



(19)  
Bundesrepublik Deutschland  
Deutsches Patent- und Markenamt

(10) **DE 601 23 928 T2** 2007.06.06

(12) **Übersetzung der europäischen Patentschrift**

(97) **EP 1 256 791 B1**

(21) Deutsches Aktenzeichen: **601 23 928.8**

(96) Europäisches Aktenzeichen: **01 129 971.6**

(96) Europäischer Anmeldetag: **17.12.2001**

(97) Erstveröffentlichung durch das EPA: **13.11.2002**

(97) Veröffentlichungstag

der Patenterteilung beim EPA: **18.10.2006**

(47) Veröffentlichungstag im Patentblatt: **06.06.2007**

(51) Int Cl.<sup>8</sup>: **G01M 11/00** (2006.01)

**G01B 9/02** (2006.01)

**G01J 3/453** (2006.01)

(30) Unionspriorität:

**851758            08.05.2001        US**

(73) Patentinhaber:

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

(74) Vertreter:

**BOEHMERT & BOEHMERT, 80336 München**

(84) Benannte Vertragsstaaten:

**DE, FR, GB**

(72) Erfinder:

**Szfraniec, Bogdan, Palo Alto, CA 94304, US;  
Baney, Douglas M., Palo Alto, CA 94304, US**

(54) Bezeichnung: **System und Verfahren zur Messung von Gruppenverzögerung basiert auf Nulldurchgängen**

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]** Die Erfindung betrifft im allgemeinen den Bereich der Analyse optischer Netzwerke und insbesondere ein System und Verfahren zum Bestimmen des Phasengangs einer zu prüfenden optischen Komponente.

**HINTERGRUND DER ERFINDUNG**

**[0002]** Ein Analysator für optische Netzwerke ist ein unerlässliches Hilfsmittel bei der Bestimmung optischer Charakteristika von optischen Komponenten, wie beispielsweise Faser-Bragg-Gitter. Zu den optischen Charakteristika, die mit einem Analysator für optische Netzwerke bestimmt werden, können der Reflexionsgrad und die Transmission einer bestimmten zu prüfenden optischen Komponente mit zwei oder mehreren Ports gehören. Die Reflexions- und Transmissionscharakteristika einer zu prüfenden optischen Komponente werden typischerweise durch Messen der Amplitude und Phase optischer Signale bestimmt, die von der Komponente reflektiert oder durch diese transmittiert wurden. Die Phasengangscharakteristika einer zu prüfenden optischen Komponente werden häufig durch Gruppenverzögerung oder Dispersion beschrieben.

**[0003]** Die meisten herkömmlichen Verfahren zum Messen einer Gruppenverzögerung wurden für Analysatoren für optische Netzwerke entwickelt, die nicht kontinuierlich abstimmbare Laserquellen verwenden. Eine nicht kontinuierlich abstimmbare Laserquelle ist eine Laserquelle, die in diskreten Frequenzschritten über einen vorbestimmten Frequenzbereich abstimmbar ist. Ein typisches Verfahren zum Messen einer Gruppenverzögerung besteht darin, einen elektrischen Impuls in Form einer Intensitäts- oder Phasenmodulation an ein optisches Signal anzulegen und dann das elektrische Ansprechverhalten der transmittierten oder reflektierten optischen Signale unter Verwendung einer gut bekannten phasenempfindlichen, elektrischen Erfassungsvorrichtung, wie beispielsweise einem Lock-in-Verstärker oder einem elektrischen Netzwerkanalysator, zu messen. Ein Nachteil dieses Verfahrens ist es, daß die Messung der Gruppenverzögerung indirekt erfolgt, was die Genauigkeit der Messung einschränkt. Zusätzlich ist bei dem Verfahren eine lange Meßzeit erforderlich, um ein genaues Ergebnis zu erhalten. Folglich ist für den effektiven Einsatz des Verfahrens eine langfristige Stabilität des Testaufbaus erforderlich.

**[0004]** Seit kurzem stehen aber kontinuierlich abstimmbare Laserquellen zur Verfügung. Eine kontinuierlich abstimmbare Laserquelle kann kontinuierlich einen vorbestimmten Frequenzbereich ohne Frequenz- oder Modensprünge überstreichen. Die Ver-

fügbarkeit von kontinuierlich abstimmbaren Laserquellen hat die Entwicklung interferometrischer Verfahren zum Messen einer Gruppenverzögerung optischer Komponenten ermöglicht. Die interferometrischen Verfahren basieren auf einer direkten Messung von Phasendifferenzen zwischen interferierenden optischen Signalen. Typischerweise wird zum Messen der Phase und folglich der Gruppenverzögerung die Fourier-Analyse einer Heterodyn-Überlagerungsfrequenz verwendet, die direkt mit der überstreichenden optischen Frequenz einer kontinuierlich abstimmbaren Laserquelle verbunden ist. Ein Nachteil von interferometrischen Verfahren, welche die Fourier-Analyse verwenden, liegt darin, daß die Frequenzüberstreichung einer kontinuierlich abstimmbaren Laserquelle ungleichmäßig ist. Die Ungleichmäßigkeit der Frequenzüberstreichung verursacht eine ähnliche Ungleichmäßigkeit bei der resultierenden Überlagerungsfrequenz, was zu einer Unsicherheit bei der Berechnung der Phase mittels der Fourier-Analyse führt.

**[0005]** Gemäß Glombitza u et al.: „Coherent frequency-domain reflectometry for characterization of single-mode integrated-optical waveguides“, Journal of Lightwave Technology, IEEE, New York, USA, Ausg. 11, Nr. 8, 1. August 1993 (1993-08-01), Seite 1377–1384, ist die kohärente optische Frequenzbereichsreflektometrie ein nützliches Verfahren zum Erfassen, Lokalisieren und Quantifizieren schwach reflektierender Unregelmäßigkeiten bei Einmodenwellenleitern. Die Abstimmung der Quelle muß nicht linear mit der Zeit sein.

**[0006]** Dyer S. D. et al.: „Low-coherence interferometric measurements of fibre Bragg grating dispersion“, Electronics Letters, IEE Stevenage, GB, Ausg. 35, Nr. 17, 19. August 1999 (1999-08-19), Seite 1485–1486 beschreibt niederkohärente interferometrische Messungen der Dispersion in Faser-Bragg-Gittern. Die Gruppenverzögerung als eine Funktion von Wellenlängen wird durch Verarbeitung des Interferogramms mittels Fourier-Transformation erhalten, was innerhalb weniger Minuten zu Ergebnissen führt.

**[0007]** Die US-A-5,978,084 beschreibt ein Verfahren zum Verarbeiten des Ausgangssignals von einem faseroptischen Interferometer, das die folgenden Schritte umfaßt: Entfernen der Gleichstromkomponenten aus dem Ausgangssignal, Filtern von Rauschen aus dem Ausgangssignal und Erzeugen eines gefilterten Signals sowie Vergleichen des gefilterten Signals mit Null und Erzeugen eines quadrierten Signals. Das quadrierte Signal wird synchron demoduliert, um ein Signal zu erzeugen, das eine Basisverschiebung in dem faseroptischen Interferometer angibt.

**[0008]** Die US-A-5,818,585 beschreibt ein Verfah-

ren zum Erhalten präziser Messungen der reflektierten Wellenlängen von mehreren Strängen von Faser-Bragg-Gitterelementen (FBG = Fiber Bragg Grating). Ein Referenzstrang von FBG-Elementen ermöglicht eine langfristige Wellenlängenbestimmung von Sensoren durch adaptive Kalibrierungseinstellungen in Echtzeit, um Nichtlinearitäten in der Antwort des optischen Einzelabtastfilters zu korrigieren.

**[0009]** Angesichts dieses Nachteils besteht Bedarf an einem System und Verfahren zum effizienten und präzisen Messen der Gruppenverzögerung einer zu prüfenden optischen Komponente mittels einer kontinuierlich abstimmbaren Laserquelle.

#### ZUSAMMENFASSUNG DER ERFINDUNG

**[0010]** Die vorliegende Erfindung liefert ein Verfahren zum Messen einer Gruppenverzögerung einer zu prüfenden optischen Komponente nach Anspruch 1 und 2 sowie ein System zum Messen einer Gruppenverzögerung nach Anspruch 3 und 4.

**[0011]** Ein System und Verfahren zum Messen der Gruppenverzögerung einer zu prüfenden optischen Einrichtung (DUT = Device Under Test) verwenden einen Zähler für die optische Frequenz zusammen mit einem Test-Interferometer, um die ungleichmäßigen Frequenzänderungen eines optischen Eingangssignals zu kompensieren, das von dem Test-Interferometer zur Messung der Gruppenverzögerung verwendet wird. Die Gruppenverzögerung der optischen DUT wird unter Verwendung der Nulldurchgänge eines wechselstromgekoppelten Heterodyn-Überlagerungssignals gemessen, das von dem Test-Interferometer aus dem optischen Eingangssignal erzeugt wird. Bei der Messung der Gruppenverzögerung werden Phasenänderungen in dem Heterodyn-Überlagerungssignal, die durch die ungleichmäßigen Frequenzänderungen des optischen Eingangssignals verursacht werden, mittels des Zählers für die optische Frequenz kompensiert. Bei einer exemplarischen Ausführung enthält der Zähler für die optische Frequenz ein Referenz-Interferometer. Bei dieser Ausführung werden die Nulldurchgänge eines wechselstromgekoppelten Referenz-Heterodyn-Überlagerungssignals, das von dem Referenz-Interferometer aus dem optischen Eingangssignal erzeugt wird, zur Erfassung der optischen Frequenz des optischen Eingangssignals und zur Kompensierung der ungleichmäßigen Frequenzänderungen des optischen Eingangssignals verwendet. Die Wellenlängen des Referenz-Heterodyn-Überlagerungssignals werden durch Erfassen der Nulldurchgänge des Referenz-Heterodyn-Überlagerungssignals gemessen.

**[0012]** Ein Verfahren zum Analysieren einer optischen Charakteristik einer zu prüfenden optischen Einrichtung (DUT) gemäß der vorliegenden Erfindung umfaßt die folgenden Schritte: Erzeugen eines

optischen Eingangssignals mit einer zeitlich variierenden Frequenz für ein Test-Interferometer, das die optische DUT enthält, Erfassen von DUT-Nulldurchgängen eines DUT-Heterodyn-Überlagerungssignals von dem Test-Interferometer und Berechnen der Gruppenverzögerung der optischen DUT unter Verwendung einer Ableitung einer DUT-Nulldurchgangsfunktion, die durch die DUT-Nulldurchgänge in Bezug auf Zeit oder optische Frequenz der DUT-Nulldurchgangsfunktion definiert ist. Die berechnete Gruppenverzögerung gibt einen Phasengang der optischen DUT an.

**[0013]** Das Verfahren kann ferner die Schritte des Erfassens der optischen Frequenz des optischen Eingangssignals und des Kompensierens der ungleichmäßigen Frequenzänderungen des optischen Eingangssignals umfassen. Dieser Schritt kann ferner das Erfassen von Nulldurchgängen eines Referenz-Heterodyn-Überlagerungssignals von einem Referenz-Interferometer umfassen.

**[0014]** Bei einer Ausführung umfaßt der Schritt des Berechnens der Gruppenverzögerung das Berechnen der Ableitung der DUT-Nulldurchgangsfunktion in Bezug auf die Zeit, die Informationen über Änderungen in der Phase des DUT-Heterodyn-Überlagerungssignals liefert. Bei dieser Ausführung kann das Verfahren ferner die Schritte des Erfassens von Referenz-Nulldurchgängen eines Referenz-Heterodyn-Überlagerungssignals von einem Referenz-Interferometer und das Berechnen einer Ableitung einer durch die Referenz-Nulldurchgänge definierten Referenz-Nulldurchgangsfunktion in Bezug auf die Zeit umfassen, welche Informationen über Änderungen in der optischen Frequenz des optischen Eingangssignals in der DUT und den Referenz-Interferometern liefert. Bei einer Ausführung wird die Gruppenverzögerung der optischen DUT durch Teilen der Ableitung der DUT-Nulldurchgangsfunktion durch die Ableitung der Referenz-Nulldurchgangsfunktion berechnet.

**[0015]** Bei einer anderen Ausführung umfaßt der Schritt des Berechnens der Gruppenverzögerung das Berechnen der Ableitung der DUT-Nulldurchgangsfunktion in Bezug auf die optische Frequenz. Die Ableitung der DUT-Nulldurchgangsfunktion in Bezug auf die optische Frequenz kann durch Abtasten des DUT-Heterodyn-Überlagerungssignals in gleichen Frequenzinkrementen berechnet werden. Das DUT-Heterodyn-Überlagerungssignal kann in gleichen Frequenzinkrementen unter Verwendung eines Taktsignals abgetastet werden, das durch Erfassen der optischen Frequenz des optischen Eingangssignals abgeleitet werden kann. Bei einer Ausführung werden Referenz-Nulldurchgänge eines Referenz-Interferometers als Taktsignal verwendet, um das DUT-Heterodyn-Überlagerungssignal in gleichen Frequenzinkrementen abzutasten.

