einem Messknoten m einer zweiten Anzahl M aus Messknoten darstellt für eine Erfassung eines Fehlers auf einem Chip. Das Verfahren weist folgende Schritte auf.

[0112] Anwenden **1710** einer dritten Anzahl K aus Tests an die erste Anzahl I aus Eingabeknoten, wobei jeder Test k der dritten Anzahl K aus Tests für jeden Eingabeknoten i eine Testeingabewahl $U(k, i)$ definiert.

[0113] Messen **1720** für jeden Test k der dritten Mehrzahl K aus Tests eines Signals an jedem der zweiten Anzahl M aus Messknoten, um für jeden Messknoten m der zweiten Anzahl M aus Messkno-

ten eine dritte Anzahl K aus Messwerten zu erhalten, wobei jeder Messwert $Y(k, m)$ der K mal M Messwerte dem Test k zugeordnet ist, für den er gemessen wurde, und zu dem Messknoten m , an dem er gemessen wurde.

[0114] Bestimmen **1730** der Relevanzwerte $R(i, m)$, wobei jeder Relevanzwert berechnet wird basierend auf einer Korrelation zwischen der dritten Anzahl K aus Testeingabewahlen $U(k, i)$, die für den Eingabeknoten i der entsprechenden Kombination definiert sind, und der dritten Anzahl K aus Messwerten $Y(k, m)$, die dem Messknoten m der entsprechenden Kombination (i, m) zugeordnet ist.

[0115] Ausführungsbeispiele des Verfahrens können den Schritt **1730** zum Bestimmen des Relevanzwertes implementieren, derart, dass für die Berechnung der Korrelation jeder Messwert $Y(k, m)$ normiert wird in Bezug auf einen Durchschnittswert $\mu_Y(k, m)$, der demselben Test k und demselben Messknoten m zugeordnet ist wie der Messwert $Y(k, m)$.

[0116] Ausführungsbeispiele des Verfahrens können ferner den Schritt **1730** zum Bestimmen des Relevanzwertes implementieren, derart, dass für die Berechnung der Korrelation jeder Messwert $Y(k, m)$ in Bezug auf eine Standardabweichung $\sigma_Y(k, m)$ normiert wird, die demselben Test k und demselben Messknoten m zugeordnet ist wie der Messwert $Y(k, m)$.

[0117] Ausführungsbeispiele des Verfahrens können den Schritt **1730** zum Bestimmen des Relevanzwertes derart implementieren, dass die normierten Messwerte $Z(k, i)$ wie folgt berechnet werden:

$$\mu_Y(k, m) = \frac{1}{D} \sum_{d=1}^D Y_d(k, m)$$

$$\sigma_Y(k, m) = \frac{1}{D} \sqrt{\sum_{d=1}^D (Y_d(k, m) - \mu_Y(k, m))^2}$$

$$Z(k, m) = \frac{Y(k, i) - \mu_Y(k, m)}{\sigma_Y(k, m)}$$

wobei $Y(k, m)$ ein Messwert ist, der einem Test k und einem Messknoten m zugeordnet ist, $\mu_Y(k, m)$ der erwartete oder durchschnittliche Messwert für Test k und Messknoten m über alle D Bauelemente ist, die während der Charakterisierung erhalten werden, wobei $\sigma_Y(k, m)$ die Standardabweichung des Messwerts ist, der für Test k und Messknoten m über alle D Bauelemente erhalten wird, die während der Charakterisierung erhalten werden.

[0118] Alternativ zu dem obigen Beispiel können Ausführungsbeispiele implementiert sein, um die Normierung $Z(k, m)$ auf andere Weisen auszuführen, z. B. kann die Normierung der Messwerte die Berechnung der Differenz zwischen den Messwerten $Y(k, m)$ und ihren entsprechenden Durchschnittswerten $\mu_Y(k, m)$ und/oder die Teilung der Messwerte oder der oben erwähnten Differenzen durch die entsprechenden Standardabweichungen $\sigma_Y(k, m)$ umfassen, um das Korrelationsergebnis zu verbessern, oder kann andere Algorithmen verwenden, um einen Durchschnittswert oder Entsprechungen für die Standardabweichung zu berechnen, um ähnliche Ergebnisse zu erhalten.

[0119] Ausführungsbeispiele des Verfahrens können ferner den Schritt **1730** zum Bestimmen des Relevanzwerts implementieren, derart, dass für die Berechnung der Korrelation jede Testeingabewahl $U(k, i)$ normiert wird im Hinblick auf einen Durchschnittswert $\mu_U(i)$, der demselben Eingabeknoten i zugeordnet ist wie die Testeingabewahl $U(k, i)$, wobei der Durchschnittswert $\mu_U(i)$ ein Durchschnittswert der dritten Mehrzahl K von Testeingabewahlen ist, die dem Eingabeknoten i zugeordnet ist.

[0120] Ausführungsbeispiele des Verfahrens können ferner den Schritt **1730** zum Bestimmen des Relevanzwerts implementieren, derart, dass für die Berechnung der Korrelation jede Testeingabewahl $U(k, i)$ normiert wird im Hinblick auf eine Standardabweichung $\sigma_U(i)$, die demselben Eingabeknoten i zugeordnet ist wie die Testeingabewahl ($U(k, i)$), wobei die Standardabweichung ($\sigma_U(i)$) eine Standardabweichung der dritten Mehrzahl (K) der Testeingabewahlen ist, die dem Eingabeknoten i zugeordnet ist.

[0121] Ausführungsbeispiele des Verfahrens können den Schritt **1730** zum Bestimmen des Relevanzwerts implementieren, derart, dass die normierten Testeingabewahlen $V(k, i)$ wie folgt berechnet werden:

$$\mu_U(i) = \frac{1}{K} \sum_{k=1}^K U(k, i)$$

$$\sigma_U(i) = \frac{1}{K} \sqrt{\sum_{k=1}^K (U(k, i) - \mu_U(i))^2}$$

$$V(k, i) = \frac{U(k, i) - \mu_U(i)}{\sigma_U(i)}$$

wobei $U(k, i)$ die Testeingabewahlen sind, die einem Eingabeknoten i zugeordnet sind, $\mu_U(i)$ der Durchschnittswert über alle K Testeingabewahlen für einen

Eingabeknoten i ist, und wobei $\sigma_U(i)$ die Standardabweichung für den Eingabeknoten i über alle K Eingabewahlen für den Eingabeknoten i ist.

[0122] Bei alternativen Ausführungsbeispielen kann die Normierung $V(k, i)$ der Testeingabewahlen die Berechnung der Differenz zwischen den individuellen Eingabewahlen $U(k, i)$ und den entsprechenden Durchschnittswerten $\mu_U(i)$ umfassen, die berechnet werden über die entsprechende Spalte i der Testeingabematrix U und/oder der Teilung der Testeingabewahlen $U(k, i)$ oder der oben erwähnten Differenzen durch die entsprechenden Standardabweichungen $\sigma_U(i)$, berechnet über die entsprechende Spalte i der Testeingabematrix U , um die Korrelationsergebnisse zu verbessern, oder kann andere Algorithmen verwenden, um einen Durchschnittswert oder Entsprechungen für die Standardabweichung zu berechnen, um ähnliche Ergebnisse zu erhalten.

[0123] Wie oben beschrieben wurde, können die Durchschnittswerte und die Standardabweichungen während der Charakterisierungsphase vorbestimmt oder vorberechnet werden, so dass für die spätere Diagnose diese vorberechneten Werte geliefert werden können, um die Verarbeitungsleistungsanforderungen für die Diagnose zu reduzieren.

[0124] Ausführungsbeispiele des Verfahrens können den Schritt **1730** zum Bestimmen des Relevanzwerts implementieren, derart, dass der Korrelationswert $C(i, m)$, der durch die Korrelation erhalten wird, bereits der Relevanzwert $R(i, m)$ ist, der für eine weitere Diagnose verwendet wird, ohne weitere Berechnungen zu erfordern.

[0125] Ausführungsbeispiele des Verfahrens können den Schritt **1730** zum Bestimmen des Relevanzwerts implementieren, derart, dass die Korrelationswerte $C(i, m)$ wie folgt berechnet werden:

$$C(i, m) = \left| \sum_{k=1}^K V(k, i) \cdot Z(k, m) \right|$$

wobei i der Index der Eingabeknoten ist mit $i = 1 \dots I$, m der Index ist für die Messknoten mit $m = 1 \dots M$, k der Index ist für die Tests mit $k = 1 \dots K$, wobei $V(k, i)$ die Testeingabewahlen $U(k, i)$ sind, normiert auf Durchschnittswerte $\mu_U(i)$ und Standardabweichungen $\sigma_U(i)$, die demselben Eingabeknoten i zugeordnet sind, berechnet über alle K Eingabewahlen für den entsprechenden Eingabeknoten i , und $Z(k, m)$ die Messwerte $Y(k, m)$ sind, normiert auf Durchschnittswerte $\mu_Y(k, m)$ und Standardabweichungen $\sigma_Y(k, m)$, zugeordnet zu demselben Test k und demselben Messknoten m , erhalten über die D Tests während der Charakterisierung.

[0126] Ausführungsbeispiele des Verfahrens können den Schritt **1730** zum Bestimmen des Relevanzwerts implementieren, derart, dass die Fehlerrelevanzwerte $R(i, m)$ wie folgt bestimmt werden:

$$R(i, m) = C(i, m) \frac{\sum_{k=1}^K |Z(k, m)|}{\sum_{i=1}^I |C(i, m)|}$$

wobei i der Index der Eingabeknoten ist mit $i = 1 \dots I$, m der Index ist für die Messknoten mit $m = 1 \dots M$, k der Index ist für die Tests mit $k = 1 \dots K$, wobei $Z(k, m)$ ein Messwert $Y(k, m)$ ist, normiert auf Abweichungen von seiner Standardabweichung über alle K Testeingabewahlen, und wobei $C(i, m)$ der Korrelationswert zwischen Eingabeknoten i und Messknoten m des zu testenden Bauelements ist.

[0127] Anders ausgedrückt können Ausführungsbeispiele angepasst sein, um eine Fehlerrelevanz $R(i, m)$ von jedem Eingabeknoten i zu jeder Messung m zu berechnen, die proportional ist zu dem Korrelationswert $C(i, m)$, wobei die Spaltensummen der Korrelationsmatrix C auf die absolute Summe von Messabweichungen m normiert sind.

[0128] Alternative Ausführungsbeispiele können angepasst sein, um die Relevanzwerte zu berechnen, allgemein ausgedrückt basierend auf den Korrelationswerten $C(i, m)$ und einem Gewichtungsfaktor, wobei der Gewichtungsfaktor derart berechnet ist, dass er von einer Summe der K Messabweichungen $Z(k, m)$ abhängt, die demselben Messknoten m zugeordnet sind und/oder je höher ist, desto höher die Messabweichungen $Z(k, m)$ sind, die demselben Messknoten m zugeordnet sind, und/oder wobei der Gewichtungsfaktor von einer Summe aus Korrelationswerten $C(i, m)$ abhängt, die demselben Messknoten m zugeordnet sind und/oder niedriger ist, desto höher die Korrelationswerte $C(i, m)$ sind, die demselben Messknoten m zugeordnet sind.

[0129] Wie aus **Fig. 10** ersichtlich ist, können die Relevanzmatrix R oder sogar individuelle Relevanzwerte $R(i, m)$ bereits ausreichend Informationen liefern, um die Lokalisierung des Fehlers zumindest einzugrenzen.

[0130] **Fig. 18** zeigt ein Flussdiagramm eines Ausführungsbeispiels eines Verfahrens zum Bestimmen einer Fehlerwahrscheinlichkeit für einen Ort auf einem Chip. Das Verfahren weist folgende Schritte auf.

[0131] Bestimmen **1810** von Relevanzwerten $R(i, m)$ gemäß einem der Ansprüche 1 bis 11, wobei jeder Relevanzwert eine Relevanz einer Kombination (i, m) eines Eingabeknotens i einer ersten Anzahl I von Eingabeknoten mit einem Messknoten (m) einer zweiten

Anzahl M aus Messknoten für eine Erfassung eines Fehlers auf einem Chip darstellt.

[0132] Bestimmen **1820** für jeden Signalweg p einer vierten Anzahl P aus Signalwegen des Chips, einer Distanz $L((x, y, z), i, m, p)$ von dem Ort (x, y, z) zu jedem der vierten Anzahl P von Signalwegen des Chips, wobei sich jeder Signalweg (p) von einem Eingabeknoten i der ersten Anzahl I von Eingabeknoten zu einem Messknoten m der zweiten Anzahl M aus Messknoten erstreckt.

[0133] Bestimmen **1830** der Fehlerwahrscheinlichkeit $F(x, y, z)$ basierend auf dem Addieren der Distanzen $L((x, y, z), i, m, p)$ zu jedem der vierten Anzahl P aus Wegen, gewichtet durch den Relevanzwert $R(i, m)$ der Kombination des Eingabeknotens i , von dem sich der entsprechende Weg p erstreckt, und des Messknotens m , zu dem sich der entsprechende Weg p erstreckt.

[0134] Ausführungsbeispiele des Verfahrens können den Schritt **1830** zum Bestimmen der Fehlerwahrscheinlichkeit $F(x, y, z)$ basierend auf dem folgenden Algorithmus implementieren:

$$F(x, y, z) = \sum_{i=1}^I \sum_{m=1}^M \sum_{p=1}^{P(i, m)} \frac{R(i, m) / (P(i, m))}{1 + L((x, y, z), i, m, p) / L_0}$$

wobei (x, y, z) der Ort ist, wobei i der Index der Eingabeknoten ist mit $i = 1 \dots I$, m der Index für die Messknoten ist mit $m = 1 \dots M$, wobei $P(i, m)$ die Anzahl von Wegen von dem Eingabeknoten i zu dem Messknoten m ist, wobei $R(i, m)$ der Relevanzwert der Kombination (i, m) eines Eingabeknotens i mit einem Messknoten m ist, wobei $L((x, y, z), i, m, p)$ die Distanz von dem Ort (x, y, z) zu dem p -ten Weg von dem Eingabeknoten zu dem Messknoten m ist, und wobei L_0 die Halb-Abfalllänge ist, die die Ortsauflösung definiert.

[0135] Alternative Ausführungsbeispiele der Erfindung können implementiert sein, um unterschiedliche Algorithmen zu verwenden als diejenigen, die oben beschrieben sind, oder angepasste Algorithmen, z. B. den Algorithmus **A**, der oben beschrieben wurde ohne die Halb-Abfalllänge L_0 und/oder ohne die Zahlenwege $P(i, m)$ zwischen derselben Kombination aus Eingabeknoten und Messknoten.

[0136] Falls die Position der Signalwege bekannt ist, können Ausführungsbeispiele der Erfindung angepasst sein, um diese Informationen zur Berechnung der Distanz L zu verwenden, wodurch Positionsinformationen für jeden Eingabeknoten i geliefert werden. Die Position der Signalwege kann z. B. definiert werden durch Liefern, für jeden Weg p der vierten Anzahl von Wegen, einer Mehrzahl von weiteren Knoten, um die Position des Wegs p oder des Segments des Wegs zwischen der Position des Eingabeknotens

i und der Position des Messknotens m zu definieren (siehe [Fig. 3](#) und [Fig. 11](#)).

[0137] In dem Fall, dass die Position aller oder einiger der Signalwege zwischen den Schaltungselementen nicht bekannt ist, kann angenommen werden, dass diese Wege p gerade Linien zwischen der Position des Eingabeknotens i und der Position des Messknotens m sind, die den Signalweg definieren.

[0138] Ausführungsbeispiele der Erfindung können implementiert sein, um die Fehlerortswahrscheinlichkeiten für alle oder zumindest alle relevanten Orte auf dem Chip zu berechnen, um eine Fehlerortsverteilung zu erhalten, wie in [Fig. 12](#) und [Fig. 16](#) gezeigt ist. Eine solche farbcodierte Darstellung zusammen z. B. mit einer Darstellung der Positionen der Schaltungselemente liefert eine nützliche Einrichtung zum Lokalisieren von Fehlern oder zumindest fehleranfälligen Regionen eines Chipentwurfs.

[0139] Ausführungsbeispiele der Erfindung können ferner implementiert sein, um zusätzlich die Fehlerwahrscheinlichkeit $F(x, y, z)$ jedes Orts (x, y, z) mit einem Positionsindikator zu korrelieren, wobei der Positionsindikator unterschiedliche Werte für Orte (x, y, z) des Chips aufweist, z. B. „0“ für Positionen ohne Schaltungselement und „1“ für Positionen mit einem Schaltungselement, um somit die Fehlerlokalisierung auf Orte zu konzentrieren, wo Eingabeknoten, Messknoten oder Signalwege positioniert sind.

[0140] Ausführungsbeispiele einer Vorrichtung zum Bestimmen der Relevanzwerte, die eine Relevanz von I Eingabeknoten für eine Fehlererfassung an M Messknoten eines Chips beschreiben, weisen zumindest einen Eingangsport auf zum Empfangen der Messwerte $Y(k, m)$, zum Empfangen der erwarteten oder durchschnittlichen Werte $\mu_Y(k, m)$, der Standardabweichungen $\sigma_Y(k, m)$ und der entsprechenden Eingabewahlen $U(k, i)$ oder der normierten Eingabewahlen $V(k, i)$, und einen Ausgangsport zum Liefern von zumindest der Korrelation $C(i, m)$ oder der Relevanzwerte $R(i, m)$. Weitere Ausführungsbeispiele können zumindest einen zusätzlichen Eingangsport aufweisen zum Anwenden der Testwahlen $U(k, i)$ auf das zu testende Bauelement oder anders ausgedrückt Verbinden der Vorrichtung mit dem zu testenden Bauelement für die Charakterisierung und/oder die Diagnose. Weitere Ausführungsbeispiele der Vorrichtung sind zusätzlich implementiert, um die Fehlerwahrscheinlichkeit eines Orts zu bestimmen, basierend auf bekannten Orten der Eingabeknoten und Messknoten. Wiederum weitere Ausführungsbeispiele der vorliegenden Anmeldung sind implementiert, um die Fehlerwahrscheinlichkeit eines Orts auf dem Chip basierend auf der zusätzlichen Kenntnis über den Ort der Signalgraphen, der die Eingabeknoten mit den Messknoten verbindet, zu bestimmen.

[0141] Ausführungsbeispiele der Vorrichtung, die angepasst sind, um die Fehlerwahrscheinlichkeit zu bestimmen, können ferner einen Ausgangsport zum Liefern der Fehlerwahrscheinlichkeit für einige oder alle der zweidimensionalen Orte (x, y) oder der dreidimensionalen Orte (x, y, z) , wie z. B. in [Fig. 12](#) oder [Fig. 16](#) gezeigt ist, aufweisen.

[0142] Weitere Ausführungsbeispiele der Vorrichtung können ferner implementiert sein, um die Charakterisierung auszuführen durch Ausführen der Tests für D gute oder im Wesentlichen gute Bauelemente, um die erwarteten Werte $\mu_Y(k, m)$ und die Standardabweichungen $\sigma_Y(k, m)$ zu berechnen, und um die Eingabewahlen $U(k, i)$ für normierte Eingabewahlen $V(k, i)$ auszugeben.

[0143] Ausführungsbeispiele der Vorrichtung, die angepasst sind, um die Charakterisierung auszuführen, können Benutzerschnittstellen aufweisen zum Definieren der Eingabeknoten, Messknoten und/oder Eingabewahlen oder zum Auswählen bestimmter Eingabeknoten, Messknoten und/oder Eingabewahlen aus einem verfügbaren Satz aus Eingabeknoten, Messknoten und/oder Eingabewahlen. Weitere Ausführungsbeispiele der Erfindung können angepasst sein, um Eingabeknoten, Messknoten und/oder Eingabewahlen aus einem gegebenen Satz aus Knoten oder Bereichen oder Sätzen aus Eingabewahlen automatisch auszuwählen oder zu wählen.

[0144] Die „Charakterisierung“ kann z. B. durch Entwicklungs- oder Testingenieure einmal ausgeführt werden, wenn das Produkt entworfen wird, z. B. in einer Vor-Reihen-Herstellung, basierend auf dem Testen von echten Bauelementen (keine Simulation). Die „Diagnose“ der Bauelemente kann an den Massenerstellungsorten ausgeführt werden, um die Qualität und den Gewinn der Massenerstellung zu steuern bzw. eine Abweichung oder Unüblichkeit innerhalb der Massenerstellung zu steuern oder eine Entwurfsschwäche zu erkennen durch Testen einer Mehrzahl von fehlerhaften Bauelementen.