**[0016]** Ein System zum Analysieren einer optischen Charakteristik einer optischen DUT gemäß der vorliegenden Erfindung umfaßt eine Lichtquelle, ein Test-Interferometer, einen DUT-Nulldurchgangsdetektor und einen Prozessor. Die Lichtquelle dient dazu, ein optisches Eingangssignal mit einer Frequenz zu erzeugen, die zeitlich variiert. Der DUT-Nulldurchgangsdetektor dient dazu, die DUT-Nulldurchgänge eines DUT-Heterodyn-Überlagerungssignals von dem Test-Interferometer zu erfassen. Der Prozessor dient dazu, eine Ableitung einer durch die DUT-Nulldurchgänge definierten DUT-Nulldurchgangsfunktion in Bezug auf eine Variable der DUT-Nulldurchgangsfunktion zu berechnen. Zusätzlich dient der Prozessor dazu, die Gruppenverzögerung der optischen DUT unter Verwendung der Ableitung der DUT-Nulldurchgangsfunktion zu berechnen.

**[0017]** Das System kann ferner einen Zähler für die optische Frequenz umfassen, der dazu dient, die optische Frequenz des optischen Eingangssignals zu erfassen. Die erfaßte optische Frequenz wird zum Kompensieren von Ungleichmäßigkeiten in der Frequenzüberstreichung der Lichtquelle verwendet. Der Zähler für die optische Frequenz kann ein Referenz-Interferometer umfassen, das ein Referenz-Heterodyn-Überlagerungssignal aus dem optischen Eingangssignal erzeugt. Bei dieser Ausführung kann der Zähler für die optische Frequenz dazu dienen, die Nulldurchgänge des Referenz-Heterodyn-Überlagerungssignals von dem Referenz-Interferometer zu erfassen, um die optische Frequenz des optischen Eingangssignals zu messen.

**[0018]** Bei einer Ausführung dient der Prozessor des Systems dazu, die Ableitung der DUT-Nulldurchgangsfunktion in Bezug auf die Zeit zu berechnen. Bei dieser Ausführung kann das System ferner ein Referenz-Interferometer und einen Referenz-Nulldurchgangsdetektor umfassen. Der Referenz-Nulldurchgangsdetektor dient dazu, die Referenz-Nulldurchgänge des Referenz-Heterodyn-Überlagerungssignals von dem Referenz-Interferometer zu erfassen. Bei dieser Ausführung dient der Prozessor dazu, eine Ableitung einer durch die Referenz-Nulldurchgänge definierten Referenz-Nulldurchgangsfunktion in Bezug auf die Zeit zu berechnen. Die Gruppverzögerung der optischen DUT wird durch Teilen der Ableitung der DUT-Nulldurchgangsfunktion durch die Ableitung der Referenz-Nulldurchgangsfunktion berechnet.

**[0019]** Bei einer weiteren Ausführung dient der Prozessor des Systems dazu, die Ableitung der DUT-Nulldurchgangsfunktion in Bezug auf die optische Frequenz zu berechnen. Bei dieser Ausführung kann das System ferner einen Wellenkonverter umfassen, der mit einem Referenz-Interferometer verbunden ist. Der Wellenkonverter dient dazu, ein Referenz-Überlagerungssignal von dem Referenz-Inter-

ferometer von einer sinusförmigen Wellenform in eine rechteckige Wellenform umzuwandeln. Das umgewandelte Signal wird als Taktsignal verwendet, um das DUT-Heterodyn-Überlagerungssignal in gleichen Frequenzinkrementen abzutasten.

**[0020]** Ein Vorteil der Erfindung ist es, daß die schnelle Fourier-Transformation nicht zur Berechnung der Gruppenverzögerung erforderlich ist, was die Datenverarbeitung vereinfacht, wenn eine nicht gleichmäßige, abstimmbare Laserquelle verwendet wird.

**[0021]** Andere Aspekte und Vorteile der vorliegenden Erfindung werden anhand der folgenden detaillierten Beschreibung im Zusammenhang mit den beiliegenden Zeichnungen deutlich, welche die Prinzipien der Erfindung exemplarisch veranschaulichen.

#### KURZE BESCHREIBUNG DER ZEICHNUNGEN

**[0022]** [Fig. 1](#) ist ein Blockdiagramm eines Analysators für optische Netzwerke gemäß der vorliegenden Erfindung, der dazu dient, den Reflexionsgrad zu messen.

**[0023]** [Fig. 2](#) zeigt die Frequenzüberstreichung einer idealen, kontinuierlich abstimmbaren Laserquelle in Bezug auf die Zeit.

**[0024]** [Fig. 3](#) zeigt das wechselstromgekoppelte Heterodyn-Überlagerungssignal bei Verwendung einer idealen, kontinuierlich abstimmbaren Laserquelle.

**[0025]** [Fig. 4](#) zeigt eine Funktion  $z(t)$ , die durch die Nulldurchgänge des Heterodyn-Überlagerungssignals von [Fig. 3](#) definiert ist.

**[0026]** [Fig. 5](#) zeigt das wechselstromgekoppelte Heterodyn-Überlagerungssignal bei Verwendung einer kontinuierlich abstimmbaren Laserquelle, die Frequenzen ungleichmäßig in Bezug auf die Zeit überstreicht.

**[0027]** [Fig. 6](#) zeigt eine Funktion  $z(t)$ , die durch die Nulldurchgänge des Heterodyn-Überlagerungssignals von [Fig. 5](#) definiert ist.

**[0028]** [Fig. 7](#) ist ein Blockdiagramm eines Verarbeitungsmoduls des Analysators für optische Netzwerke gemäß einer ersten Ausführung der Erfindung.

**[0029]** [Fig. 8](#) ist ein Flußdiagramm des Betriebs des Verarbeitungsmoduls gemäß der ersten Ausführung.

**[0030]** [Fig. 9](#) zeigt eine Funktion  $z_R(t)$ , die durch die Nulldurchgänge eines wechselstromgekoppelten Heterodyn-Überlagerungssignals definiert ist, das von einem Referenz-Interferometer des Analysators für

optische Netzwerke erzeugt wird.

[0031] [Fig. 10](#) zeigt eine Funktion  $z_D(t)$ , die durch die Nulldurchgänge eines wechselstromgekoppelten Heterodyn-Überlagerungssignals definiert ist, das von einem Test-Interferometer des Analysators für optische Netzwerke erzeugt wird.

[0032] [Fig. 11](#) zeigt die Ableitung der Funktion  $z_R(t)$  in Bezug auf die Zeit.

[0033] [Fig. 12](#) zeigt die Ableitung der Funktion  $z_D(t)$  in Bezug auf die Zeit.

[0034] [Fig. 13](#) ist ein Blockdiagramm des Verarbeitungsmoduls des Analysators für optische Netzwerke gemäß einem hardwarebasierten Abtastansatz einer zweiten Ausführung der Erfindung.

[0035] [Fig. 14](#) ist ein Flußdiagramm des Betriebs des Verarbeitungsmoduls gemäß einem hardwarebasierten Abtastansatz der zweiten Ausführung.

[0036] [Fig. 15](#) zeigt eine Eingangswelle für eine Quadrierschaltung des Verarbeitungsmoduls von [Fig. 13](#).

[0037] [Fig. 16](#) zeigt eine Ausgangswelle, die von der Quadrierschaltung des Verarbeitungsmoduls von [Fig. 13](#) erzeugt wird.

[0038] [Fig. 17](#) zeigt eine Funktion  $z_D(v)$ , die durch die Nulldurchgänge des wechselstromgekoppelten Heterodyn-Überlagerungssignals definiert ist, das von dem Test-Interferometer erzeugt wird.

[0039] [Fig. 18](#) ist ein Blockdiagramm des Verarbeitungsmoduls des Analysators für optische Netzwerke gemäß einem hardwarebasierten Abtastansatz der zweiten Ausführung der Erfindung.

[0040] [Fig. 19](#) ist ein Blockdiagramm eines Analysators für optische Netzwerke, der eine abstimmbare Laserquelle mit gleichmäßiger Überstreichung gemäß der vorliegenden Erfindung verwendet.

[0041] [Fig. 20](#) ist ein Flußdiagramm eines Verfahrens zum Analysieren einer optischen Charakteristik einer zu prüfenden optischen Einrichtung gemäß der vorliegenden Erfindung.

#### DETAILLIERTE BESCHREIBUNG

[0042] Mit Bezug auf [Fig. 1](#) ist ein Analysator **102** für optische Netzwerke gemäß der vorliegenden Erfindung gezeigt. Der Analysator mißt die optischen Charakteristika einer zu prüfenden optischen Einrichtung (DUT) **104**. Insbesondere berechnet der Analysator die Gruppenverzögerung der DUT. Die optische DUT kann beispielsweise ein Faser-Bragg-Gitter,

aber auch eine beliebige optische Komponente sein. Der Analysator für optische Netzwerke berechnet die Gruppenverzögerung der optischen DUT effizient unter Verwendung eines interferometrischen Verfahrens basierend auf den Nulldurchgängen eines wechselstromgekoppelten Heterodyn-Überlagerungssignals.

[0043] Der Analysator **102** für optische Netzwerke umfaßt ein Referenz-Interferometer **106**, ein Test-Interferometer **108** und ein Verarbeitungsmodul **110**. Wie es in [Fig. 1](#) gezeigt ist, sind das Referenz-Interferometer und das Test-Interferometer Michelson-Interferometer, welche die Reflexionscharakteristika der optischen DUT **104** messen. Es können jedoch auch andere Arten von Interferometern verwendet werden. Beispielsweise können das Interferometer **106** und das Interferometer **108** Mach-Zehnder-Interferometer sein, welche die Transmissionscharakteristika der optischen DUT messen. Sowohl das Referenz-Interferometer als auch das Test-Interferometer verwenden eine kontinuierlich abstimmbare Laserquelle **112**. Die kontinuierlich abstimmbare Laserquelle dient dazu, ein optisches Signal mit einer Frequenz zu erzeugen, die kontinuierlich einen vorbestimmten Frequenzbereich auf gleichmäßige Weise überstreicht. Das heißt die Rate der Frequenzänderung des optischen Signals, das von der abstimmbaren Laserquelle erzeugt wird, variiert zeitlich bei Überstreichung des vorbestimmten Frequenzbereichs.

[0044] Wie es unten detaillierter beschrieben wird, wird die Gruppenverzögerung der optischen DUT **104** durch Messen der Phasenänderungen eines wechselstromgekoppelten Heterodyn-Überlagerungssignals von dem Test-Interferometer **108** berechnet, die durch die optische DUT verursacht werden. Das Heterodyn-Überlagerungssignal wird aus einem optischen Eingangssignal erzeugt, das von der kontinuierlich abstimmbaren Laserquelle **112** erzeugt wird. Aufgrund der Ungleichmäßigkeiten in der Frequenzüberstreichung der Laserquelle sind die Frequenzänderungen des optischen Eingangssignals ungleichmäßig, was zu unerwünschten Phasenänderungen in dem Heterodyn-Überlagerungssignal führt. Das Referenz-Interferometer **106** und das Verarbeitungsmodul **110** bilden einen Zähler für die optische Frequenz, der die unerwünschten Phasenänderungen mißt, die durch die ungleichmäßigen Frequenzänderungen des optischen Eingangssignals verursacht werden. Das Referenz-Interferometer erzeugt ein Referenz-Heterodyn-Überlagerungssignal, das nur die Phasenänderungen enthält, die durch die Ungleichmäßigkeiten in der Frequenzüberstreichung der abstimmbaren Laserquelle verursacht werden. Dann wird das Referenz-Heterodyn-Überlagerungssignal erfaßt, um die unerwünschten Phasenänderungen zu messen. Da die gemessenen Phasenänderungen beiden Interferometern gemein-

sam sind, können die durch die Ungleichmäßigkeiten in der Frequenzüberstreichung verursachten Verzerrungen unter Verwendung des Referenz-Heterodyn-Überlagerungssignals aus dem Heterodyn-Überlagerungssignal entfernt werden, das von dem Test-Interferometer erzeugt wird.

**[0045]** Das Referenz-Interferometer **106** des Analysators **102** für optische Netzwerke umfaßt die kontinuierlich abstimmbare Laserquelle **112**, einen Optokoppler **114**, Faraday-Spiegel **116** und **118** sowie einen Referenzdetektor **120**. Diese Komponenten des Referenz-Interferometers sind durch Lichtleitfasern **122**, **124**, **126** und **128** miteinander verbunden. Die Lichtleitfaser **122** verbindet die abstimmbare Laserquelle mit dem Optokoppler, während die Lichtleitfaser **126** den Referenzdetektor mit dem Optokoppler verbindet. Gleichermäßen verbindet die Lichtleitfaser **124** den Optokoppler mit dem Faraday-Spiegel **118**, während die Lichtleitfaser **128** den Optokoppler mit dem Faraday-Spiegel **116** verbindet. Der Optokoppler **114** und die Lichtleitfasern **122**, **124**, **126** und **128** sind Einmodenkomponenten (SM-Komponenten; SM = Single Mode). Die Länge der Lichtleitfaser **128** unterscheidet sich von der Länge der Lichtleitfaser **124** um den Abstand  $\Delta L_R$ , der zu einer Verzögerung in dem Referenz-Interferometer führt und seinen freien Spektralbereich (FSR = Free Spectral Range) definiert.