[0145] Ausführungsbeispiele der Erfindung können angepasst sein, um z. B. die Fehlerwahrscheinlichkeiten $F(x, y, z)$ für jeden Ort einer Mehrzahl von fehlerhaften Bauelementen zu addieren, um die Erfassung von Entwurfsschwächen des Chips oder seiner Schaltungselemente zu ermöglichen. Ferner können fehleranfällige Bibliothekselemente somit erfasst werden. Wenn z. B. die Fehlerortswahrscheinlichkeit nicht nur für ein spezifisches Tiefpassfilter LP_TI hoch ist, sondern auch für die anderen Tiefpassfilter LP_TQ, LP_RI und LP_RQ, die alle durch dasselbe Bibliothekselement definiert sind, kann ein Testingenieur herleiten, dass dieses Element oder Modul im Allgemeinen fehleranfällig ist.

[0146] Vorteile von Ausführungsbeispielen der vorliegenden Erfindung sind ihre Einfachheit, da keine Simulation benötigt wird, da kein Zugriff auf ein Chip-simulationsmodell benötigt wird und da keine Modellierung der Testwechselwirkung benötigt wird und da keine übermäßigen (Fehler-)Simulationen benötigt werden.

[0147] Ferner besteht kein Bedarf, Fehlermodelle anzunehmen, kein Bedarf, Details über das zu testende Bauelement (DUT) und über den Test zu kennen. Zusätzlich dazu können Testkombinationen automatisch erzeugt werden.

[0148] Der Lösungsansatz der Erfindung ist insofern allgemein, als das zu testende Bauelement als Black Box mit einem Satz aus Eingabewahlen $U(k, i)$ und einem Satz aus Ausgabemessungen $Y(k, i)$ modelliert ist.

[0149] Ausführungsbeispiele der Erfindung liefern eine Einrichtung zum Erhöhen der Hochfrequenzabdeckung bei Wafertests für PGD-Flüsse durch Ermöglichen massiver Mehr-Ort-Wafertests auf Nicht-Hochfrequenz-Ausrüstung und/oder durch Erlauben der Verschiebung von Leistungstests von Hochfrequenztests auf Endtests.

[0150] Ferner ermöglichen Ausführungsbeispiele das Diagnostizieren von Entwurfsschwächen bei Hochfrequenzschaltungen während einer Serienherstellung und/oder das Diagnostizieren nicht sichtbarer Defekte oder Schwächen.

[0151] Obwohl Ausführungsbeispiele der Erfindung beschrieben wurden, wo die Relevanz von I Eingaben bzw. Eingabeknoten zu M Messungen bzw. Messknoten bestimmt wurde, können alternative Ausführungsbeispiele implementiert sein, um eine Relevanz für eine einzelne Eingabe in eine einzelne Messung, die Relevanz von I Eingaben in eine einzelne Messung oder die Relevanz einer einzelnen Eingabe in M Messungen zu bestimmen.

[0152] Abhängig von Implementierungsanforderungen der erfindungsgemäßen Verfahren können die erfindungsgemäßen Verfahren in Hardware oder in Software implementiert sein. Die Implementierung kann ausgeführt werden unter Verwendung eines digitalen Speichermediums, insbesondere einer Platte, CD oder einer DVD mit einem elektronisch lesbaren Steuersignal, das darauf gespeichert ist, das mit einem programmierbaren Computersystem zusammenarbeitet, derart, dass ein Ausführungsbeispiel der erfindungsgemäßen Verfahren ausgeführt wird. Im Allgemeinen ist ein Ausführungsbeispiel der vorliegenden Erfindung daher ein Computerprogrammprodukt mit einem Programmcode, der auf einem maschinenlesbaren Träger gespeichert ist, wobei der Programmcode wirksam ist zum Ausführen der erfin-

dungsgemäßen Verfahren, wenn das Computerprogrammprodukt auf einem Computer ausgeführt wird. Anders ausgedrückt sind Ausführungsbeispiele der erfindungsgemäßen Verfahren daher ein Computerprogramm mit einem Programmcode zum Ausführen von zumindest einem der erfindungsgemäßen Verfahren, wenn das Computerprogramm auf einem Computer ausgeführt wird.

Patentansprüche

1. Verfahren zum Bestimmen von Relevanzwerten ($R(i, m)$), wobei jeder Relevanzwert eine Relevanz einer Kombination $((i, m))$ eines Eingabeknotens (i) einer ersten Anzahl (I) aus Eingabeknoten mit einem Messknoten (m) einer zweiten Anzahl (M) aus Messknoten für eine Erfassung eines Fehlers auf einem Chip darstellt, wobei das Verfahren folgende Schritte aufweist:

Anwenden (**1710**) einer dritten Anzahl (K) von Tests an die erste Anzahl (I) von Eingabeknoten, wobei jeder Test (k) der dritten Anzahl (K) von Tests für jeden Eingabeknoten (i) eine Testeingabewahl ($U(k, i)$) definiert;

Messen (**1720**) für jeden Test (k) der dritten Anzahl (K) aus Tests, eines Signals an jedem der zweiten Anzahl (M) aus Messknoten, um für jeden Messknoten (m) der zweiten Anzahl (M) aus Messknoten eine dritte Anzahl (K) aus Messwerten zu erhalten, wobei jeder Messwert ($Y(k, m)$) dem Test (k), für den er gemessen wurde, und dem Messknoten (m), an dem er gemessen wurde, zugeordnet ist;

Bestimmen (**1730**) der Relevanzwerte ($R(i, m)$), wobei jeder Relevanzwert berechnet wird basierend auf einer Korrelation ($C(i, m)$) zwischen der dritten Anzahl (K) aus Testeingabewahlen ($U(k, i)$), definiert für den Eingabeknoten (i) der entsprechenden Kombination, und der dritten Anzahl (K) aus Messwerten ($Y(k, m)$), zugeordnet zu dem Messknoten (m) der entsprechenden Kombination $((i, m))$.

2. Verfahren gemäß Anspruch 1, bei dem für die Berechnung der Korrelation jeder Messwert ($Y(k, m)$) im Hinblick auf einen Durchschnittswert ($\mu_Y(k, m)$) normiert wird, der demselben Test (k) und demselben Messknoten (m) zugeordnet ist wie der Messwert ($Y(k, m)$).

3. Verfahren gemäß Anspruch 1 oder 2, bei dem für die Berechnung der Korrelation jeder Messwert ($Y(k, m)$) im Hinblick auf eine Standardabweichung ($\sigma_Y(k, m)$) normiert wird, die demselben Test (k) und demselben Messknoten (m) zugeordnet ist wie der Messwert ($Y(k, m)$).

4. Verfahren gemäß einem der Ansprüche 1 bis 3, bei dem für die Berechnung der Korrelation jede Testeingabewahl ($U(k, i)$) normiert wird im Hinblick auf einen Durchschnittswert ($\mu_U(i)$), der demselben Eingabeknoten (i) zugeordnet ist wie die Testeinga-

bewahl ($U(k, i)$), wobei der Durchschnittswert ($\mu_U(i)$) ein Durchschnittswert der dritten Anzahl (K) der Testeingabewahlen ist, die dem Eingabeknoten (i) zugeordnet ist.

5. Verfahren gemäß einem der Ansprüche 1 bis 4, bei dem für die Berechnung der Korrelation jede Testeingabewahl ($U(k, i)$) normiert wird im Hinblick auf eine Standardabweichung ($\sigma_U(i)$), die demselben Eingabeknoten (i) zugeordnet ist wie die Testeingabewahl ($U(k, i)$), wobei die Standardabweichung ($\sigma_U(i)$) eine Standardabweichung der dritten Anzahl (K) von Testeingabewahlen ist, die dem Eingabeknoten (i) zugeordnet sind.

6. Verfahren gemäß einem der Ansprüche 1 bis 5, bei dem die Korrelation ($C(i, m)$) berechnet wird wie folgt:

$$C(i, m) = \left| \sum_{k=1}^K V(k, i) \cdot Z(k, m) \right|$$

wobei i der Index der Eingabeknoten ist mit $i = 1 \dots I$, m der Index ist für die Messknoten mit $m = 1 \dots M$, k der Index ist für die Tests mit $k = 1 \dots K$, wobei $V(k, i)$ die Testeingabewahlen ($U(k, i)$) normiert auf Durchschnittswerte ($\mu_U(i)$) sind und/oder Standardabweichungen ($\sigma_U(i)$), die demselben Eingabeknoten i zugeordnet sind, und $Z(k, m)$ die Messwerte ($Y(k, m)$) sind, normiert auf die Durchschnittswerte ($\mu_Y(k, m)$) und/oder Standardabweichungen ($\sigma_Y(k, m)$), die demselben Test k und demselben Messknoten m zugeordnet sind.

7. Verfahren gemäß Anspruch 6, bei dem die normierten Testeingabewahlen $V(k, i)$ wie folgt berechnet werden:

$$\mu_U(i) = \frac{1}{K} \sum_{k=1}^K U(k, i)$$

$$\sigma_U(i) = \frac{1}{K} \sqrt{\sum_{k=1}^K (U(k, i) - \mu_U(i))^2}$$

$$V(k, i) = \frac{U(k, i) - \mu_U(i)}{\sigma_U(i)}$$

wobei $U(k, i)$ die Testeingabewahlen sind, die einem Eingabeknoten i zugeordnet sind, $\mu_U(i)$ der Durchschnittswert über alle K Testeingabewahlen für einen Eingabeknoten i ist, und wobei $\sigma_U(i)$ die Standardabweichung für den Eingabeknoten i (Eingabewahlen) über alle K Eingabewahlen für den Eingabeknoten i ist.