**[0046]** In Betrieb erzeugt die abstimmbare Laserquelle **112** kontinuierlich ein optisches Signal in einem Frequenzüberstreichungsbereich. Beispielsweise kann die abstimmbare Laserquelle einen Wellenlängenbereich von etwa 140 nm ausgehend von einer Wellenlänge von 1470 nm oder 1510 nm überstreichen. Das optische Signal, das von der abstimmbaren Laserquelle erzeugt wird, wird durch die Lichtleitfaser **122** zu dem Optokoppler **114** übertragen. Dann teilt der Optokoppler das optische Signal in zwei optische Signale, so daß die geteilten optischen Signale durch die Lichtleitfaser **128** und **124** an den Faraday-Spiegel **116** bzw. **118** übertragen werden. Das durch die Lichtleitfaser **128** übertragene optische Signal wird von dem Faraday-Spiegel **116** am Ende der Lichtleitfaser **128** zu dem Optokoppler zurück reflektiert. Gleichermäßen wird das durch die Lichtleitfaser **124** übertragene optische Signal von dem Faraday-Spiegel **118** am Ende der Lichtleitfaser **124** zu dem Optokoppler zurück reflektiert. Die Faraday-Spiegel **116** und **118** reflektieren Licht immer in einem orthogonalen Polarisationszustand, wodurch sichergestellt wird, daß die zurückkommenden optischen Signale nahezu den gleichen Polarisationszustand haben.

**[0047]** Aufgrund der zusätzlichen Entfernung, die von dem optischen Signal in der Lichtleitfaser **128** zurückgelegt wird, unterscheidet sich die Frequenz des zurückkommenden optischen Signals in der Lichtleit-

faser **128** zu einem bestimmten Zeitpunkt von der Frequenz des zurückkommenden optischen Signals in der Lichtleitfaser **124**. Gemäß der Darstellung in [Fig. 1](#) ist die Frequenz des zurückkommenden optischen Signals in der Lichtleitfaser **124** mit  $\nu_1$  und die Frequenz des zurückkommenden optischen Signals in der Lichtleitfaser **128** mit  $\nu_2$  angegeben. Unter der Annahme, daß die abstimmbare Laserquelle **112** den vorbestimmten Frequenzbereich mit einer Rate  $\gamma$  überstreicht, können die optischen Frequenzen  $\nu_1$  und  $\nu_2$  wie folgt ausgedrückt werden:

$$\nu_1 = \gamma \cdot t + \nu_0$$

$$\nu_2 = \gamma \cdot t - \gamma \cdot \tau + \nu_0,$$

wobei,  $\nu_0$  die anfängliche optische Frequenz der abstimmbaren Laserquelle und  $\tau$  die Umlaufverzögerung (Round Trip Delay) für die Länge  $\Delta L_R$  der Lichtleitfaser **128** bezeichnet. Die Umlaufverzögerung  $\tau$  ist folgendermaßen definiert:

$$\tau = \frac{2n \cdot \Delta L_R}{c},$$

wobei  $n$  der Brechungsindex der Lichtleitfaser **128** und  $c$  die Geschwindigkeit von Licht im Vakuum ist. Ausgehend von der konstanten Überstreichungsrate  $\gamma$  ist die Frequenzdifferenz zwischen den zurückkommenden optischen Signalen in den Lichtleitfasern **124** und **128**:

$$\Delta \nu = \gamma \cdot \tau.$$

**[0048]** Es wird angenommen, daß das Referenz-Interferometer **106** nicht dispersiv ist, d. h.  $\tau$  hängt nicht von der optischen Frequenz des optischen Signals ab oder  $\tau$  wurde dispersionskompensiert. Die Phasendifferenz zwischen den beiden reflektierten Signalen kann folgendermaßen ausgedrückt werden:

$$\Theta = 2\pi\Delta \nu t + \Theta_0 = 2\pi\gamma\tau t + \Theta_0,$$

wobei  $2\pi\Delta \nu$  die Kreisfrequenzdifferenz ist.

**[0049]** Die zurückkommenden optischen Signale in den Lichtleitfasern **124** und **128** werden an dem Optokoppler **114** miteinander kombiniert und durch die Lichtleitfaser **126** an den Referenzdetektor **120** übertragen. Nach der Kombination interferiert das optische Signal, das von der Lichtleitfaser **124** zurückkommt, mit dem von der Lichtleitfaser **128** zukommenden optischen Signal. Die Intensität der interferierenden optischen Signale, die an dem Referenzdetektor beobachtet wird, kann wie folgt ausgedrückt werden:

$$I = I_0 + I_0 \cos(2\pi\gamma\tau t + \Theta_0),$$

wobei angenommen wird, daß der Polarisationszustand der zurückkommenden optischen Signale



gleich ist. Der Ausdruck  $I_0 \cos(2\pi\gamma t + \Theta_0)$  definiert das Heterodyn-Überlagerungssignal, das von den zurückkommenden optischen Signalen erzeugt wird. An dem Referenzdetektor **120** wird das Heterodyn-Überlagerungssignal durch Entfernen der Gleichstromkomponente des Signals wechselstromgekoppelt. Das wechselstromgekoppelte Heterodyn-Überlagerungssignal wird zur Signalverarbeitung an das Verarbeitungsmodul **110** übertragen.

**[0050]** Das Test-Interferometer **108** des Analysators **102** für optische Netzwerke umfaßt die kontinuierlich abstimmbare Laserquelle **112**, einen Optokoppler **130**, einen Spiegel **132**, die optische DUT **104** und einen DUT Detektor **134**. Ähnlich wie bei dem Referenz-Interferometer **106** sind die Komponenten des Test-Interferometers über Lichtleitfasern **136**, **138**, **140** und **142** miteinander verbunden. Die Lichtleitfaser **140** verbindet die abstimmbare Laserquelle **112** mit dem Optokoppler **130**, während die Lichtleitfaser **136** den DUT-Detektor **134** mit dem Optokoppler verbindet. Gleichermaßen verbindet die Lichtleitfaser **142** den Optokoppler mit dem Spiegel **132**, beispielsweise einem Goldspiegel, während die Lichtleitfaser **138** den Optokoppler mit der optischen DUT **104** verbindet. In einem der Arme kann eine zusätzliche Polarisationssteuerung verwendet werden, um die Polarisationszustände der zurückkommenden optischen Signale anzupassen. Der Optokoppler **130** und die Lichtleitfasern **136**, **138**, **140** und **142** sind ebenfalls Einmodenkomponenten (SM-Komponenten). Die Länge der Lichtleitfaser **138** unterscheidet sich von der Länge der Lichtleitfaser **142** um den Abstand  $\Delta L_D$ , der zu einer Verzögerung in dem Referenz-Interferometer führt und seinen freien Spektralbereich definiert.

**[0051]** Der Betrieb des Test-Interferometers **108** ist dem Betrieb des Referenz-Interferometers **106** ähnlich. Die Umlaufverzögerung  $\tau_{DUT}$  für das Test-Interferometer ist jedoch aufgrund der Dispersion innerhalb der optischen DUT **104** von der Frequenz des optischen Signals von der abstimmbaren Laserquelle **112** abhängig, oder mathematisch ausgedrückt  $\tau_{DUT} = \tau_{DUT}(v)$ . Der Phasengang der optischen DUT kann durch Messen von Änderungen in der Phase des Heterodyn-Überlagerungssignals, die an dem DUT-Detektor **134** beobachtet werden, abgeleitet werden. Das Heterodyn-Überlagerungssignal wird von den zurückkommenden optischen Signalen in den Lichtleitfasern **138** und **142** erzeugt, wenn diese von dem Optokoppler **130** kombiniert und an dem DUT Detektor **134** erfaßt werden.

**[0052]** Die Phase des Heterodyn-Überlagerungssignals des Test-Interferometers **108** wird durch die Überstreichungsungleichmäßigkeit der abstimmbaren Laserquelle **112** modifiziert. Das heißt die Tatsache, daß die abstimmbare Laserquelle Frequenzen auf ungleichmäßige Weise in Bezug auf die Zeit über-

streicht, führt zu einer zusätzlichen Phasenverschiebung in der Phase des Heterodyn-Überlagerungssignals, die an dem DUT-Detektor **134** des Test-Interferometers **108** erfaßt wird. Das gleiche Phänomen existiert bei dem Referenz-Interferometer **106**. Daher enthalten beide Interferometer Informationen über die ungleichmäßige Frequenzüberstreichung der abstimmbaren Laserquelle **112**. Die Auswirkung der ungleichmäßigen Frequenzüberstreichung der abstimmbaren Laserquelle wird unten mit Bezug auf [Fig. 2](#), [Fig. 3](#), [Fig. 4](#), [Fig. 5](#) und [Fig. 6](#) beschrieben.

**[0053]** Unter der Annahme, daß die abstimmbare Laserquelle **112** eine ideale abstimmbare Laserquelle ist, die kontinuierlich den vorbestimmten Frequenzbereich auf gleichmäßige Weise in Bezug auf die Zeit überstreicht, ist die Frequenzänderung in Bezug auf die Zeit für die optischen Signale, die von der Laserquelle erzeugt werden, linear, wie es in [Fig. 2](#) gezeigt ist. Folglich ist das resultierende wechselstromgekoppelte Heterodyn-Überlagerungssignal eine reine Sinuswelle mit gleichmäßig voneinander beabstandeten Nulldurchgängen positiver Steigung, z. B. Nulldurchgängen  $z_0$ ,  $z_1$  und  $z_2$ , wie es in [Fig. 3](#) gezeigt ist. Obwohl die vorliegende Erfindung gemäß der Beschreibung die Nulldurchgänge positiver Steigung verwendet, können die Nulldurchgänge mit negativer Steigung alternativ verwendet werden. Unter Verwendung dieser Nulldurchgänge kann eine Funktion  $z(t)$  definiert werden, welche die Phase des Heterodyn-Überlagerungssignals bestimmt, wie es in [Fig. 4](#) gezeigt ist. Die Funktion  $z(t)$  nimmt an Nulldurchgangspunkten  $t_i = i/\gamma$  diskrete Werte  $z_i = 2\pi \cdot i$  an, wie es in [Fig. 4](#) gezeigt ist. Daher ist die Funktion  $z$  für eine ideale abstimmbare Laserquelle eine lineare Funktion.

**[0054]** Für die abstimmbare Laserquelle **112** jedoch, die Frequenzen ungleichmäßig überstreicht, sind die Nulldurchgänge positiver Steigung des Heterodyn-Überlagerungssignals ungleichmäßig, wie es in [Fig. 5](#) gezeigt ist. Folglich ist die Funktion  $z(t)$ , die durch diese ungleichmäßigen Nulldurchgänge definiert wird, nicht linear, wie es in [Fig. 6](#) gezeigt ist. Daher werden Änderungen in der Phase des Heterodyn-Überlagerungssignals an dem DUT-Detektor **134** und an dem Referenz-Detektor **120** stark von den Ungleichmäßigkeiten in der Frequenzüberstreichung der abstimmbaren Laserquelle beeinflusst. Die durch die dispersiven DUT-Charakteristika verursachten Phasenänderungen, die an dem DUT-Detektor **134** beobachtet werden, sind nicht von Phasenänderungen zu unterscheiden und sind durch diese Phasenänderungen, die durch die Ungleichmäßigkeit in der Frequenzüberstreichung der abstimmbaren Laserquelle verursacht werden, bestimmt.

**[0055]** Der Analysator **102** für optische Netzwerke löst dieses Problem, indem er die Nulldurchgänge positiver Steigung von dem Referenz-Interferometer

**106** verwendet, um die Ungleichmäßigkeiten der abstimmbaren Laserquelle **112** effektiv zu „kompensieren“. Eine nicht lineare Funktion  $z(t)$  von [Fig. 6](#) stellt ein typisches Phasenverhalten des Heterodyn-Überlagerungssignals von sowohl dem Referenz-Interferometer **106** als auch dem Test-Interferometer **108** dar. Die Funktion für das Test-Interferometer **108** ist in dieser Beschreibung als  $z_D(t)$  angegeben, während die Funktion für das Referenz-Interferometer **106** in dieser Beschreibung als  $z_R(t)$  angegeben ist. Da die Funktion  $z(t)$  eine Phase beschreibt, können die Funktionen für das DUT- und das Referenz-Interferometer folgendermaßen ausgedrückt werden:

$$z_D(t) = \Theta(t) \quad (1)$$

und

$$z_R(t) = \Theta_R(t), \quad (2)$$

wobei  $\Theta(t)$  und  $\Theta_R(t)$  die Phase des Heterodyn-Überlagerungssignals in dem DUT- bzw. dem Referenz-Interferometer beschreiben.