8. Verfahren gemäß Anspruch 6 oder 7, bei dem die normierten Messwerte $Z(k, m)$ wie folgt berechnet werden:

$$\mu_Y(k, m) = \frac{1}{D} \sum_{d=1}^D Y_d(k, m)$$

$$\sigma_Y(k, m) = \frac{1}{D} \sqrt{\sum_{d=1}^D (Y_d(k, m) - \mu_Y(k, m))^2}$$

$$Z(k, m) = \frac{Y(k, m) - \mu_Y(k, m)}{\sigma_Y(k, m)}$$

wobei $Y(k, m)$ ein Messwert ist, der einem Test k und einem Messknoten m zugeordnet ist, $\mu_Y(k, m)$ der Durchschnittsmesswert für den Test k und den Messknoten m ist, wobei $\sigma_Y(k, m)$ die Standardabweichung des Messwerts ist, der für Test k und Messknoten m erhalten wird.

9. Verfahren gemäß einem der Ansprüche 1 bis 8, bei dem die Relevanzwerte basierend auf den Korrelationswerten ($C(i, m)$) und einem Gewichtungsfaktor berechnet werden,

wobei der Gewichtungsfaktor derart berechnet wird, dass er je höher ist, desto höher die Messabweichungen ($Z(k, m)$) für alle (K) Messungen sind, die demselben Messknoten (m) zugeordnet sind, wobei eine Messabweichung eine Abweichung eines Messwerts ($Y(k, m)$) ist, der einem Test (k) und einem Messknoten (m) zugeordnet ist, von einem Durchschnittswert ($\mu_Y(k, m)$), der demselben Test (k) und demselben Messknoten (m) zugeordnet ist wie der Messwert ($Y(k, m)$), und/oder

wobei der Gewichtungsfaktor je niedriger ist, desto höher die Korrelationswerte ($C(i, m)$) für alle (I) Messungen sind, die demselben Messknoten (m) zugeordnet sind.

10. Verfahren gemäß Anspruch 9, bei dem die Relevanzwerte ($R(i, m)$) wie folgt bestimmt werden:

$$R(i, m) = C(i, m) \frac{\sum_{k=1}^K |Z(k, m)|}{\sum_{i=1}^I |C(i, m)|}$$

wobei i der Index der Eingabeknoten ist mit $i = 1 \dots I$, m der Index ist für die Messknoten mit $m = 1 \dots M$, k der Index ist für die Tests mit $k = 1 \dots K$, wobei $Z(k, m)$ ein Messwert ($Y(k, m)$) normiert auf Abweichungen von seiner Standardabweichung über alle K Testeingabewahlen ist, und wobei $C(i, m)$ der Korrelations-

wert zwischen Eingabeknoten i und Messknoten m ist.

11. Verfahren zum Bestimmen einer Fehlerwahrscheinlichkeit ($F(x, y, z)$) eines Orts $((x, y, z))$ auf einem Chip, das folgende Schritte aufweist:

Bestimmen (**1810**) von Relevanzwerten ($R(i, m)$) gemäß einem der Ansprüche 1 bis 10, wobei jeder Relevanzwert eine Relevanz einer Kombination $((i, m))$ eines Eingabeknotens (i) einer ersten Anzahl (I) aus Eingabeknoten mit einem Messknoten (m) einer zweiten Anzahl (M) aus Messknoten für eine Erfassung eines Fehlers auf einem Chip darstellt;

Bestimmen (**1820**) für jeden Signalweg (p) einer vierten Anzahl (P) aus Signalwegen des Chips, einer Distanz ($L((x, y, z), i, m, p)$) von dem Ort $((x, y, z))$ zu jedem der vierten Anzahl (P) aus Signalwegen des Chips, wobei jeder Signalweg (p) sich von einem Eingabeknoten (i) der ersten Anzahl (I) aus Eingabeknoten zu einem Messknoten (m) der zweiten Anzahl (M) aus Messknoten erstreckt; und

Bestimmen (**1830**) der Fehlerwahrscheinlichkeit ($F(x, y, z)$) basierend auf dem Addieren der Distanzen ($L((x, y, z), i, m, p)$) zu jedem der vierten Anzahl (P) aus Signalwegen, gewichtet durch den Relevanzwert ($R(i, m)$) der Kombination des Eingabeknotens (i), von dem sich der entsprechende Signalweg (p) erstreckt, und des Messknotens (m), zu dem sich der entsprechende Signalweg (p) erstreckt.

12. Verfahren gemäß Anspruch 11, bei dem die Fehlerwahrscheinlichkeit ($F(x, y, z)$) wie folgt bestimmt wird:

$$F(x, y, z) = \sum_{i=1}^I \sum_{m=1}^M \sum_{p=1}^{P(i,m)} \frac{R(i, m) / (P(i, m))}{1 + L((x, y, z), i, m, p) / L_0}$$

wobei (x, y, z) der Ort ist, wobei i der Index der Eingabeknoten ist mit $i = 1 \dots I$, m der Index für die Messknoten ist mit $m = 1 \dots M$, wobei $P(i, m)$ die Anzahl von Signalwegen von dem Eingabeknoten i zu dem Messknoten m ist, wobei $R(i, m)$ der Relevanzwert der Kombination (i, m) eines Eingabeknotens i mit einem Messknoten m ist, wobei $L((x, y, z), i, m, p)$ die Distanz von dem Ort (x, y, z) zu dem p -ten Signalweg von einem Eingabeknoten i zu der Messung m ist, und wobei L_0 die Halb-Abfalllänge ist, die die Ortsauflösung definiert, wobei p den Wegindex bezeichnet.

13. Verfahren gemäß Anspruch 11 oder 12, das ferner folgenden Schritt aufweist:

Liefere von Positionsinformationen für jeden Eingabeknoten (i) und jeden Messknoten (m) und Definiere einen Signalwegs (p) der vierten Anzahl von Signalwegen als eine gerade Linie zwischen der Position des Eingabeknotens (i) und der Position des Messknotens (m).

14. Verfahren gemäß Anspruch 11 oder 12, das ferner folgenden Schritt aufweist:

Liefere von Positionsinformationen für jeden Eingabeknoten (i) und jeden Messknoten (m) und Liefere, für einen Signalweg (p) der vierten Anzahl von Signalwegen, einer Mehrzahl von weiteren Knoten, um die Position des Signalwegs (p) zwischen der Position des Eingabeknotens (i) und der Position des Messknotens (m) zu definieren.

15. Verfahren gemäß einem der Ansprüche 11 bis 14, das ferner folgenden Schritt aufweist:

Korrelieren der Fehlerwahrscheinlichkeit ($F(x, y, z)$) mit einem Positionsindikator, wobei der Positionsindikator unterschiedliche Werte für Orte $((x, y, z))$ des Chips aufweist, wobei Eingabeknoten, Messknoten oder Signalwege im Vergleich zu Orten $((x, y, z))$ positioniert sind, wo keine derselben positioniert sind.

16. Verfahren gemäß einem der Ansprüche 11 bis 15, das ferner folgenden Schritt aufweist:

Bestimmen der Fehlerwahrscheinlichkeit ($F(x, y, z)$) einer Mehrzahl von Orten $((x, y, z))$ auf einem Chip, um eine Fehlerwahrscheinlichkeitsbestimmung im Hinblick auf die Mehrzahl von Fehlerwahrscheinlichkeiten zu erhalten.

17. Verfahren gemäß einem der Ansprüche 11 bis 16, das ferner folgende Schritte aufweist:

Anwenden, an jeden Chip (d) einer fünften Anzahl (D) aus Chips, der dritten Anzahl (K) von Tests an der ersten Anzahl (I) aus Eingabeknoten, wobei jeder Test (k) der dritten Anzahl (K) aus Tests für jeden Eingabeknoten (i) eine Testeingabewahl ($U(k, i)$) definiert;

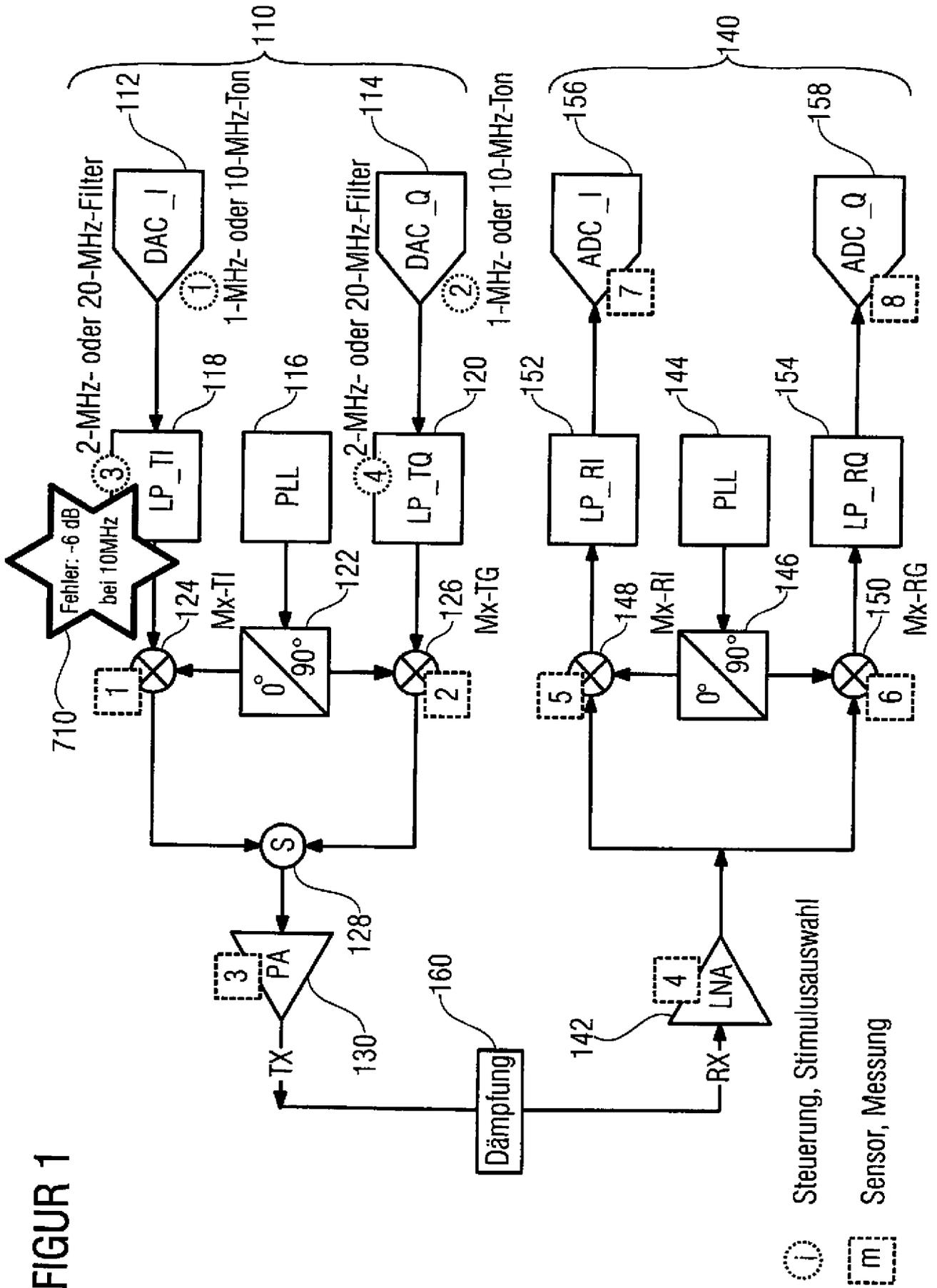
Messen, für jeden Test (k) der dritten Anzahl (K) aus Tests, eines Signals an jedem der zweiten Anzahl (M) aus Messknoten, um für jeden Messknoten (m) der zweiten Anzahl (M) aus Messknoten eine dritte Anzahl (K) aus Messwerten zu erhalten, wobei jeder Messwert ($Y(k, m)$) der dritten Anzahl (K) aus Messwerten dem Test (k), für den er gemessen wurde, und jedem Messknoten (m), an dem er gemessen wurde, zugeordnet ist; und

Bestimmen von Durchschnittswerten ($\mu_Y(k, m)$) und Standardabweichungen ($\sigma_Y(k, m)$), die jedem Test (k) und jeder Testeingabewahl (i) zugeordnet sind, über die fünfte Anzahl (D) aus Messwerten.

18. Computerprogramm mit Programmcode zur Durchführung aller Verfahrensschritte gemäß einem der Ansprüche 1 bis 17, wenn das Programm in einem Computer ausgeführt wird.

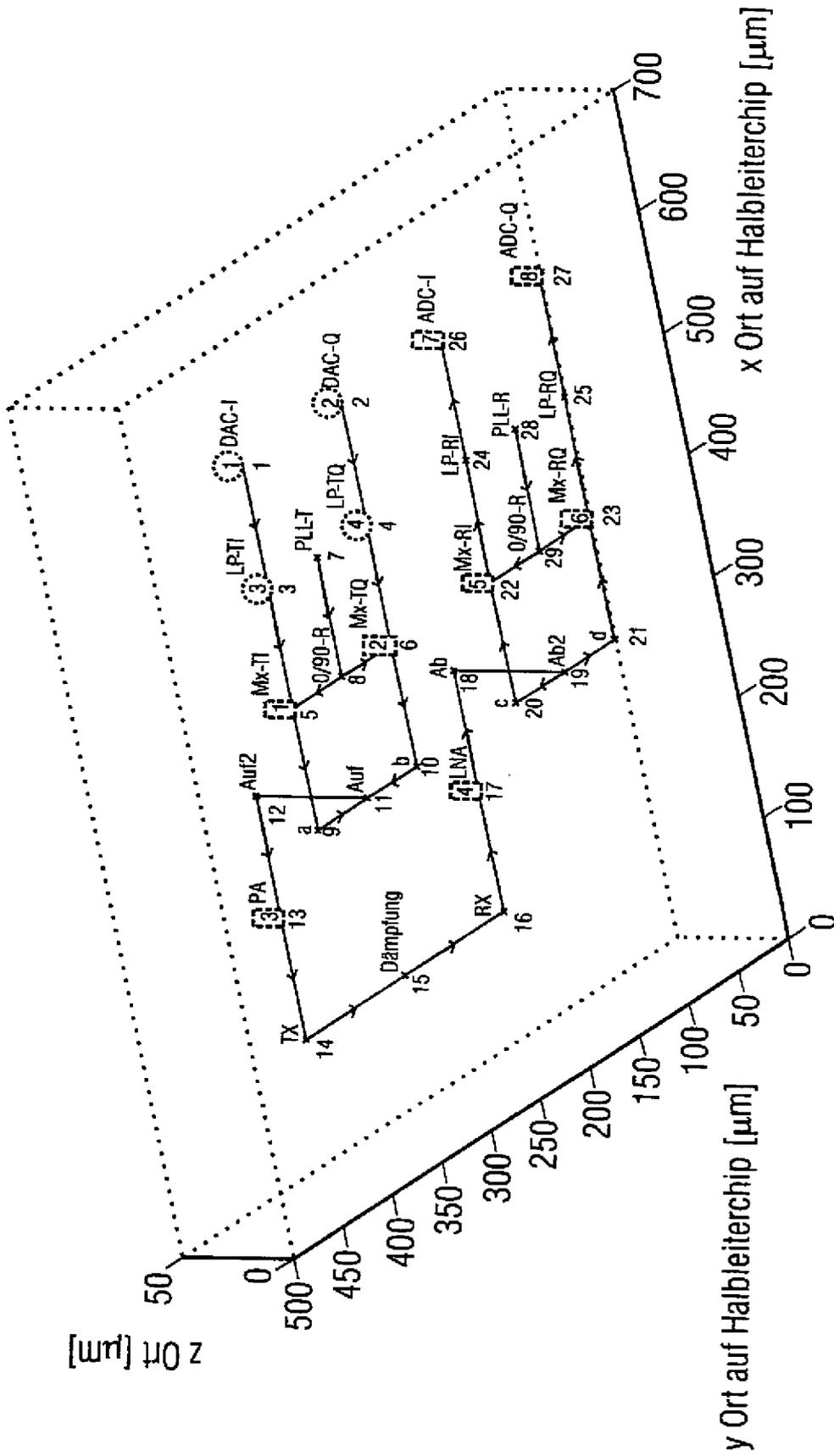
Es folgen 18 Blatt Zeichnungen

Anhängende Zeichnungen



Mess. bei Mx-TI	LP-TI = 2 MHz	LP-TI = 20 MHz
DAC-I = 1 MHz	1	1
DAC-I = 10 MHz	0	1

FIGUR 2



FIGUR 3

$U(k,i)$

Eingaben (l=4)

$Y_d(k,m)$

Messungen (M=8)

460

Tests, (K=16)	DAC-I	DAC-Q	LP-TI	LP-TQ	Mx-TI	Mx-TQ	PA	LNA	Mx-RI	Mx-RQ	ADC-I	ADC-Q
1	1Mhz	1Mhz	2Mhz	2Mhz	1	1	1	1	1	1	1	1
2	10Mhz	1Mhz	2Mhz	2Mhz	0	1	0.5	0.5	0.5	0.5	0.5	0.5
3	1Mhz	10Mhz	2Mhz	2Mhz	1	0	0.5	0.5	0.5	0.5	0.5	0.5
4	10Mhz	10Mhz	2Mhz	2Mhz	0	0	0	0	0	0	0	0
5	1Mhz	1Mhz	20Mhz	2Mhz	1	1	1	1	1	1	1	1
6	10Mhz	1Mhz	20Mhz	2Mhz	1	1	1	1	1	1	1	1
7	1Mhz	10Mhz	20Mhz	2Mhz	1	0	0.5	0.5	0.5	0.5	0.5	0.5
8	10Mhz	10Mhz	20Mhz	2Mhz	1	0	0.5	0.5	0.5	0.5	0.5	0.5
9	1Mhz	1Mhz	2Mhz	20Mhz	1	1	1	1	1	1	1	1
10	10Mhz	1Mhz	2Mhz	20Mhz	0	1	0.5	0.5	0.5	0.5	0.5	0.5
11	1Mhz	10Mhz	2Mhz	20Mhz	1	1	1	1	1	1	1	1
12	10Mhz	10Mhz	2Mhz	20Mhz	0	1	0.5	0.5	0.5	0.5	0.5	0.5
13	1Mhz	1Mhz	20Mhz	20Mhz	1	1	1	1	1	1	1	1
14	10Mhz	1Mhz	20Mhz	20Mhz	1	1	1	1	1	1	1	1
15	1Mhz	10Mhz	20Mhz	20Mhz	1	1	1	1	1	1	1	1
16	10Mhz	10Mhz	20Mhz	20Mhz	1	1	1	1	1	1	1	1

20-MHz-TP-Filter leitet 10-MHz-Ton

FIGUR 4

U(k,i)					U(k,i)				
	DAC-I	DAC-Q	LP-TI	LP-TQ		DAC-I	DAC-Q	LP-TI	LP-TQ
1	1Mhz	1Mhz	2Mhz	2Mhz	1	10Mhz	1Mhz	2Mhz	20Mhz
2	10Mhz	1Mhz	2Mhz	2Mhz	2	10Mhz	10Mhz	2Mhz	20Mhz
3	1Mhz	10Mhz	2Mhz	2Mhz	3	10Mhz	10Mhz	2Mhz	2Mhz
4	10Mhz	10Mhz	2Mhz	2Mhz	4	10Mhz	10Mhz	2Mhz	20Mhz
5	1Mhz	1Mhz	20Mhz	2Mhz	5	10Mhz	10Mhz	2Mhz	20Mhz
6	10Mhz	1Mhz	20Mhz	2Mhz	6	1Mhz	1Mhz	20Mhz	20Mhz
7	1Mhz	10Mhz	20Mhz	2Mhz	7	10Mhz	10Mhz	20Mhz	20Mhz
8	10Mhz	10Mhz	20Mhz	2Mhz	8	1Mhz	1Mhz	2Mhz	20Mhz
9	1Mhz	1Mhz	2Mhz	20Mhz	9	1Mhz	10Mhz	20Mhz	20Mhz
10	10Mhz	1Mhz	2Mhz	20Mhz	10	10Mhz	10Mhz	2Mhz	2Mhz
11	1Mhz	10Mhz	2Mhz	20Mhz	11	1Mhz	10Mhz	20Mhz	2Mhz
12	10Mhz	10Mhz	2Mhz	20Mhz	12	10Mhz	1Mhz	2Mhz	2Mhz
13	1Mhz	1Mhz	20Mhz	20Mhz	13	1Mhz	10Mhz	20Mhz	2Mhz
14	10Mhz	1Mhz	20Mhz	20Mhz	14	1Mhz	10Mhz	20Mhz	2Mhz
15	1Mhz	10Mhz	20Mhz	20Mhz	15	10Mhz	1Mhz	2Mhz	20Mhz
16	10Mhz	10Mhz	20Mhz	20Mhz	16	1Mhz	10Mhz	20Mhz	2Mhz
					17	1Mhz	10Mhz	2Mhz	2Mhz
					18	10Mhz	10Mhz	2Mhz	20Mhz
					19	1Mhz	1Mhz	20Mhz	20Mhz
					20	10Mhz	10Mhz	2Mhz	2Mhz
					21	1Mhz	10Mhz	2Mhz	20Mhz
					22	10Mhz	1Mhz	2Mhz	20Mhz
					23	10Mhz	1Mhz	2Mhz	2Mhz
					24	10Mhz	10Mhz	20Mhz	20Mhz
					25	1Mhz	10Mhz	2Mhz	20Mhz