**[0056]** Für das nicht dispersive Referenz-Interferometer **106** ist die Phase jedoch proportional zu der optischen Frequenz  $\nu$  der interferierenden optischen Signale. Daher kann die Funktion  $z_R(t)$  folgendermaßen ausgedrückt werden:

$$z_R(t) = \Theta_R(t) = 2\pi \int \nu(t) dt.$$

**[0057]** Da  $\int \nu(t) dt = \varphi(t)$  und  $2\pi\nu(t) = \omega(t)$ , wobei  $\omega(t)$  die winkelige optische Frequenz und  $\tau$  die Umlaufverzögerung ist, kann die Funktion  $z_R(t)$  auch wie folgt ausgedrückt werden:

$$z_R(t) = \omega(t) \cdot \tau. \quad (3)$$

**[0058]** Bei einer ersten Ausführung berechnet das Verarbeitungsmodul **110** des Analysators **102** für optische Netzwerke die Gruppenverzögerung der optischen DUT **104** direkt aus den Nulldurchgängen positiver Steigung des Referenz-Heterodyn-Überlagerungssignals und des DUT-Heterodyn-Überlagerungssignals. Bei dieser Ausführung umfaßt das Verarbeitungsmodul einen Referenz-Nulldurchgangsdetektor **702**, einen DUT-Nulldurchgangsdetektor **704**, einen Prozessor **706** und Abtasteinheiten **708** und **710**, wie es in [Fig. 7](#) gezeigt ist. Diese Komponenten des Verarbeitungsmoduls können in einer beliebigen Kombination aus Hardware, Software und Firmware implementiert sein. Die Abtasteinheiten **708** und **710** tasten das Heterodyn-Überlagerungssignal von dem Referenzdetektor **120** bzw. dem DUT-Detektor **134** in gleichen Zeitinkrementen mittels eines Taktsignals ab. Der Referenz-Nulldurchgangsdetektor erfaßt die Nulldurchgänge positiver Steigung des abgetasteten Referenz-Heterodyn-Überlagerungssignals. Gleichermaßen erfaßt der DUT-Nulldurchgangsdetektor

die Nulldurchgänge positiver Steigung des abgetasteten DUT-Heterodyn-Überlagerungssignals. Dann verwendet der Prozessor die erfaßten Nulldurchgänge von sowohl dem Referenz-Nulldurchgangsdetektor als auch dem DUT-Nulldurchgangsdetektor, um die Gruppenverzögerung der optischen DUT **104** zu berechnen.

**[0059]** Der Betrieb des Verarbeitungsmoduls **110** gemäß der ersten Ausführung wird mit Bezug auf [Fig. 8](#) beschrieben. Bei Schritt **802** wird das Heterodyn-Überlagerungssignal von dem Referenzdetektor **120** in gleichen Zeitinkrementen mittels eines Taktsignals von der Abtasteinheit **708** abgetastet. Gleichermaßen wird bei Schritt **804** das Heterodyn-Überlagerungssignal von dem DUT-Detektor **134** in gleichen Zeitinkrementen mittels desselben Taktsignals von der Abtasteinheit **710** abgetastet. Als nächstes werden bei Schritt **806** die Nulldurchgänge positiver Steigung des abgetasteten Referenz-Heterodyn-Überlagerungssignals von dem Referenz-Nulldurchgangsdetektor **702** des Verarbeitungsmoduls **110** erfaßt. Gleichermaßen werden bei Schritt **808** die positiven Nulldurchgänge des abgetasteten DUT-Heterodyn-Überlagerungssignals von dem DUT-Nulldurchgangsdetektor **704** erfaßt.

**[0060]** Als nächstes leitet der Prozessor **706** bei Schritt **810** eine Funktion  $z_R(t)$  unter Verwendung der Nulldurchgänge ab, die von dem Referenz-Nulldurchgangsdetektor **702** erfaßt wurden. Gleichermaßen leitet der Prozessor bei Schritt **812** eine Funktion  $z_D(t)$  unter Verwendung der Nulldurchgänge ab, die von dem DUT-Nulldurchgangsdetektor **704** erfaßt wurden. Beispiele von Funktionen  $z_R(t)$  und  $z_D(t)$ , die von dem Prozessor abgeleitet werden können, sind in [Fig. 9](#) bzw. [Fig. 10](#) gezeigt. Die gezeigte Funktion  $z_R(t)$  umfaßt Nulldurchgangspunkte, die ungleichmäßig zeitlich voneinander beabstandet sind, was die Ungleichmäßigkeiten in der Frequenzüberstreichung der abstimmbaren Laserquelle **112** widerspiegelt. Die gezeigte Funktion  $z_D(t)$  umfaßt ebenfalls Nulldurchgangspunkte, die ungleichmäßig zeitlich voneinander beabstandet sind. Die ungleichmäßige Beabstandung der Nulldurchgangspunkte bei der Funktion  $z_D(t)$  enthält jedoch Informationen über den Phasengang der optischen DUT **104** sowie Informationen über die Ungleichmäßigkeiten in der Frequenzüberstreichung der abstimmbaren Laserquelle. Die Funktion  $z_D(t)$  kann von den erfaßten Nulldurchgängen unter Verwendung verschiedener Verfahren abgeleitet werden. Eines der Verfahren besteht darin, die erfaßten Nulldurchgänge einfach zu verbinden, um die Funktion  $z_D(t)$  abzuleiten. Andere Verfahren sehen vor, eine Polynomannäherung oder eine Anpassung nach der Methode der kleinsten Quadrate an den erfaßten Nulldurchgängen durchzuführen, um die Funktion  $z_D(t)$  abzuleiten.

**[0061]** Als nächstes berechnet der Prozessor **706**



bei Schritt **814** eine Ableitung der Funktion  $z_R(t)$  in Bezug auf die Zeit. Gleichmaßen berechnet der Prozessor bei Schritt **816** eine Ableitung der Funktion  $z_D(t)$  in Bezug auf die Zeit. Numerisch gesehen können die Zeitableitungen der Funktionen  $z_R(t)$  und  $z_D(t)$  dadurch geschätzt werden, daß die Funktionen  $z_R(t)$  und  $z_D(t)$  erneut in gleichen Zeitinkrementen abgetastet und dann bekannte numerische Algorithmen zur Berechnung der Ableitungen verwendet werden. Ein alternatives numerisches Verfahren ist es, Ableitungen  $dt/dz_D$  und  $dt/dz_R$  zu berechnen, da benachbarte Nulldurchgänge positiver Steigung gleichmäßig um  $2\pi$  voneinander beabstandet sind, wie es oben beschrieben wurde. Zeitableitungen der beispielhaften Funktionen  $z_R(t)$  und  $z_D(t)$  sind in [Fig. 11](#) und [Fig. 12](#) gezeigt. Bei Schritt **818** wird die Gruppenverzögerung  $\tau_g$  für die optische DUT **104** von dem Prozessor unter Verwendung der folgenden Gleichung berechnet:

$$\tau_g = \frac{\frac{dz_D}{dt}}{\frac{dz_R}{dt}} \cdot \tau.$$

**[0062]** Die obige Gleichung kann folgendermaßen validiert werden. Die Standarddefinition für die Gruppenverzögerung  $\tau_g$  wird wie folgt ausgedrückt:

$$\tau_g = \frac{d\Theta}{d\omega}.$$

**[0063]** Aus den Gleichungen (1) und (3) folgt

$$\Theta(t) = z_D(t) \text{ und } \omega(t) = \frac{z_R(t)}{\tau}.$$

**[0064]** Daher gilt

$$\frac{d\Theta(t)}{dt} = \frac{dz_D(t)}{dt} \quad (4)$$

und

$$\frac{d\omega(t)}{dt} = \frac{dz_R(t)}{dt} \cdot \frac{1}{\tau}. \quad (5)$$

**[0065]** Folglich gilt

$$\tau_g = \frac{\frac{d\Theta(t)}{dt}}{\frac{d\omega(t)}{dt}} = \frac{\frac{dz_D(t)}{dt}}{\frac{dz_R(t)}{dt}} \cdot \tau.$$

**[0066]** Bei einer zweiten Ausführung berechnet das Verarbeitungsmodul **110** des Analysators **102** für optische Netzwerke die Gruppenverzögerung der optischen DUT **104** unter Verwendung der Nulldurchgänge positiver Steigung des Referenz-Interferometers **106**, um die Datenerfassung der Überlagerungsfre-

quenz von dem Test-Interferometer in gleichen Frequenzinkrementen zu takten. Bei einem hardwarebasierten Abtastansatz umfaßt das Verarbeitungsmodul den DUT-Nulldurchgangsdetektor **704**, eine Quadrierschaltung **1302**, eine Abtasteinheit **1304** und den Prozessor **706**, wie es in [Fig. 13](#) gezeigt ist. Die Quadrierschaltung wandelt das Heterodyn-Überlagerungssignal, das von dem Referenzdetektor **120** des Referenz-Interferometers **106** empfangen wurde, von einer sinusförmigen Wellenform in eine rechteckige Wellenform um. Die Quadrierschaltung kann beispielsweise ein Schmitt-Trigger sein. Die Flanken der resultierenden rechteckigen Wellenform werden dann von der Abtasteinheit **1304** zur Abtastung des Heterodyn-Überlagerungssignals von dem Test-Interferometer **108** verwendet. Da benachbarte Nulldurchgänge positiver Steigung des Referenz-Heterodyn-Überlagerungssignals definitionsgemäß um  $2\pi$  voneinander beabstandet sind und das Interferometer nicht dispersiv ist, sind die abgetasteten Datenpunkte des DUT-Heterodyn-Überlagerungssignals hinsichtlich der optischen Frequenz (Wellenlänge) gleichmäßig voneinander beabstandet. Nach der Abtastung erfaßt der DUT-Nulldurchgangsdetektor die Nulldurchgänge positiver Steigung des abgetasteten Heterodyn-Überlagerungssignals. Dann leitet der Prozessor **706** die Funktion  $z_D(v)$  von den Nulldurchgängen positiver Steigung ab, die von dem DUT-Nulldurchgangsdetektor erfaßt wurden. Ähnlich der Ableitung der Funktion  $z_D(t)$  kann die Funktion  $z_D(v)$  von den erfaßten Nulldurchgängen unter Verwendung verschiedener Verfahren abgeleitet werden. Der Prozessor verwendet die Funktion  $z_D(v)$ , um die Gruppenverzögerung für die optische DUT **104** zu berechnen.

**[0067]** Der Betrieb des Verarbeitungsmoduls **110** gemäß dem hardwarebasierten Abtastansatz der zweiten Ausführung wird mit Bezug auf [Fig. 14](#) beschrieben. Bei Schritt **1402** wird ein sinusförmiges Überlagerungssignal von dem Referenz-Interferometer **106** von der Quadrierschaltung **1302** in eine rechteckige Wellenform umgewandelt, um ein Taktsignal zu erzeugen. Das von der Quadrierschaltung empfangene sinusförmige Überlagerungssignal ist in [Fig. 15](#) gezeigt. Die Nulldurchgänge des sinusförmigen Überlagerungssignals sind durch Punkte  $z_1$ ,  $z_2$ ,  $z_3$ , etc. angegeben. Das Ausgangssignal von der Quadrierschaltung ist in [Fig. 16](#) dargestellt. Das Ausgangssignal von [Fig. 16](#) ist das sinusförmige Überlagerungssignal von [Fig. 15](#), das von der Quadrierschaltung umgewandelt wurde. Wie es in [Fig. 16](#) gezeigt ist, wurde die sinusförmige Wellenform in ein Signal mit steilen Flanken  $z_1'$ ,  $z_2'$  und  $z_3'$  umgewandelt, die zur Taktung eines Datenerfassungssystems verwendet werden können.