FIGUR 5

Tests, (K=16)	U(k,i)				Messungen (M=8)								M _v (k,m)
	Eingaben (I=4)												
	DAC-I	DAC-Q	LP-TI	LP-TQ	MX-TI	MX-TQ	PA	LNA	MX-RI	MX-RQ	ADC-I	ADC-Q	
1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1
2	1	1	1	1	0	1	0.5	0.5	0.5	0.5	0.5	0.5	0.5
3	1	2	1	1	1	0	0.5	0.5	0.5	0.5	0.5	0.5	0.5
4	2	2	1	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0
5	1	1	2	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1
6	2	1	2	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1
7	1	2	2	1	1	0	0.5	0.5	0.5	0.5	0.5	0.5	0.5
8	2	2	2	1	1	0	0.5	0.5	0.5	0.5	0.5	0.5	0.5
9	1	1	1	2	1	1	1	1	1	1	1	1	1
10	2	1	1	2	0	1	0.5	0.5	0.5	0.5	0.5	0.5	0.5
11	1	2	1	2	1	1	1	1	1	1	1	1	1
12	2	2	1	2	0	1	0.5	0.5	0.5	0.5	0.5	0.5	0.5
13	1	1	2	2	1	1	1	1	1	1	1	1	1
14	2	1	2	2	1	1	1	1	1	1	1	1	1
15	1	2	2	2	1	1	1	1	1	1	1	1	1
16	2	2	2	2	1	1	1	1	1	1	1	1	1

FIGUR 6

Mess. bei MX-TI kein Fehler, Fehler	LP-TI = 2 MHz	LP-TI = 20 MHz
DAC-I = 1 MHz	1, 1	1, 1
DAC-I = 10 MHz	0, 0	1, 0.5

FIGUR 7

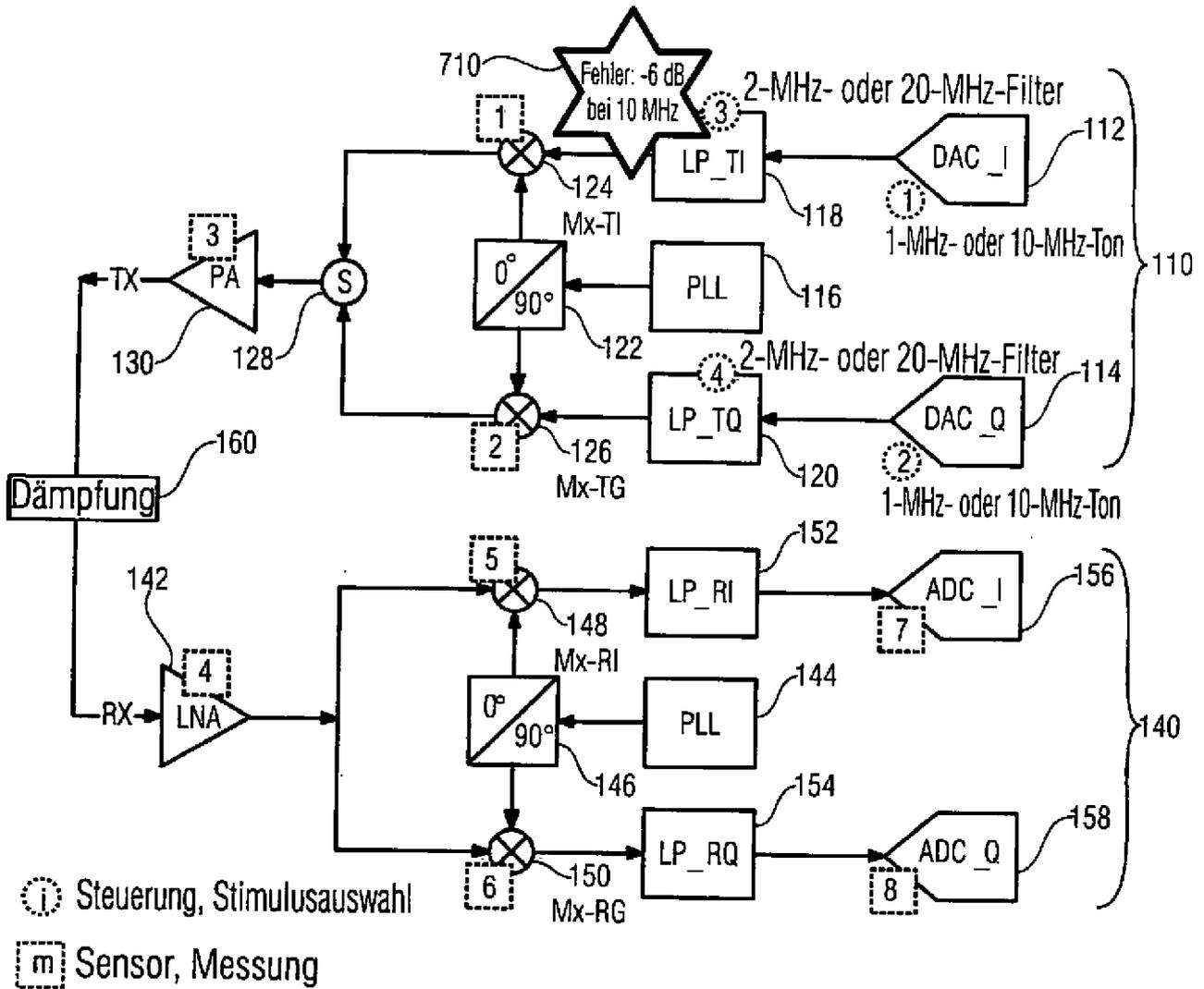
Tests, (K = 16)	Eingaben (l=4)				Messungen (M=8)								Y(k,m)
	DAC-l	DAC-Q	LP-Tl	LP-TQ	Mx-Tl	Mx-TQ	PA	LNA	Mx-Rl	Mx-RQ	ADC-l	ADC-Q	
	1Mhz	1Mhz	2Mhz	2Mhz	1	1	1	1	1	1	1	1	
1	1Mhz	1Mhz	2Mhz	2Mhz	1	1	1	1	1	1	1	1	
2	10Mhz	1Mhz	2Mhz	2Mhz	0	1	0.5	0.5	0.5	0.5	0.5	0.5	
3	1Mhz	10Mhz	2Mhz	2Mhz	1	0	0.5	0.5	0.5	0.5	0.5	0.5	
4	10Mhz	10Mhz	2Mhz	2Mhz	0	0	0	0	0	0	0	0	
5	1Mhz	1Mhz	20Mhz	2Mhz	1	1	1	1	1	1	1	1	
6	10Mhz	1Mhz	20Mhz	2Mhz	0.5	1	0.75	0.75	0.75	0.75	0.75	0.75	
7	1Mhz	10Mhz	20Mhz	2Mhz	1	0	0.5	0.5	0.5	0.5	0.5	0.5	
8	10Mhz	10Mhz	20Mhz	2Mhz	0.5	0	0.25	0.25	0.25	0.25	0.25	0.25	
9	1Mhz	1Mhz	2Mhz	20Mhz	1	1	1	1	1	1	1	1	
10	10Mhz	1Mhz	2Mhz	20Mhz	0	1	0.5	0.5	0.5	0.5	0.5	0.5	
11	1Mhz	10Mhz	2Mhz	20Mhz	1	1	1	1	1	1	1	1	
12	10Mhz	10Mhz	2Mhz	20Mhz	0	1	0.5	0.5	0.5	0.5	0.5	0.5	
13	1Mhz	1Mhz	20Mhz	20Mhz	1	1	1	1	1	1	1	1	
14	10Mhz	1Mhz	20Mhz	20Mhz	0.5	1	0.75	0.75	0.75	0.75	0.75	0.75	
15	1Mhz	10Mhz	20Mhz	20Mhz	1	1	1	1	1	1	1	1	
16	10Mhz	10Mhz	20Mhz	20Mhz	0.5	1	0.75	0.75	0.75	0.75	0.75	0.75	

fehlerhaftes 20-MHz-TP-Filter leitet nur die Hälfte des 10-MHz-Tons

FIGUR 8

Tests, (K=16)	Eingaben (l=4)				Messungen (M=8)							
	V(k,i)				Z(k,m)							
	DAC-I	DAC-Q	LP-TI	LP-IQ	MX-TI	MX-IQ	PA	LNA	MX-RI	MX-RQ	ADC-I	ADC-Q
1	-1	-1	-1	-1	0	0	0	0	0	0	0	0
2	1	-1	-1	-1	0	0	0	0	0	0	0	0
3	-1	1	-1	-1	0	0	0	0	0	0	0	0
4	1	1	-1	-1	0	0	0	0	0	0	0	0
5	-1	-1	1	-1	0	0	0	0	0	0	0	0
6	1	-1	1	-1	-5	0	-2.5	-2.5	-2.5	-2.5	-2.5	-2.5
7	-1	1	1	-1	0	0	0	0	0	0	0	0
8	1	1	1	-1	-5	0	-2.5	-2.5	-2.5	-2.5	-2.5	-2.5
9	-1	-1	-1	1	0	0	0	0	0	0	0	0
10	1	-1	-1	1	0	0	0	0	0	0	0	0
11	-1	1	-1	1	0	0	0	0	0	0	0	0
12	1	1	-1	1	0	0	0	0	0	0	0	0
13	-1	-1	1	1	0	0	0	0	0	0	0	0
14	1	-1	1	1	-5	0	-2.5	-2.5	-2.5	-2.5	-2.5	-2.5
15	-1	1	1	1	0	0	0	0	0	0	0	0
16	1	1	1	1	-5	0	-2.5	-2.5	-2.5	-2.5	-2.5	-2.5