**[0068]** Als nächstes wird bei Schritt **1404** ein Heterodyn-Überlagerungssignal von dem Test-Interferometer **108** durch den Prozessor **706** in gleichen Fre-

quenzinkrementen  $\Delta v$  unter Verwendung des Taktsignals abgetastet (getaktet), wobei  $\Delta v = 1/T$ . Bei Schritt **1406** werden Nulldurchgänge positiver Steigung des Heterodyn-Überlagerungssignals von dem Test-Interferometer durch den DUT-Nulldurchgangsdetektor **704** des Verarbeitungsmoduls **110** erfaßt. Als nächstes leitet der Prozessor bei Schritt **1408** eine Funktion  $z_D(v)$  unter Verwendung der von dem DUT-Nulldurchgangsdetektor erfaßten Nulldurchgänge ab. Die Funktion  $z_D(v)$  ist in [Fig. 17](#) gezeigt. Die Abtastwerte, die in Schritt **1404** abgeleitet werden, sind in [Fig. 17](#) als Punkte **1702** dargestellt. Die Punkte **1704** sind die Nulldurchgänge positiver Steigung des Heterodyn-Überlagerungssignals von dem Test-Interferometer, die in Schritt **1406** erfaßt werden. Bei Schritt **1410** wird die Frequenzableitung der Funktion  $z_D(v)$  von dem Prozessor berechnet. Dies ist äquivalent zu der Berechnung der Gruppenverzögerung  $\tau_g$  als:

$$\tau_g = \frac{dz_D(v)}{dv}. \quad (6)$$

**[0069]** Da die Funktion  $z_D(v) = \Theta(v)$ , kann die obige Gleichung als

$$\tau_g = \frac{d\Theta(\omega)}{d\omega}$$

geschrieben werden, wobei  $\omega = 2\pi v$ . Daher ist die Gleichung (6) äquivalent zu der Definition der Gruppenverzögerung.

**[0070]** In einem praktischen numerischen Ansatz kann die Ableitung der Funktion  $z_D(v)$  in Bezug auf die Frequenz durch Berechnen von  $dv/dz_D$  errechnet werden, da benachbarte Nulldurchgänge positiver Steigung gleichmäßig um  $2\pi$  voneinander beabstandet sind, wie es in [Fig. 17](#) gezeigt ist. Bei diesem Ansatz wird die Gruppenverzögerung  $\tau_g$  für die optische DUT von dem Prozessor unter Verwendung der folgenden Gleichung berechnet:

$$\tau_g = \frac{1}{\frac{dv}{dz_D}}.$$

**[0071]** Bei einem softwarebasierten Abtastansatz der zweiten Ausführung umfaßt das Verarbeitungsmodul **110** den Referenz-Nulldurchgangsdetektor **702**, den DUT-Nulldurchgangsdetektor **704**, den Prozessor **706**, Abtasteinheiten **1802** und **1804** und eine Wiederabtasteinheit **1806**, wie es in [Fig. 18](#) gezeigt ist. Die Abtasteinheiten **1802** und **1804** tasten das Heterodyn-Überlagerungssignal von dem Referenzdetektor **120** bzw. dem DUT-Detektor **134** in gleichen Zeitinkrementen ab. Das abgetastete Referenz-Heterodyn-Überlagerungssignal wird an den Referenz-Nulldurchgangsdetektor übertragen, wobei Nulldurchgänge positiver Steigung des Referenz-Heterodyn-Überlagerungssignals erfaßt werden.

**[0072]** Die erfaßten Nulldurchgänge werden dann an die Wiederabtasteinheit übertragen, wo das abgetastete DUT-Heterodyn-Überlagerungssignal erneut in gleichen Inkrementen der optischen Frequenz unter Verwendung der erfaßten Nulldurchgänge des Referenz-Heterodyn-Überlagerungssignals abgetastet wird. Um das DUT-Heterodyn-Überlagerungssignal erneut abzutasten, muß das abgetastete DUT-Heterodyn-Überlagerungssignal interpoliert werden, um Informationen zwischen den abgetasteten Datenpunkten des DUT-Heterodyn-Überlagerungssignals zu erhalten. Da benachbarte Nulldurchgänge positiver Steigung des Referenz-Heterodyn-Überlagerungssignals definitionsgemäß um  $2\pi$  voneinander beabstandet sind, sind die abgetasteten Datenpunkte des DUT-Heterodyn-Überlagerungssignals wie oben erwähnt hinsichtlich der Frequenz gleichmäßig voneinander beabstandet. Der Betrieb des DUT-Nulldurchgangsdetektors **704** und des Prozessors **706** entspricht dem Betrieb in dem oben beschriebenen hardwarebasierten Abtastansatz zur Berechnung der Gruppenverzögerung.

**[0073]** Bei der ersten und der zweiten Ausführung ist die Laserquelle, die in den Analysatoren für optische Netzwerke enthalten ist, eine abstimbare Laserquelle, die kontinuierlich einen vorbestimmten Frequenzbereich auf ungleichmäßige Weise überstreicht.

**[0074]** Unter der Annahme, daß die Frequenz des optischen Eingangssignals auf ungleichmäßige Weise zeitlich variiert, kann das Verfahren ferner die Schritte des Erfassens der optischen Frequenz des optischen Eingangssignals und des Kompensierens der ungleichmäßigen Frequenzänderungen des optischen Eingangssignals bei dem von dem Test-Interferometer erzeugten Heterodyn-Überlagerungssignal umfassen. Die optische Frequenz des optischen Eingangssignals kann mittels eines Referenz-Interferometers erfaßt werden.

**[0075]** Bei einer Ausführung wird die Gruppenverzögerung durch Teilen der Ableitung der DUT-Nulldurchgangsfunktion in Bezug auf die Zeit durch eine Ableitung einer Referenz-Nulldurchgangsfunktion in Bezug auf die Zeit berechnet. Bei dieser Ausführung werden die Zeitableitungen der Referenz-Nulldurchgangsfunktion und der DUT-Nulldurchgangsfunktion durch Erfassen der Nulldurchgänge positiver Steigung des Heterodyn-Überlagerungssignals berechnet, die aus dem optischen Eingangssignal resultieren, das zu dem Referenz-Interferometer **106** und dem Test-Interferometer **108** übertragen wird. Bei einer anderen Ausführung wird die Gruppenverzögerung durch Annähern der Ableitung der DUT-Nulldurchgangsfunktion in Bezug auf die optische Frequenz berechnet. Bei dieser Ausführung werden die Nulldurchgänge positiver Steigung von dem Referenz-Interferometer verwendet, um das DUT-Hetero-

dyn-Überlagerungssignal in gleichen Frequenzinkrementen abzutasten, um die DUT-Nulldurchgangsfunktion zu bestimmen und die Frequenzableitung der DUT-Nulldurchgangsfunktion zu berechnen.

### Patentansprüche

1. Verfahren zum Messen einer Gruppenverzögerung einer zu prüfenden optischen Einrichtung (DUT; device under test) (**104**) mit folgenden Verfahrensschritten:

Erzeugen (**2002**) eines optischen Eingangssignals mit einer Frequenz, die zeitlich variiert, für ein Test-Interferometer (**108**), wobei die Änderungen der Frequenz des optischen Eingangssignals ungleichmäßig sind, wobei das Test-Interferometer das optische DUT umfaßt;

Erzeugen eines Referenz-Heterodyn-Überlagerungssignals aus dem optischen Eingangssignal; Erfassen (**2004**) von DUT-Nulldurchgängen eines DUT-Heterodyn-Überlagerungssignals von dem Test-Interferometer;

Erfassen der Nulldurchgänge des Referenz-Heterodyn-Überlagerungssignals; Berechnen einer Ableitung einer DUT-Nulldurchgangsfunktion in Bezug auf die Zeit, die Information über Änderungen in der Phase des DUT-Heterodyn-Überlagerungssignals liefert; Berechnen der Ableitung der Referenz-Nulldurchgangsfunktion in Bezug auf die Zeit, welche Information über Änderungen in der optischen Frequenz des optischen Eingangssignals liefert; und Berechnen der Gruppenverzögerung des optischen DUT durch Teilen der Ableitung der DUT-Nulldurchgangsfunktion durch die Ableitung der Referenz-Nulldurchgangsfunktion.

2. Verfahren zum Messen einer Gruppenverzögerung einer zu prüfenden optischen Einrichtung (DUT; device under test) (**104**), mit folgenden Verfahrensschritten:

Erzeugen (**2002**) eines optischen Eingangssignals mit einer Frequenz, die zeitlich variiert, für ein Test-Interferometer (**108**), wobei die Änderungen der Frequenz des optischen Eingangssignals ungleichmäßig sind, wobei das Test-Interferometer das optische DUT umfaßt;

Erzeugen eines Referenz-Heterodyn-Überlagerungssignals aus dem optischen Eingangssignal; Erfassen (**2004**) von DUT-Nulldurchgängen eines DUT-Heterodyn-Überlagerungssignals von dem Test-Interferometer;

Erfassen der Nulldurchgänge des Referenz-Heterodyn-Überlagerungssignals;

Umwandeln des Referenz-Heterodyn-Überlagerungssignals in ein Taktsignal;

Abtasten des DUT-Heterodyn-Überlagerungssignals in gleichen Frequenzinkrementen unter Verwendung des Taktsignals; und

Berechnen der Gruppenverzögerung des optischen DUT durch Berechnen der Ableitung der DUT-Null-

durchgangsfunktion in Bezug auf die optische Frequenz.

3. System zum Messen einer Gruppenverzögerung einer zu prüfenden optischen Einrichtung (DUT; device under test) (**104**) mit folgenden Merkmalen: eine Lichtquelle (**112**), die ein optisches Eingangssignal mit einer Frequenz, die zeitlich variiert, erzeugt, wobei die Änderungen der Frequenz des optischen Eingangssignals ungleichmäßig sind;

ein Testinterferometer (**108**), das mit der Lichtquelle optisch gekoppelt ist, um das optische Eingangssignal zu empfangen, wobei das Testinterferometer das optische DUT umfaßt;

ein Referenzinterferometer, das mit der Lichtquelle (**12**) optisch gekoppelt ist und ein Referenz-Heterodyn-Überlagerungssignal auf der Grundlage des optischen Eingangssignals erzeugt;

ein DUT-Nulldurchgangsdetektor (**704**), der mit dem Test-Interferometer gekoppelt ist, um DUT-Nulldurchgänge eines DUT-Heterodyn-Überlagerungssignals von dem Test-Interferometer zu erfassen;

ein Referenz-Nulldurchgangsdetektor, der mit dem Referenz-Interferometer gekoppelt ist, um die Nulldurchgänge des Referenz-Heterodyn-Überlagerungssignals von dem Referenz-Interferometer zu erfassen; und

ein Prozessor (**110**), der dazu konfiguriert ist, eine Ableitung einer DUT- Nulldurchgangsfunktion in Bezug auf die Zeit zu berechnen, welche Information über Änderungen in der Phase des DUT-Heterodyn-Überlagerungssignals liefert;

die Ableitung der Referenz-Nulldurchgangsfunktion in Bezug auf Zeit zu berechnen, welche Information über Änderungen in der optischen Frequenz des optischen Eingangssignals liefert; und

die Gruppenverzögerung des optischen DUT zu berechnen, indem er die Ableitung der DUT-Nulldurchgangsfunktion durch die Ableitung der Referenz-Nulldurchgangsfunktion teilt.

4. System zum Messen einer Gruppenverzögerung einer zu prüfenden optischen Einrichtung (DUT; device under test) (**104**) mit folgenden Merkmalen:

einer Lichtquelle (**112**), die ein optisches Eingangssignal mit einer Frequenz, die zeitlich variiert, erzeugt, wobei die Änderungen der Frequenz des optischen Eingangssignals ungleichmäßig sind;

ein Testinterferometer (**108**), das mit der Lichtquelle optisch gekoppelt ist, um das optische Eingangssignal zu empfangen, wobei das Testinterferometer das optische DUT umfaßt;

ein Referenzinterferometer, das mit der Lichtquelle (**12**) optisch gekoppelt ist und ein Referenz-Heterodyn-Überlagerungssignal auf der Grundlage des optischen Eingangssignals erzeugt;

ein DUT-Nulldurchgangsdetektor (**704**), der mit dem Test-Interferometer gekoppelt ist, um DUT-Nulldurchgänge eines DUT-Heterodyn-Überlagerungssignals von dem Test-Interferometer zu erfassen;

ein Wellen-Konverter, der zum Umwandeln des Referenz-Heterodyn-Überlagerungssignals von dem Referenz-Interferometer in ein Taktsignal konfiguriert ist; und  
 ein Prozessor (**110**), der dazu konfiguriert ist, das DUT-Heterodyn-Überlagerungssignal in gleichen Frequenzinkrementen unter Verwendung des Taktsignals abzutasten; und  
 die Gruppenverzögerung des optischen DUT zu berechnen, indem er die Ableitung der DUT-Nulldurchgangsfunktion in Bezug auf die optische Frequenz berechnet.

5. System nach Anspruch 3 oder 4 mit einem optischen Frequenzzähler (**106** und **110**), der dazu konfiguriert ist, die optische Frequenz des optischen Eingangssignals zu erfassen, wobei die optische Frequenz dazu verwendet wird, Ungleichmäßigkeiten in der Frequenzüberstreichung der Lichtquelle auszugleichen.

6. System nach Anspruch 5, wobei der optische Frequenzzähler (**106** und **11**) das Referenz-Interferometer (**108**) umfaßt, wobei das Referenz-Heterodyn-Überlagerungssignal mit der optischen Frequenz des optischen Eingangssignals verknüpft ist.