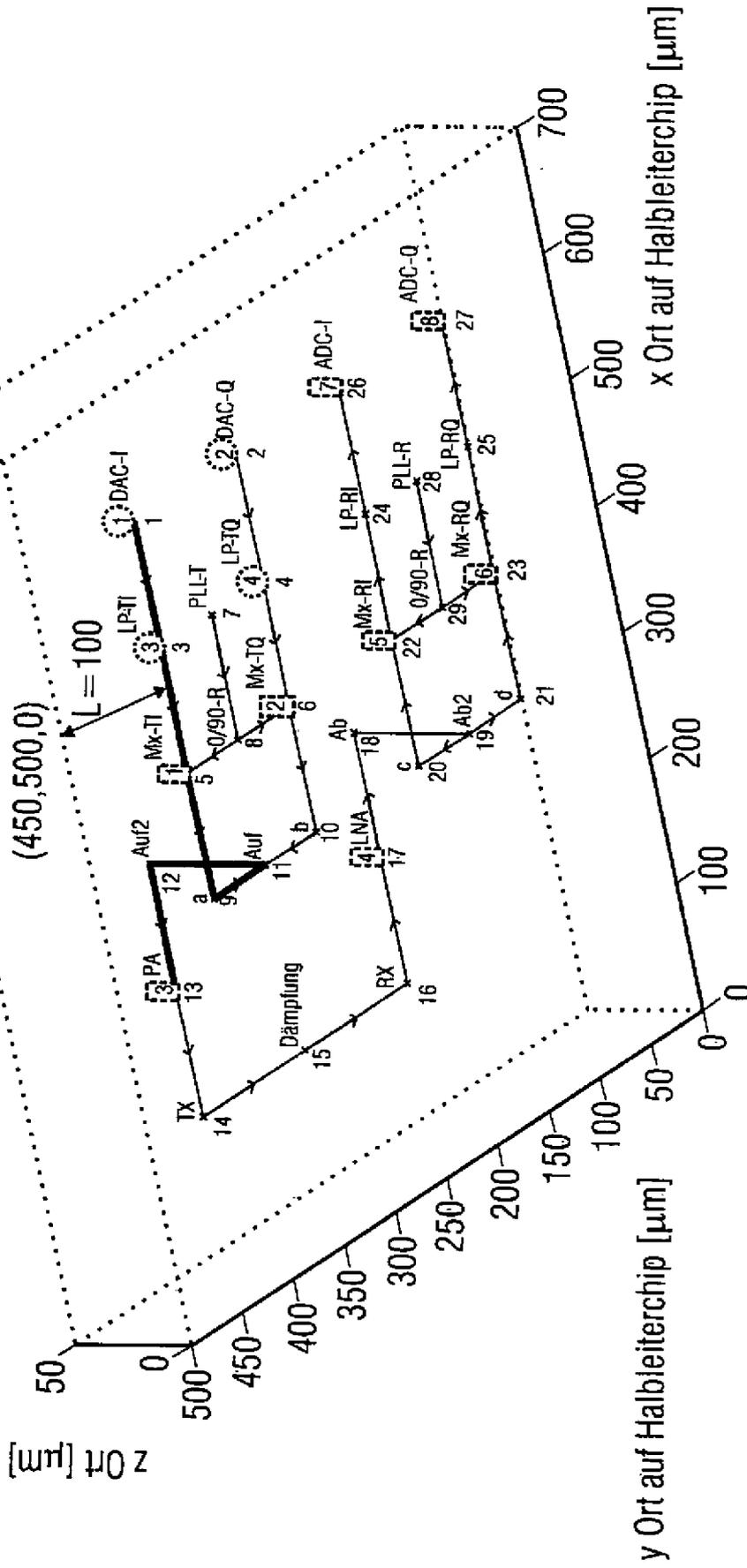
FIGUR 9



Relevanzmatrix

	(1)	Mx-TI	Mx-TQ	PA	LNA	Mx-RI	Mx-RQ	ADC-I	ADC-Q
(1) DAC-I	10	0	5	5	5	5	5	5	5
DAC-Q	0	0	0	0	0	0	0	0	0
(3) LP-TI	10	0	5	5	5	5	5	5	5
LP-TQ	0	0	0	0	0	0	0	0	0

FIGUR 10



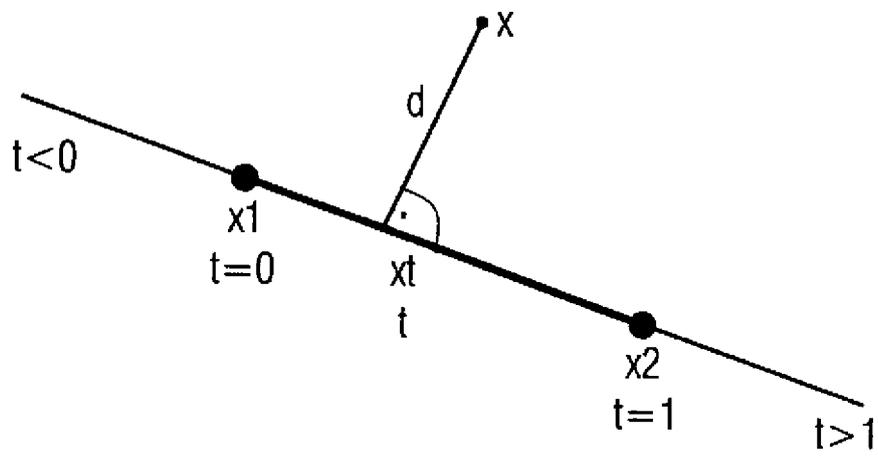
FIGUR 11


```

function Paths = graph_findpaths(E,n1,n2)
%% Finde Wege (Paths) von Knoten (node) 1 zu Knoten 2 in Graph mit Kanten (edges) E.
% E(e,:): Graphkante e
%     E(e,1) = Startknotenzahl von Kante e
%     E(e,2) = Endknotenzahl von Kante e
% Wege{p}(j): Knotenzahl des j-ten Knoten in dem p-ten Weg
Path = n1; n=n1; % Start mit n1
while 1
    eb = find(E(:,1)==n); % Kantenzahlen, die von n abzweigen
    nb = E(eb,2); % Knoten, die von n abgezweigt sind
    switch length(nb)
        case 0 % Kein Knoten, der von n abzweigt, n ist Endknoten
            Paths = []; break
        case 1 % Ein Knoten, der von n abzweigt
            Path = [Path nb];
            n = nb;
            if n==n2, Paths{1} = Path; break, end
        otherwise % Abzweigung in mehrere Wege -> Rekursiver Aufruf
            Paths = [];
            for b = 1; length (nb) % Abzweigungen (Branches)
                subpaths = graph_findpaths(E,nb(b),n2); %, beginnend von nb(b)
                for s = 1:length(subpaths)
                    if ~isempty(subpaths{s}) % Anbringen an „Wege“ und Hinzufügen
                        Paths{end+1} = [Path subpaths{s}];
                    end
                end
            end
            break
        end
    end
end
end

```

FIGUR 13



FIGUR 14

```

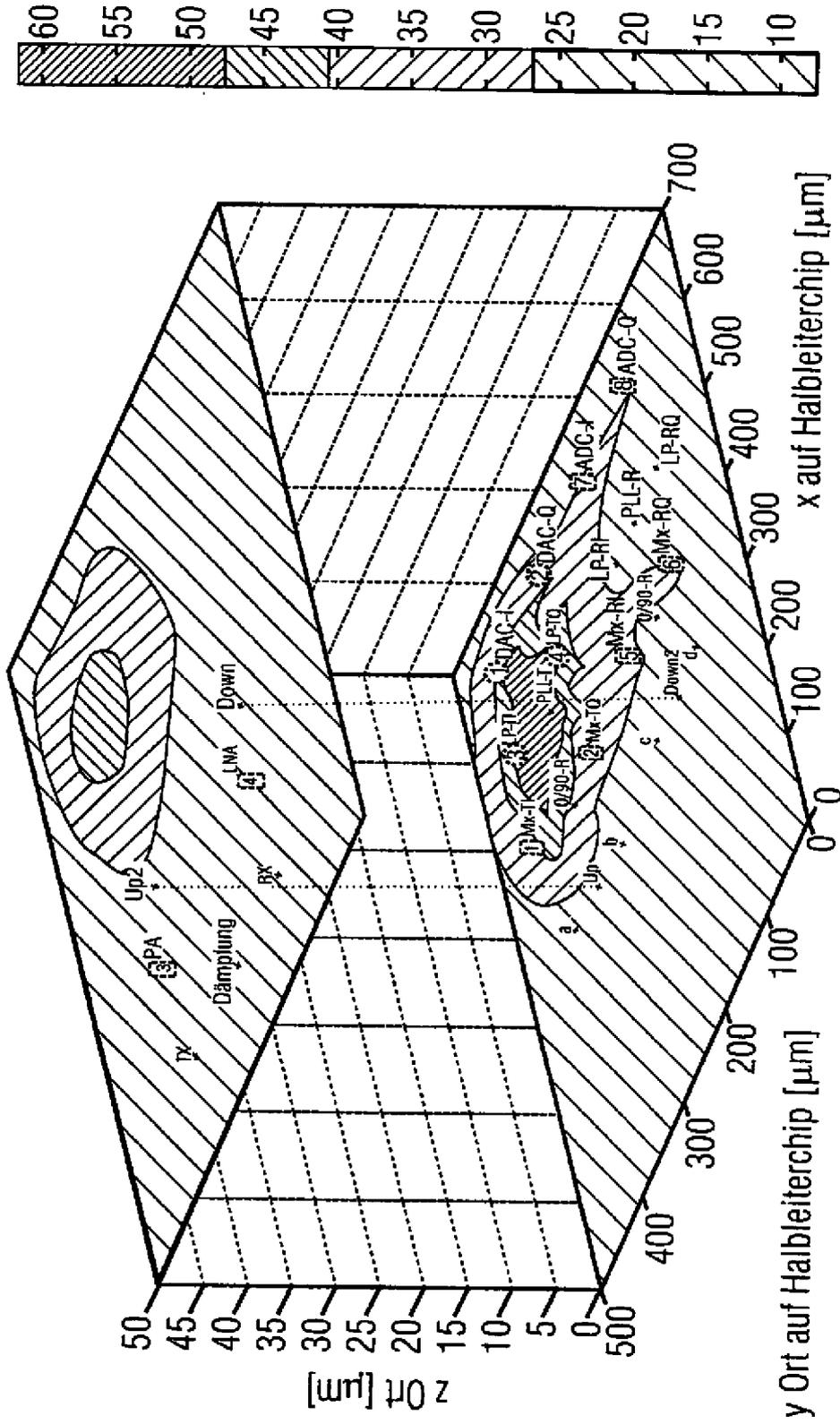
function dist = polygon_ndist(Point,Polygon);
% Gibt nächste Distanz von „Punkt“ zu „Polygon“ aus
%
% Punkt(n) : n-te Koordinate vom Punkt (point) im N-dimensionalen Raum
% Polygon(n,v) : n-te Koordinate des v-ten Polygonscheitels (auch bekannt als Knoten)
%           N x V Matrix, N-dimensionaler Raum, V Scheitelpunkte (vertices)
% dist : Distanz (distance) von „Punkt“ zu „Polygon“
%
% Prüfe Distanzen zu jedem Liniensegment (line segment)
[N,V] = size(Polygon);
for s=1:V-1 % Segment s zwischen Scheitelpunkten s und s+1
    dist_seg(s) = segment_dist(Point,Polygon(:,s),Polygon(:,s+1));
end
% Ausgeben der geringsten Distanz zu jedem der Segmente
dist = min(dist_seg);

function d = segment_dist(x,x1,x2)
% Gibt Distanz (distance) d von Punkt (point) x zu einem Liniensegment (line
    segment) zwischen Punkten x1, x2 aus.
% x, x1, x2 sind Punkte in einem n-dimensionalen Raum.
%
% t ist Parameter von x1 (t=0) to x2 (t=1)
S = (x2-x1)'*(x2-x1); % Länge des Segments
t = -(x1-x)'*(x2-x1)/S;
if t <= 0, d = norm(x-x1); % vor x1, x1 ist am nächsten
else if t >= 1, d = norm(x-x2); % nach x2, x2 ist am nächsten
else xt = x1 + t*(x2-x1); d = norm(x-xt); % Linie ist am nächsten
end

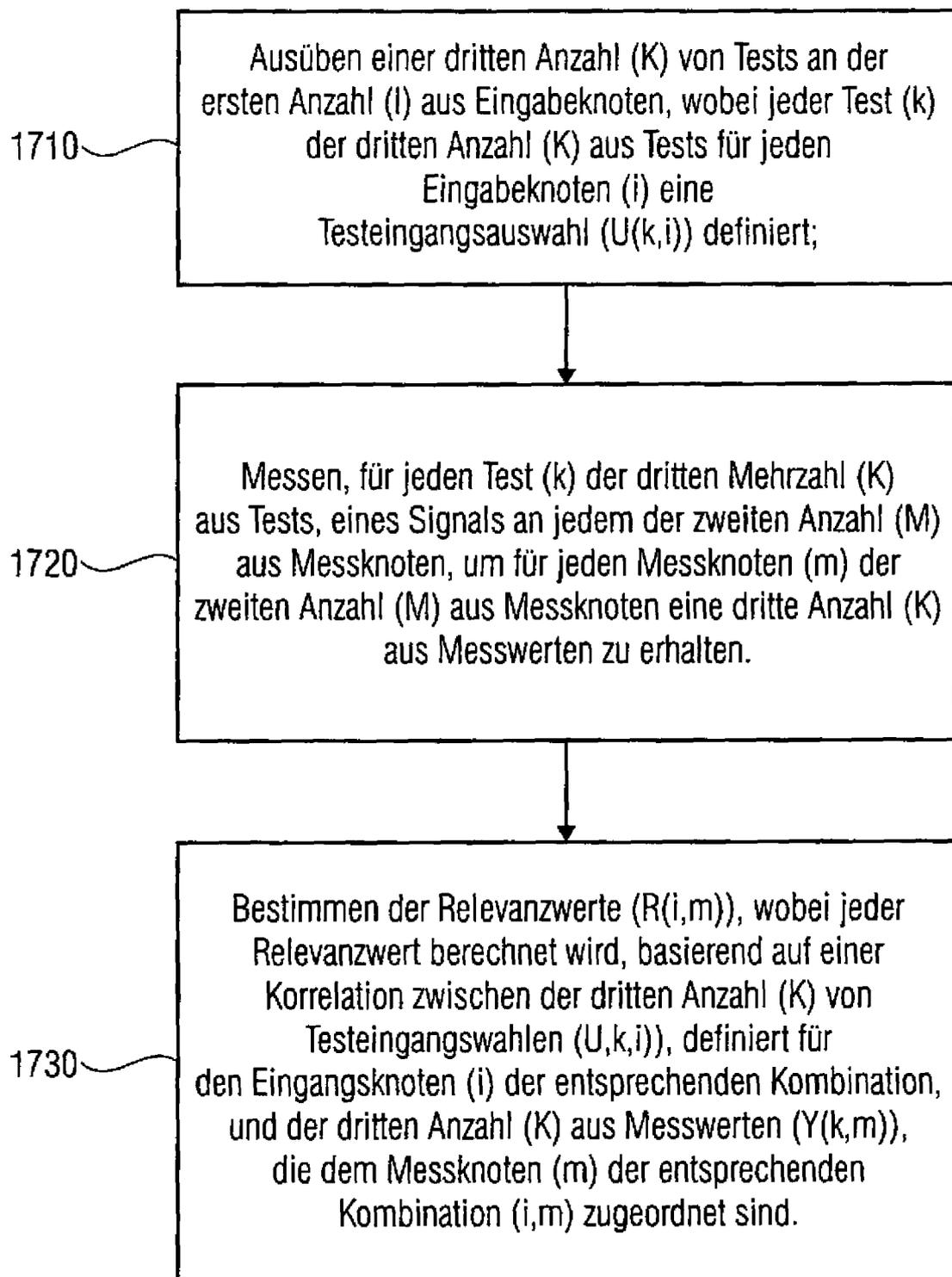
```

FIGUR 15

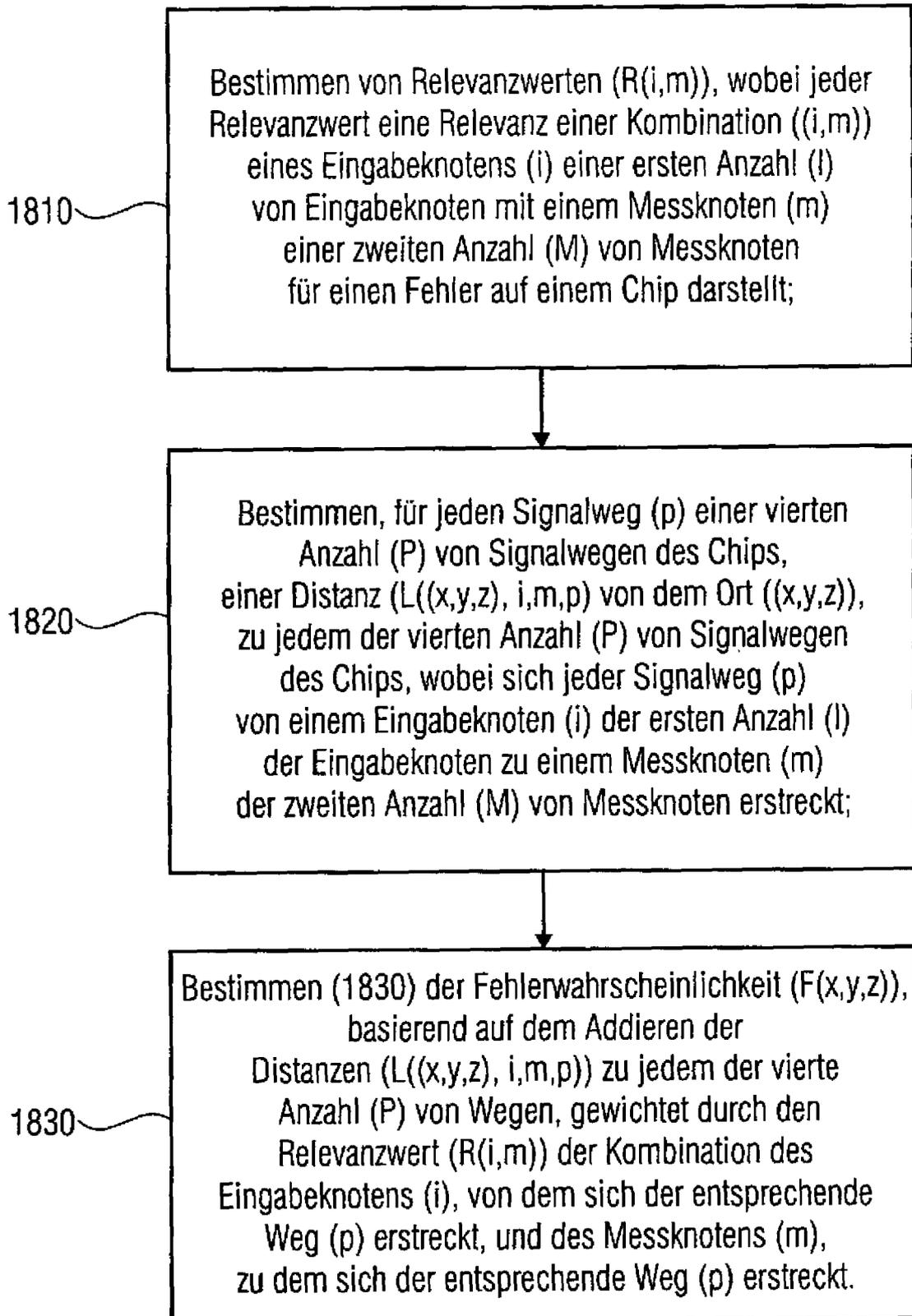
Wahrscheinlichkeit eines Fehlerorts



FIGUR 16



FIGUR 17



FIGUR 18