7. System nach Anspruch 6, wobei der optische Frequenzzähler (**106** und **110**) dazu konfiguriert ist, Null-Durchgänge des Referenz-Heterodyn-Überlagerungssignals von dem Referenz-Interferometer (**106**) zu erfassen (**702**), um die optische Frequenz des optischen Eingangssignals zu messen.

8. System nach einem der Ansprüche 3 bis 7, wobei der Prozessor (**110**) ferner dazu konfiguriert ist, die DUT-Nulldurchgangsfunktion in gleichen Zeitinkrementen abzutasten (**710**), um die Ableitung der DUT-Nulldurchgangsfunktion in Bezug auf die Zeit anzunähern.

Es folgen 11 Blatt Zeichnungen

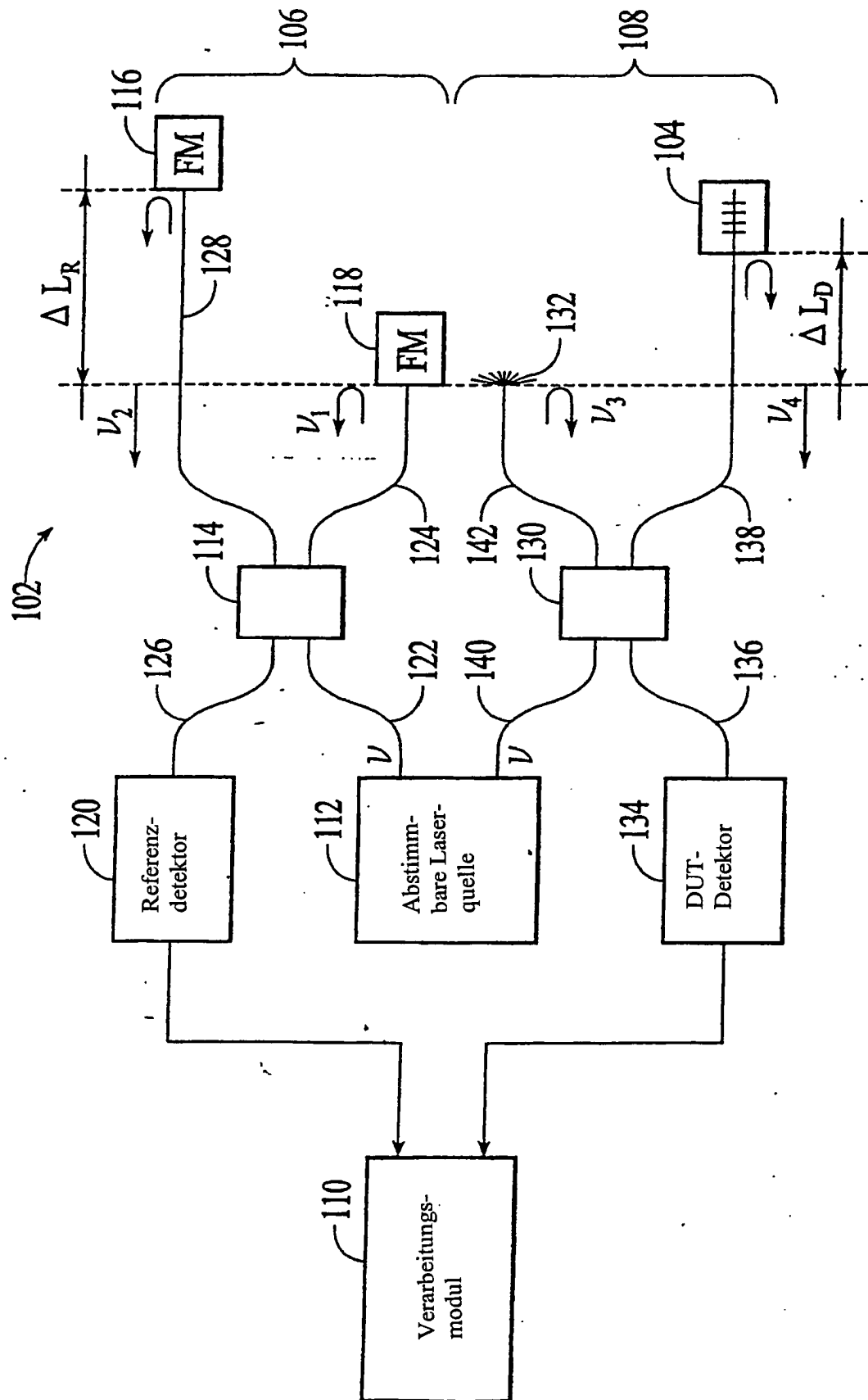


FIG. 1



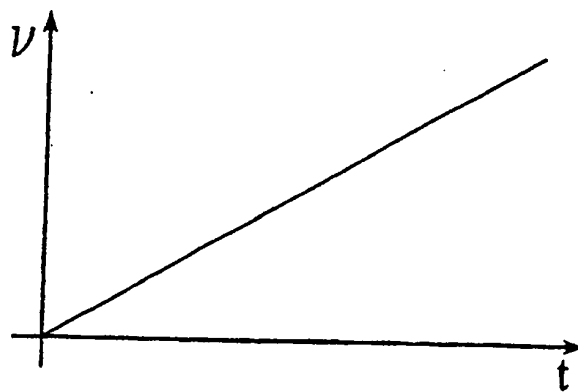


FIG. 2

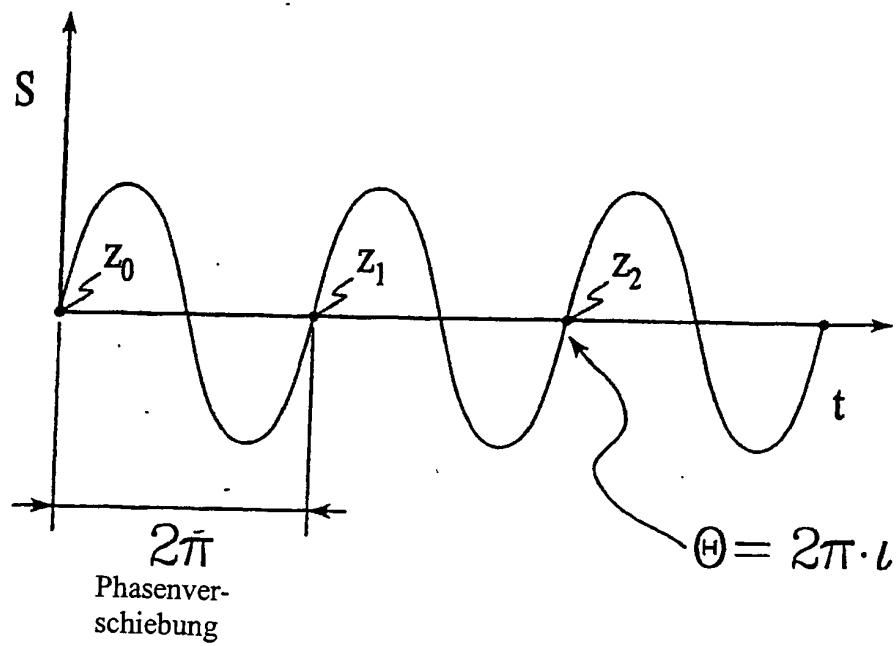


FIG. 3

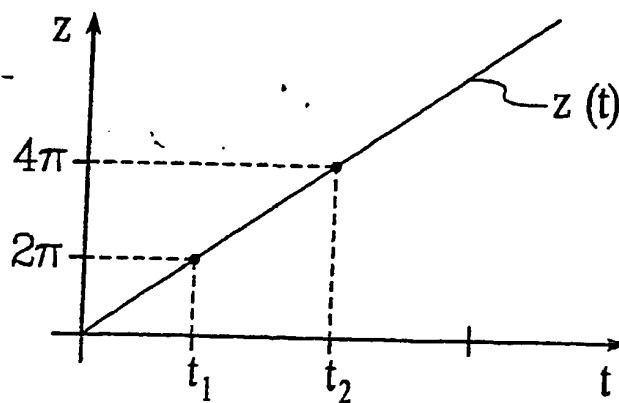


FIG. 4

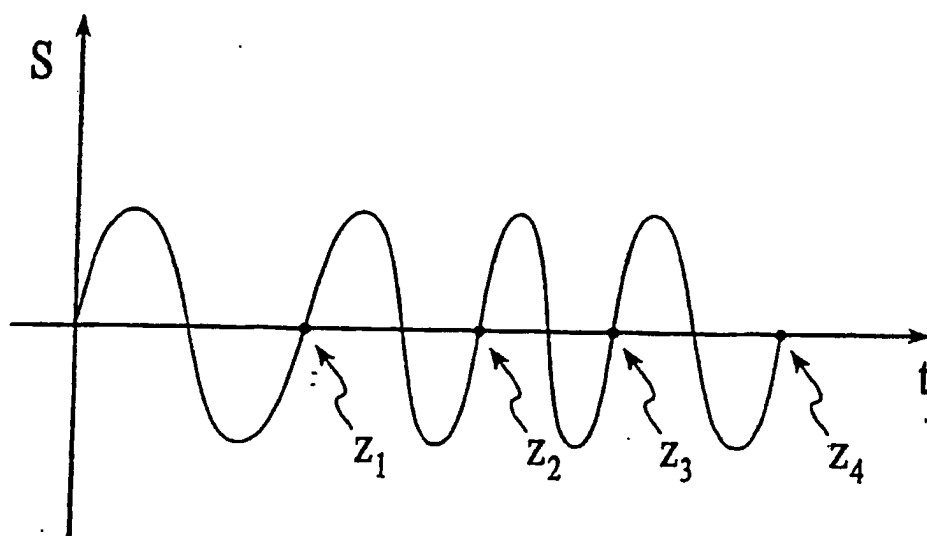


FIG. 5

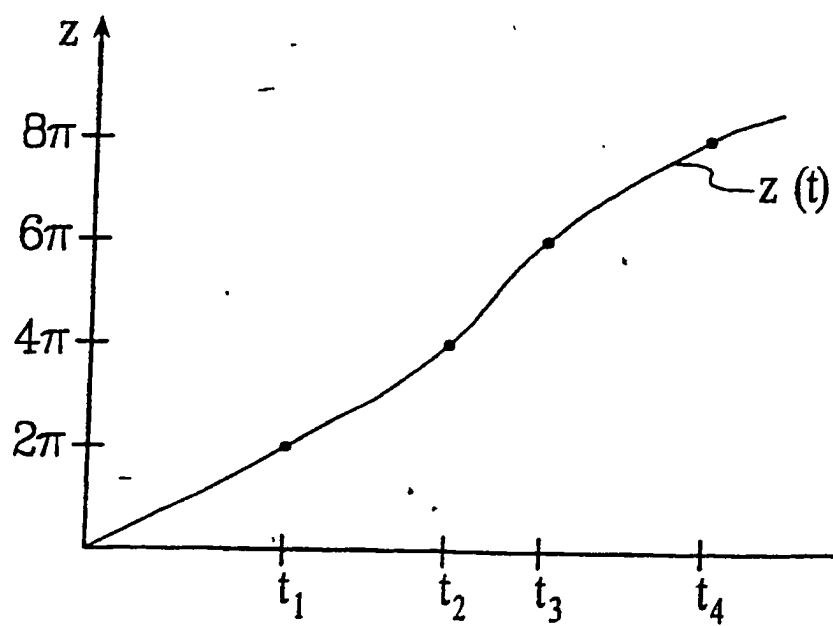


FIG. 6

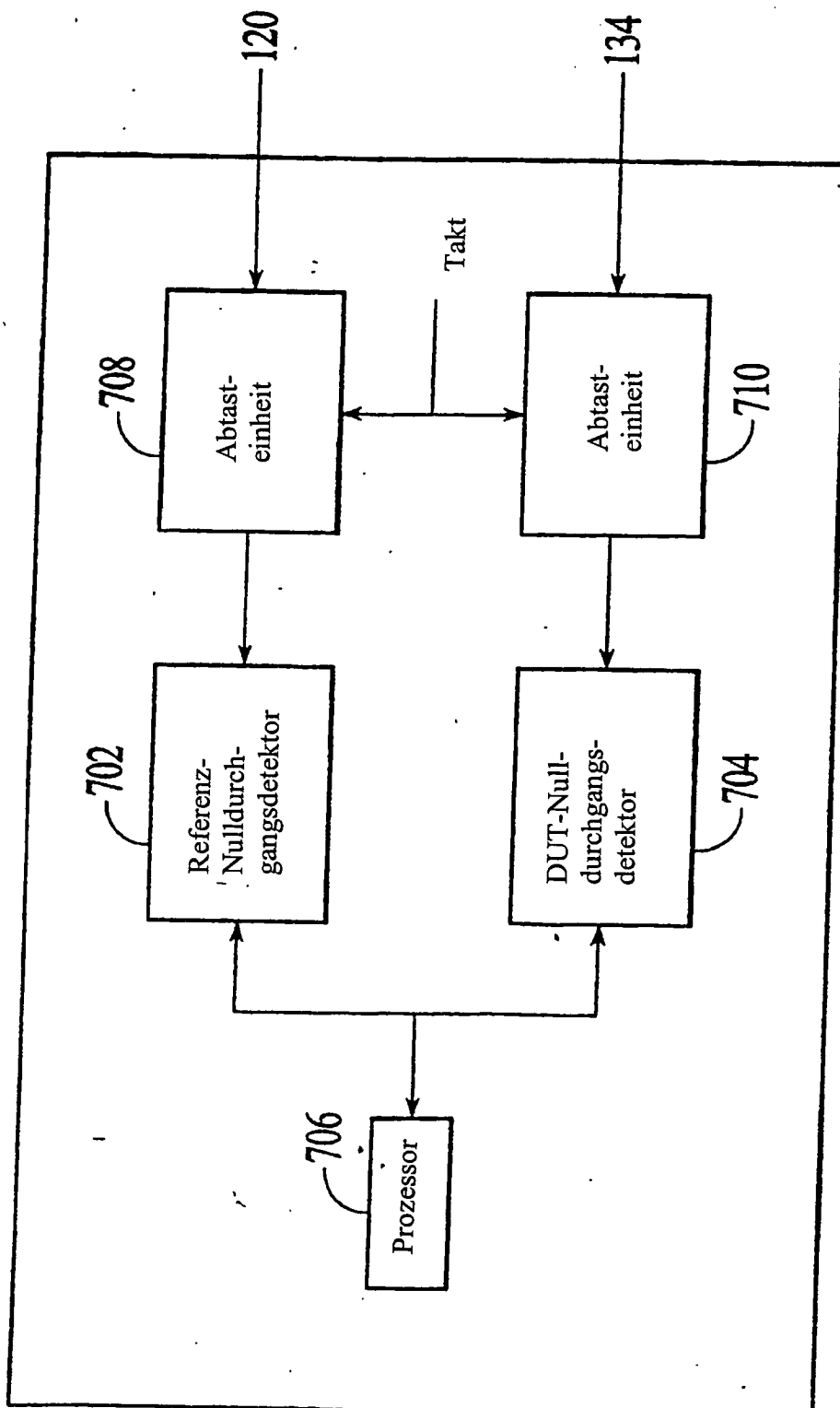


FIG. 7

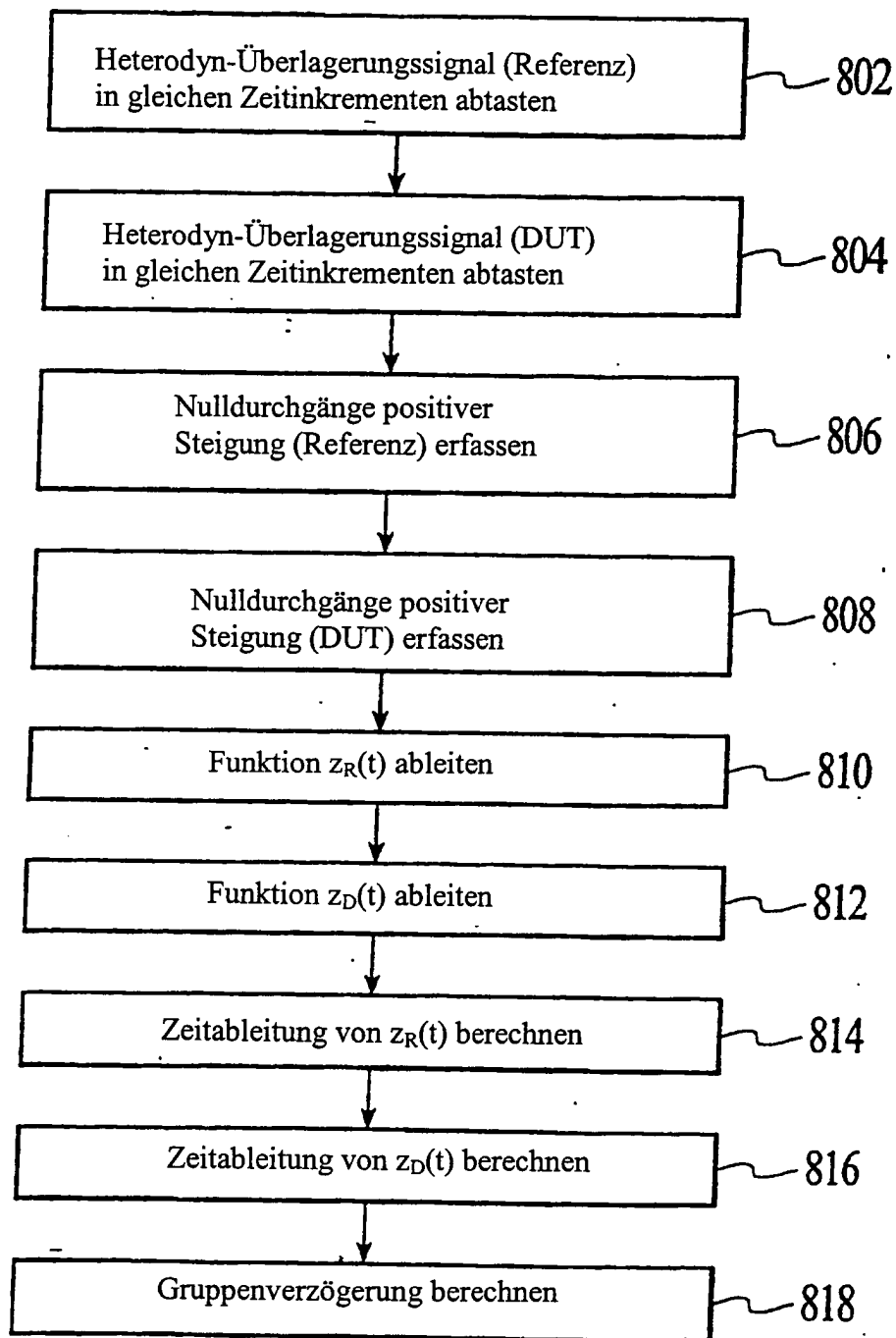


FIG. 8

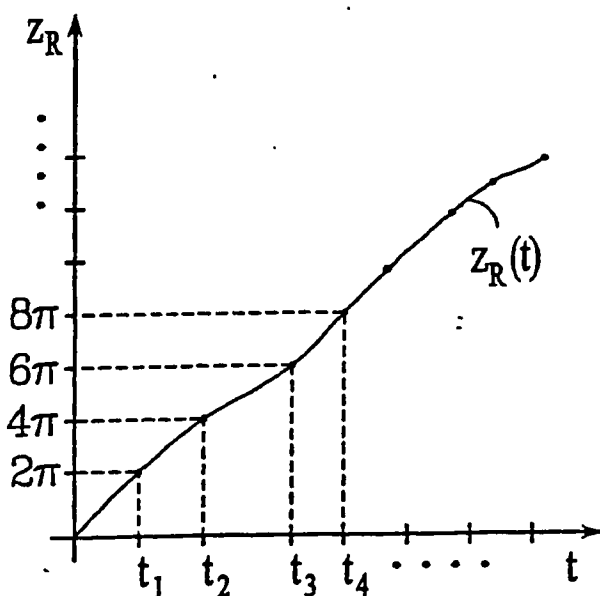


FIG. 9

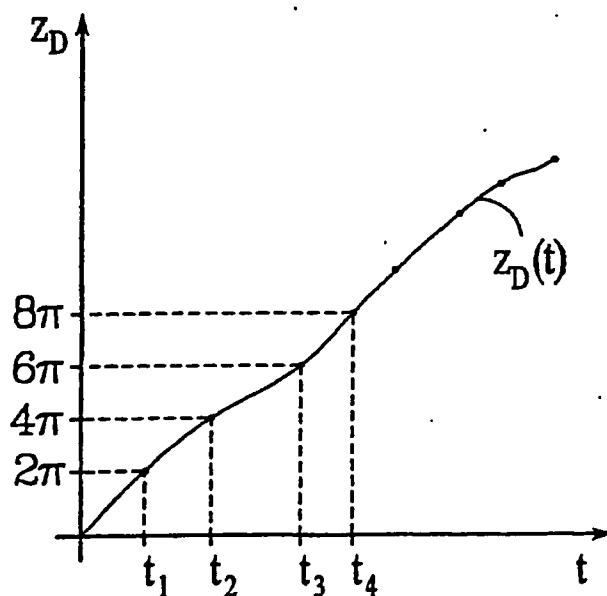


FIG. 10

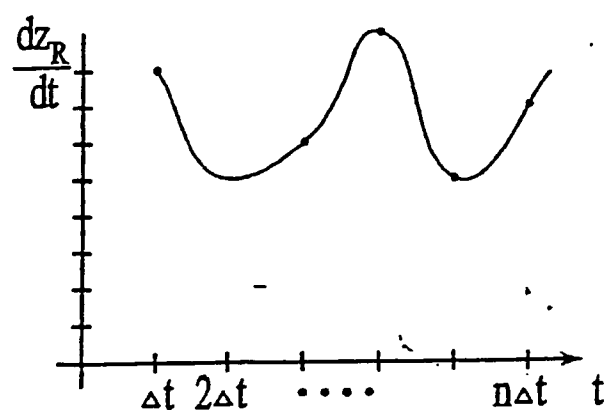


FIG. 11

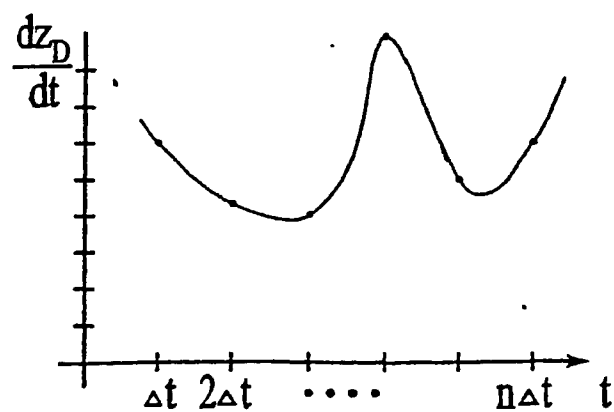


FIG. 12



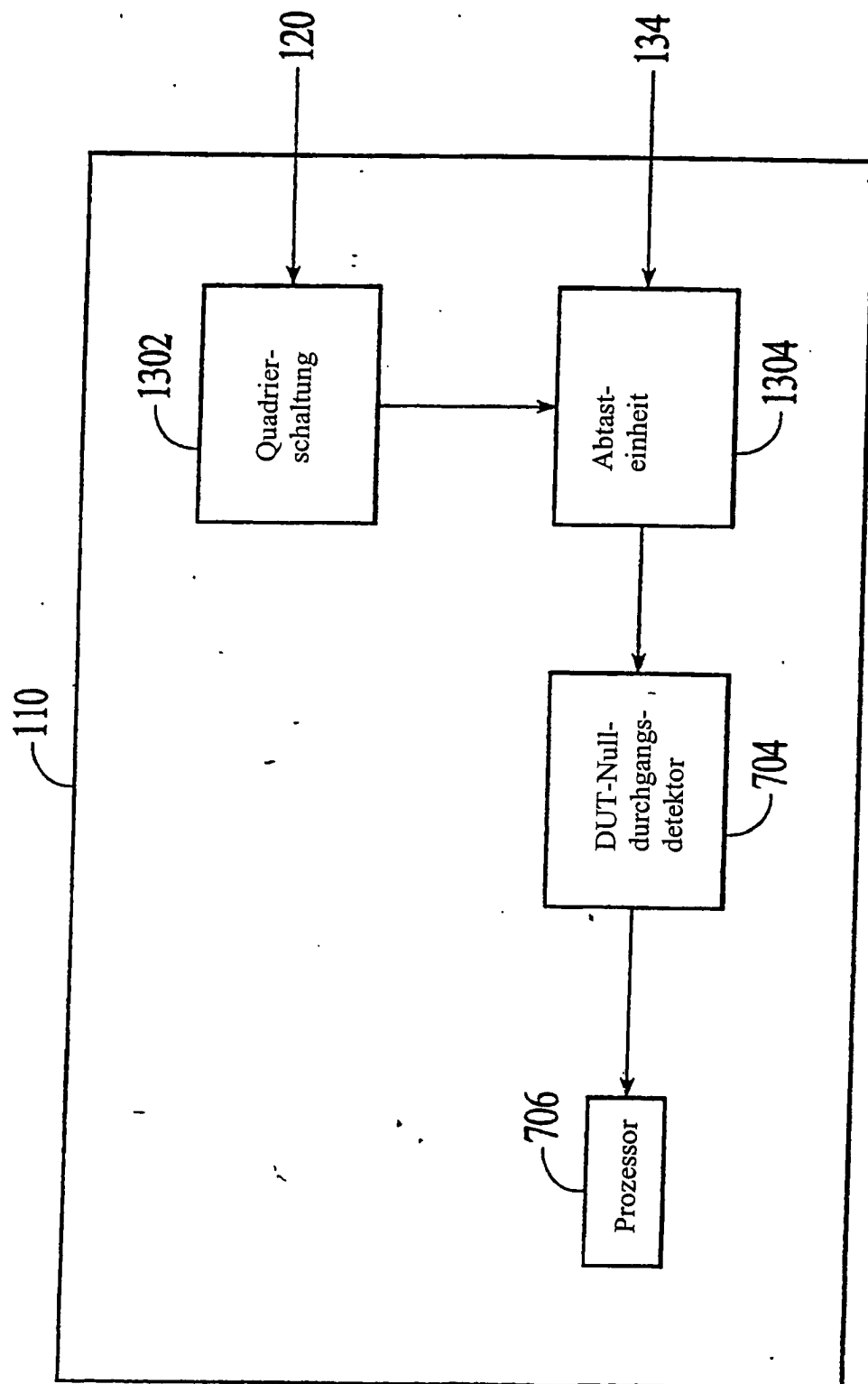


FIG. 13

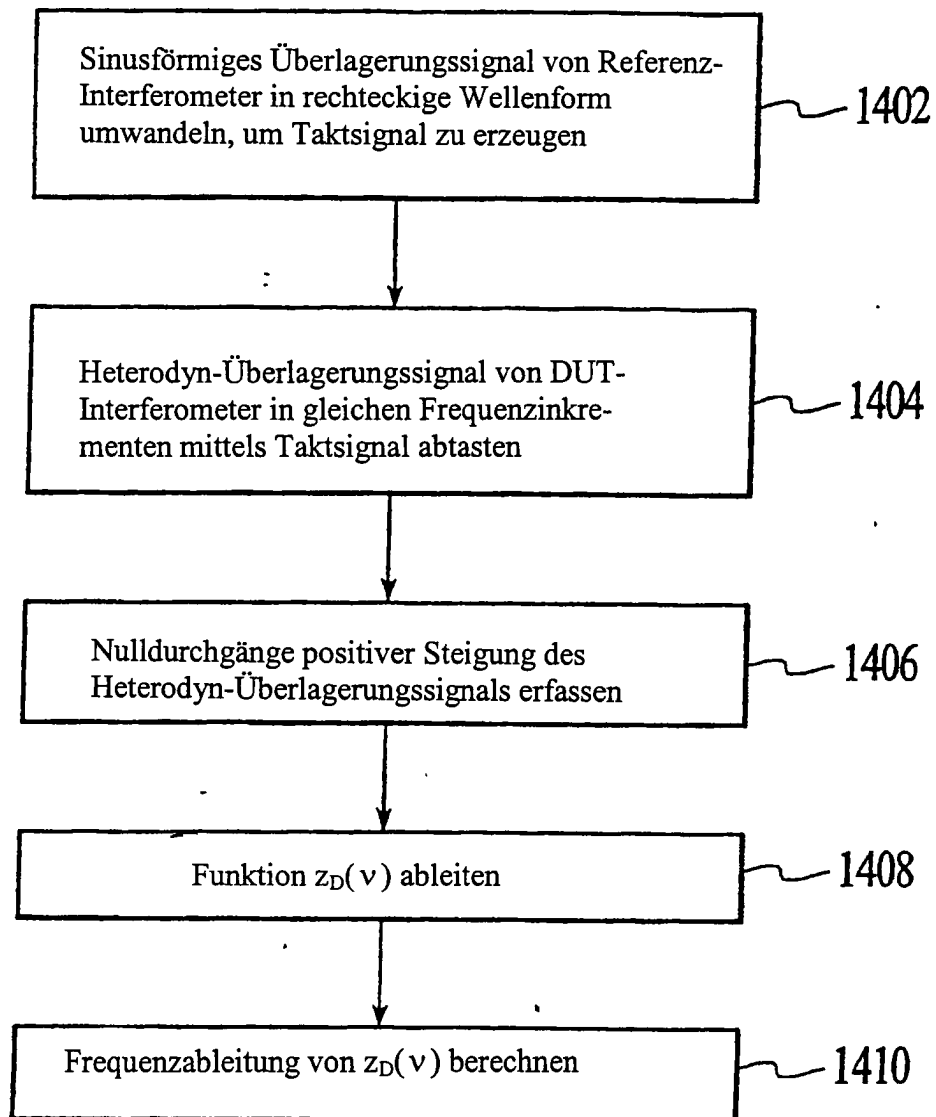


FIG. 14

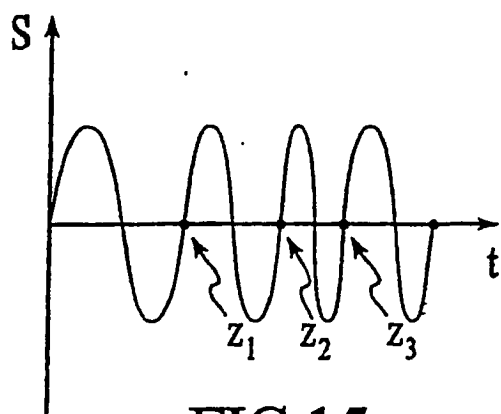


FIG.15

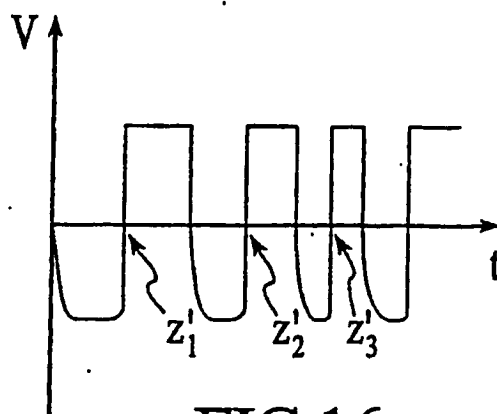


FIG.16

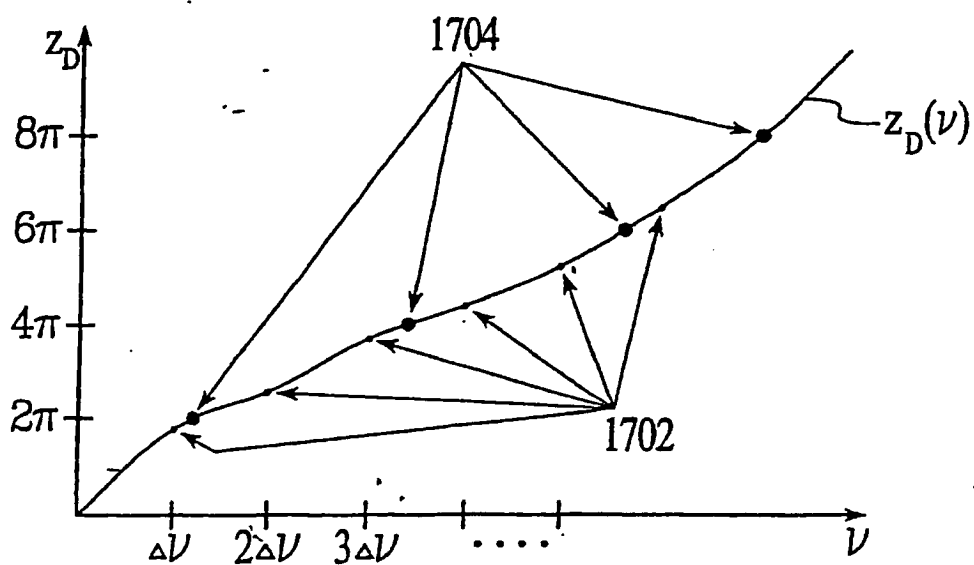


FIG.17

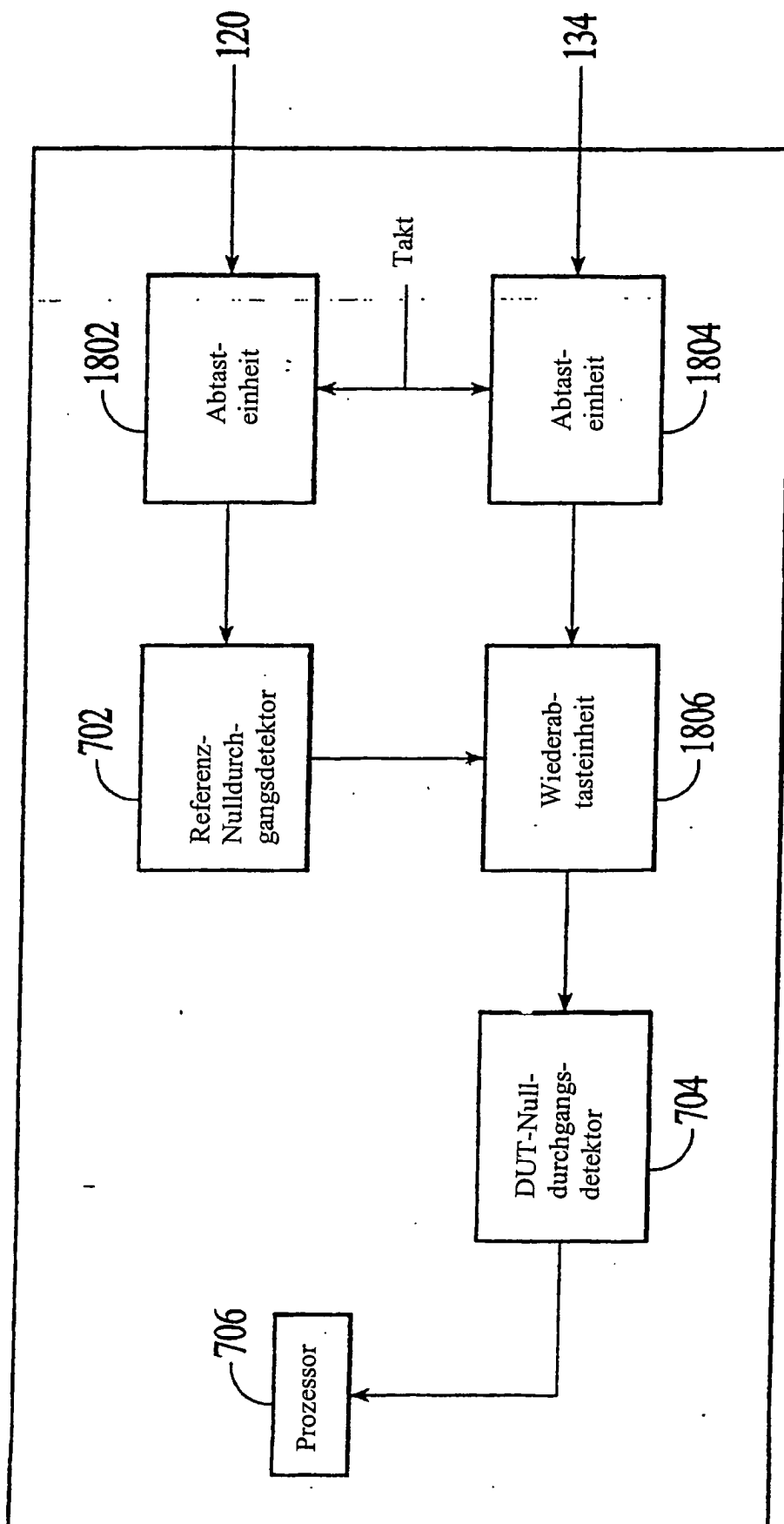


FIG. 18

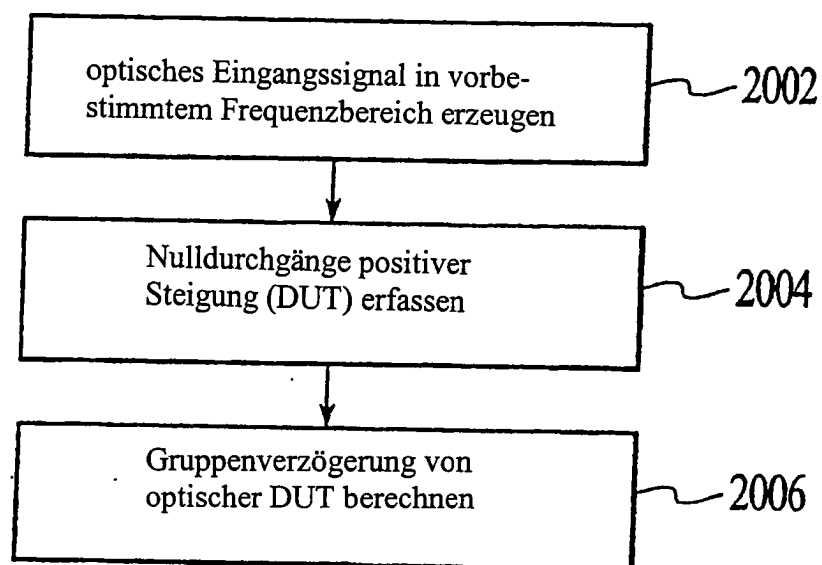


FIG. 20